



**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE  
SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

**FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO  
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN CONTROL Y  
AUTOMATISMO**

**TEMA:**

**Modelado de un sistema de producción y envasado de gaseosas con redes de Petri, para la implementación en autómatas programables, utilizando una maqueta simplificada del proceso.**

**AUTORES:**

**Domínguez Cruz, Vanessa Maritza**

**Marín Gavilánez, Jordy Rafael**

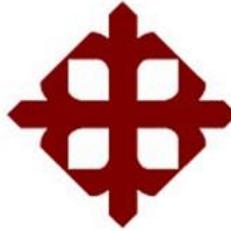
**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de  
INGENIERO ELECTRÓNICO EN CONTROL Y AUTOMATISMO**

**TUTOR:**

**Mendoza Merchán, Eduardo Vicente**

**Guayaquil, Ecuador**

**13 de septiembre del 2017**



**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE  
SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

**FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO  
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN CONTROL Y  
AUTOMATISMO**

**CERTIFICACIÓN**

Certificamos que el presente trabajo de titulación, fue realizado en su totalidad por **Domínguez Cruz, Vanessa Maritza y Marín Gavilánez, Jordy Rafael**, como requerimiento para la obtención del Título de **Ingeniero Electrónico en Control y Automatismo**.

**TUTOR**

f. \_\_\_\_\_

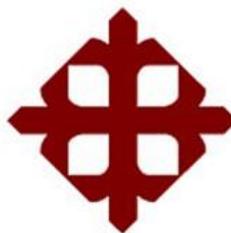
**Mendoza Merchán, Eduardo Vicente**

**DIRECTOR DE LA CARRERA**

f. \_\_\_\_\_

**Heras Sánchez, Miguel Armando**

**Guayaquil, a los 13 días del mes de septiembre del año 2017**



**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE  
SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

**FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO  
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN CONTROL Y  
AUTOMATISMO**

**DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD**

Nosotros, **Domínguez Cruz, Vanessa Maritza; Marín Gavilánez, Jordy Rafael**

**DECLARAMOS QUE:**

El Trabajo de Titulación, **Modelado de un sistema de producción y envasado de gaseosas con redes de Petri, para la implementación en autómatas programables, utilizando una maqueta simplificada del proceso**, previo a la obtención del Título de **Ingeniero Electrónico en Control y Automatismo**, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido.

**Guayaquil, a los 13 días del mes de septiembre del año 2017**

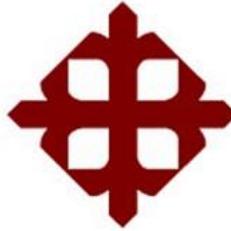
**LOS AUTORES:**

f. \_\_\_\_\_

f. \_\_\_\_\_

**Domínguez Cruz, Vanessa Maritza.**

**Marín Gavilánez, Jordy Rafael**



**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE  
SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

**FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO  
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN CONTROL Y  
AUTOMATISMO.**

**AUTORIZACIÓN**

Nosotros, **Domínguez Cruz, Vanessa Maritza; Marín Gavilánez, Jordy Rafael**

Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil a la **publicación** en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación, **Modelado de un sistema de producción y envasado de gaseosas con redes de Petri, para la implementación en autómatas programables, utilizando una maqueta simplificada del proceso**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

**Guayaquil, a los 13 días del mes de septiembre del año 2017**

**LOS AUTORES:**

f. \_\_\_\_\_

**Domínguez Cruz, Vanessa Maritza.**

f. \_\_\_\_\_

**Marín Gavilánez, Jordy Rafael**

## REPORTE URKUND

### REVISIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN CON PROGRAMA URKUND CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN CONTROL Y AUTOMATISMO

**TÍTULO:** “Modelado de un sistema de producción y envasado de gaseosas con redes de Petri, para la implementación en autómatas programables, utilizando una maqueta simplificada del proceso”.

**AUTORES:** DOMÍNGUEZ CRUZ VANESSA MARITZA  
MARÍN GAVILÁNEZ JORDY RAFAEL

The screenshot displays the URKUND software interface. On the left, a metadata panel shows document details: 'Documento: Dominguez & Marin FINAL.docx (D30345553)', 'Presentado: 2017-09-02 15:24 (-05:00)', 'Presentado por: vanemdc@outlook.com', 'Recibido: eduardo.mendoza01.ucsg@analysis.urkund.com', and 'Mensaje: TESIS - DOMINGUEZ & MARIN. A yellow highlight indicates '1% de estas 52 páginas, se componen de texto presente en 1 fuentes.' The main window shows a table of sources with columns 'Lista de fuentes' and 'Bloques'. The table lists 'ALVARO PLUAS CENTURION TESI...', 'http://www.laccei.org/LACCEI20...', and a source with a '70%' match rate. Below the table, a toolbar includes 'Exportar' and 'Compartir' buttons. The bottom section shows a table of contents for the document, listing sections like 'PLC. 31 2.4.4. Lenguaje de los autómatas. 32' and 'CAPÍTULO 3: CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA DE PRODUCCIÓN Y ENVASADO DE GASEOSAS. 36'. A status bar at the bottom right shows '0 Advertencias.' and a 'Reiniciar' button.

Después de analizar el resultado enviado por el programa Urkund, se determinó que El trabajo de Titulación de los estudiantes: **DOMÍNGUEZ CRUZ VANESSA MARITZA** y **MARÍN GAVILÁNEZ JORDY RAFAEL**, observa un porcentaje inferior al 4% de coincidencias con otros documentos encontrados en el internet.

.....

**Mendoza Merchán, Eduardo Vicente**  
**DOCENTE TUTOR**

## AGRADECIMIENTO

En primer lugar, agradezco inmensamente al padre celestial, porque se perfectamente que sin Él no hubiese llegado hasta estas instancias, le agradezco por ser la luz y guía durante mi vida, sobre todo en el largo camino de mi carrera universitaria.

A mis padres, Rafael Marín y Mónica Gavilánez, mis pilares fundamentales, gracias por ser un ejemplo a seguir, gracias por darme la oportunidad de estudiar esta carrera, por siempre creer en mí, por enseñarme y demostrarme que aunque los días se tornen grises en ciertas ocasiones, siempre habrá una luz al final del túnel, gracias por el apoyo brindado durante este proceso de titulación, por los consejos y enseñanzas impartidas diariamente, por hacer el gran esfuerzo de enviarme a estudiar fuera de la ciudad. Gracias por tanto amados padres.

A mis abuelitos, símbolo de unión familiar, sin su apoyo no sería lo que hoy en día soy. Gracias por hablarme siempre como un padre habla a su hijo y darme cariño como solo los abuelos saben dar a sus nietos. Gracias porque a pesar de tener 22 años de edad nunca me dejaron de tratar como a un niño de 8 años, los amo.

A mis hermosas tías, Rosa Marín, Elizabeth Gavilánez y Yenny Marín, gracias por esa manera tan positiva de ver la vida, haciéndome saber y entender que en este mundo nada es perfecto y que no se acabará si tomamos decisiones erróneas, sino más bien, hay que levantarse y sonreírle a la vida. Gracias por su inmenso amor, demostrándome que en este mundo nunca estaré solo y que no tengo una sola madre sino varias.

A mi tío Walter Marín, por compartir los pocos días que pasaba en Babahoyo el almuerzo y actualizarme todo el campeonato nacional de fútbol, ya que debido a la tesis casi no estaba al tanto del mismo, a mis primos y a sus parejas, hermanos de diferentes padres, gracias por sus ocurrencias durante este periodo de titulación, dándome fuerzas para siempre seguir. A mis amistades de infancia (Fabri-Joel-Chris), que hoy en día aún prevalecen, gracias por hacer el papel de una verdadera familia.

A mi compañera de tesis, Vanessa Domínguez Cruz, amiga y pareja, pieza fundamental en mi vida, gracias por creer en la idea de realizar el trabajo de titulación juntos y sobre todo por creer en mí desde el primer momento que comenzó esta aventura. Gracias por el amor incondicional brindado en todo momento, por los consejos impartidos y por estar junto a mí cuando más lo necesitaba. A los padres de

familia de mi compañera, el Sr. Javier Domínguez y la Sra. Myrella Cruz, por abrirme las puertas de su hogar durante todo el proceso de titulación, sobre todo a la Sra. Myrella por consentirnos durante las largas noches de estudio.

De manera muy especial, a nuestro tutor de tesis, el Ing. Eduardo Mendoza Merchán, quien siempre estuvo dispuesto a ayudarnos y guiarnos durante estos duros meses finales de la carrera universitaria. Gracias por su infinita paciencia, por la confianza y dedicación.

*Jordy Rafael Marín Gavilánez*

## AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios y a la Virgen por guiar mi camino y permitirme llegar a esta anhelada meta, a mis padres por confiar en mí y darme apoyo incondicional. A mi segunda madre Maritza Álvarez que a lo lejos me cuida y siempre está atenta a mí dándome fuerzas en cada paso de mi vida, a mi tío abuelo German Aguiño, tu preocupación y tu dedicación como padre la llevaré siempre conmigo, a mi abuelita querida María Vallejo, gracias por tanto amor y por tanta ternura, a mi tía Georgina Villalta, siempre llevo conmigo todo el cariño que sientes por mí.

Gracias a mi gran amigo Marcos Zorrilla, gracias por tu apoyo, tu amistad, por tu ayuda y por tus consejos a lo largo de esta carrera, fuiste una guía y un ejemplo para mí.

A mi tutor de tesis Ing. Eduardo Mendoza muchas gracias por todos los conocimientos impartidos a lo largo de la carrera, gracias por guiarnos en esta etapa final, gracias por confiar en nosotros.

*Vanessa Maritza Domínguez Cruz*

## DEDICATORIA

*Este trabajo va dedicado a mis Padres:*

*Rafael Virgilio Marín Onofre y*

*Mónica Cecilia Gavilánez Peñafiel,*

*sin ellos nada de esto hubiese sido posible,*

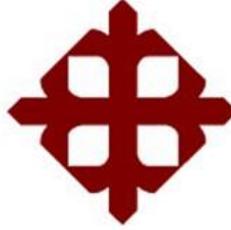
*esto es por y para ustedes.*

*Su hijo, Jordy Rafael Marín Gavilánez*

## DEDICATORIA

*A mis padres, Javier Domínguez y  
Myrella Cruz, las únicas  
personas imprescindibles en mi vida,  
esta primera meta es de ustedes.*

*Con cariño  
Su hija, Vanessa Maritza Domínguez Cruz*



**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE  
SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

**FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO  
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN CONTROL Y  
AUTOMATISMO.**

**TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN**

f. \_\_\_\_\_

**HERAS SÁNCHEZ, MIGUEL ARMANDO**  
DIRECTOR DE CARRERA

f. \_\_\_\_\_ **PALACIOS**

**MELLENDEZ, EDWIN FERNANDO**  
COORDINADOR DEL ÁREA

f. \_\_\_\_\_

**CORDOVA RIVADENEIRA, LUIS SILVIO**  
OPONENTE

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS.....	X
ÍNDICE DE TABLAS .....	XII
RESUMEN .....	XIII
ABSTRACT.....	XIV
INTRODUCCIÓN .....	1
CAPÍTULO 1: ASPECTOS GENERALES .....	3
1.1. Planteamiento del problema .....	3
1.2. Justificación .....	4
1.3. Delimitación.....	5
1.4. Objetivos .....	6
1.5. Hipótesis .....	7
1.6. Tipos de investigación y Metodología de Investigación.....	7
1.7. Diseño de investigación.....	8
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO .....	9
2.1. Estado del arte. ....	9
2.2. Automatización. ....	16
2.2.1. Antecedentes Históricos. ....	16
2.2.2. Fundamentos modernos de la Automática. ....	17
2.2.3. Conceptos básicos. ....	17
2.2.4. Componentes de la Automatización. ....	18
2.2.5. Clasificación de los sistemas de control según su tecnología. ....	19
2.2.5.1. Lógica Cableada. ....	20
2.2.5.2. Lógica Programada.....	20
2.3. Redes de Petri.....	21
2.3.1. Introducción a las redes de Petri.....	21
2.3.1.1. Definición.....	21
2.3.1.2. Elementos que conforman una red de Petri.....	21
2.3.1.3. Ventajas de una red de Petri .....	21
2.3.2. Marcado de una red de Petri .....	23
2.3.3. Propiedades de una red de Petri.....	24
2.3.4. Método de análisis de las propiedades de una red de Petri. ....	25
2.3.5. Tipos de redes elementales. ....	25
2.4. Automatas Programables.....	26
2.4.1. Introducción a los Controladores Lógicos Programables.....	26

.4.1.1. Historia .....	26
2.4.1.2. Definición.....	26
2.4.1.3. Elementos constitutivos de un PLC.....	27
2.4.1.4. Campos de aplicación.....	27
2.4.1.5. Ventajas y desventajas de un PLC.....	28
2.4.2.    Arquitectura del PLC.....	28
2.4.2.1.    Arquitectura externa de un PLC.....	28
2.4.2.2.    Arquitectura interna de un PLC.....	29
2.4.3.    Tipos de PLC.....	30
2.4.3.1.    PLC compacto .....	30
2.4.3.2.    PLC modular .....	30
2.4.3.3.    PLC de tipo montaje en rack.....	30
2.4.3.4.    PLC con panel operador (OPLC).....	31
2.4.3.5.    Otros tipos de PLC.....	31
2.4.4.    Lenguaje de los autómatas.....	31
2.4.4.1.    Diagrama de contactos o lógica de escalera.....	32
2.4.4.2.    Diagrama de funciones secuenciales.....	33
2.4.4.3.    Diagrama de bloques de funciones.....	33
2.4.4.4.    Texto estructurado.....	34
2.4.4.5.    Lista de instrucciones.....	34
<b>CAPÍTULO 3: CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA DE PRODUCCIÓN Y</b>	
<b>ENVASADO DE GASEOSAS.....</b>	<b>36</b>
3.1.    Consideraciones iniciales del sistema.....	36
3.1.1.    Descripción del sistema de producción y envasado de gaseosas.....	37
3.1.2.    Características del sistema de producción y envasado de gaseosas.....	41
3.1.3.    Funciones del sistema de producción y envasado de gaseosas.....	44
3.2.    Análisis de la planta de producción y envasado de gaseosas.....	44
3.2.1.    Análisis de la etapa de elaboración de gaseosa.....	45
3.2.2.    Análisis de la etapa de envasado de gaseosa.....	52
3.3.    Modelado del sistema de producción y envasado de gaseosa con redes de Petri.....	57
3.3.1.    Análisis obtenido a partir de la simulación mediante Visual Object net ++.....	60
3.3.1.1.    Conflictos que se observaron en el modelado del sistema.....	61
3.3.1.2.    Conflictos que pueden generarse al tener perturbaciones en el sistema.....	64
3.3.2.    Resolución de los conflictos del modelado del sistema simulados en Visual Object++.....	64
3.3.3.    Análisis para el modelado del sistema con redes de Petri.....	69

3.3.3.1.	Análisis mediante el método del árbol de cobertura del modelado de la etapa de jarabe simple. ....	71
3.3.4.	Validación del modelado del sistema de producción y envasado de gaseosa. ....	75
3.3.4.1.	Análisis mediante el método de invariantes del modelado del sistema de producción y envasado de gaseosas. ....	76
3.4.	Metodología utilizada para la generación de código Ladder para el autómata programable. ....	80
CAPÍTULO 4: PRESENTACIÓN DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN. ....		82
4.1.	Resultados del sistema de producción y envasado de gaseosas. ....	82
4.1.1.	Resultados referentes al estado del arte. ....	82
4.1.2.	Resultados del sistema: descripción, características y funciones. ....	83
4.1.3.	Resultados del análisis del modelado del sistema mediante diferentes métodos. ....	85
4.1.4.	Resultados de la validación del sistema. ....	85
4.1.5.	Resultados de la generación de código Ladder en la maqueta simplificada del proceso. ....	86
4.2.	Discusión de resultados ....	86
4.2.1.	Análisis de las características y funciones del sistema. ....	86
4.2.2.	Cumplimiento de los objetivos ....	87
4.2.2.1.	Objetivo general ....	87
4.2.2.2.	Objetivos específicos ....	88
4.2.3.	Análisis de la metodología ....	88
4.2.4.	Análisis de la hipótesis ....	89
4.2.5.	Análisis de la solución del problema. ....	89
4.3.	Discusión final. ....	89
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES. ....		91
5.1.	Conclusiones. ....	91
5.2.	Recomendaciones. ....	92
5.3.	Trabajo futuro. ....	93
BIBLIOGRAFÍAS. ....		95
ANEXOS ....		105

## ÍNDICE DE FIGURAS

### Capítulo 2:

Figura 2. 1: Modelo de un sistema de control. ....	19
Figura 2. 2: Clasificación tecnológica de la automatización.....	19
Figura 2. 3: Ejemplo de una red de Petri. ....	22
Figura 2. 4: Marcaje de una red de Petri.....	24
Figura 2. 5: Familia de controladores Allen Bradley.....	26
Figura 2. 6: Mapa conceptual de los elementos básicos de un PLC. ....	27
Figura 2. 7: Arquitectura básica de un PLC. ....	29
Figura 2. 8: Ejemplo de un diagrama utilizando lógica de escalera. ....	32
Figura 2. 9: Ejemplo de un diagrama de funciones secuenciales. ....	33
Figura 2. 10: Ejemplo de un diagrama de bloques funcionales. ....	34
Figura 2. 11: Ejemplo de un segmento del lenguaje texto estructurado.....	34
Figura 2. 12: Ejemplo de un segmento del lenguaje lista de instrucciones. ....	35

### Capítulo 3:

Figura 3. 1: Gráfico del sistema de producción y envasado de gaseosas. ....	38
Figura 3. 2: Diagrama de bloque de la etapa de producción de gaseosas. ....	40
Figura 3. 3: Diagrama de bloque de la etapa de llenado y tapado de botellas.....	41
Figura 3. 4: Diagrama del proceso de tratamiento de agua. ....	46
Figura 3. 5: Diagrama de flujo del proceso de tratamiento de agua.....	47
Figura 3. 6: Diagrama del proceso de elaboración de jarabe simple.....	48
Figura 3. 7: Diagrama de flujo del proceso de elaboración de jarabe simple.....	49
Figura 3. 8: Diagrama del proceso de elaboración de jarabe terminado. ....	50
Figura 3. 9: Diagrama de flujo del proceso de elaboración de jarabe terminado. ....	51
Figura 3. 10: Diagrama del proceso de elaboración de bebida terminada.....	52
Figura 3. 11: Diagrama de flujo del proceso de elaboración de bebida terminada.....	53
Figura 3. 12: Diagrama del proceso de lavado de botellas ....	54
Figura 3. 13: Diagrama de flujo del proceso de lavado de botellas. ....	55
Figura 3. 14: Diagrama del proceso de llenado y tapado de botellas.....	56
Figura 3. 15: Diagrama de flujo del proceso de llenado y tapado de botellas.....	56
Figura 3. 16: Modelado de la etapa de jarabe simple del sistema. ....	57
Figura 3. 17: Reciclado de una transición ....	59
Figura 3. 18: Unión en una transición. ....	60
Figura 3. 19: Modelado del sistema de producción y envasado de gaseosa.....	62
Figura 3. 20: Conflictos en las etapas de tratamiento agua y elaboración de jarabe simple...61	
Figura 3. 21: Conflictos en la etapa de lavado de botellas. ....	63
Figura 3. 22: Simulación del modelado de producción y envasado de gaseosa. ....	65
Figura 3. 23: Modelo corregido de la etapa de elaboración de jarabe simple del sistema.....	67
Figura 3. 24: Modelo corregido de la máquina mezcladora de jarabe simple del sistema. ....	68
Figura 3. 25: Modelado del sistema de producción y envasado de gaseosa corregido.....	70
Figura 3. 26: Modelado de la etapa de jarabe simple para análisis matemático.....	72
Figura 3. 27: Árbol de cobertura del modelado de la etapa de jarabe simple. ....	73
Figura 3. 28: Resultados del análisis de propiedades estructurales de la red de la etapa de jarabe simple. ....	75

Figura 3. 29: Resultados del análisis de propiedades estructurales de la red de producción y envasado de gaseosa.....	77
Figura 3. 30: Modelado del sistema de producción y envasado de gaseosa para análisis matemático.....	78
Figura 3. 31: Análisis invariante del modelado del sistema de producción y envasado de gaseosa.....	79
Figura 3. 32: Metodología utilizada para la generación de código Ladder para autómatas. ..	81

## ÍNDICE DE TABLAS

### Capítulo 2:

Tabla 2. 1: Elementos de una red de Petri. ....	22
---	----

### Capítulo 3:

Tabla 3. 1: Marcado del árbol de cobertura de la etapa de jarabe simple. ....	73
Tabla 3. 2: Propiedades Estructurales. Condiciones necesarias y suficientes. ....	76

## RESUMEN

En el presente trabajo de titulación se realiza la explicación del modelado de un sistema de producción y envasado de gaseosas realizado a través del formalismo matemático de las redes de Petri y representado mediante una maqueta simplificada, la cual, es realizada con elementos de electrónica convencional y un controlador lógico programable. Actualmente debido a los grandes avances que se han producido en el ámbito industrial, nacen los sistemas de eventos discretos concurrentes, cuyo modelamiento y análisis matemático se los realiza a través de herramientas con bases matemáticas sólidas, una de ellas son las redes de Petri. Para el desarrollo de la investigación se ha utilizado una metodología bibliográfica y analítica, que permitirá analizar de qué manera contribuyen las redes de Petri en aplicaciones de automatización industrial para lograr el modelado de sistemas de eventos discretos (SED) y algoritmos de control, que permita la simulación, validación y generación de código para autómatas programables en un sistema de producción y envasado de gaseosas. Con la obtención del análisis del modelamiento del sistema de producción y envasado de gaseosas se pudo comprobar que las redes de Petri son de mucha utilidad al momento de modelar sistemas de eventos discretos y que gracias al análisis de la red se pudo realizar de una manera sencilla y ordenada el lenguaje de programación Ladder destinada al autómata programable.

**Palabras claves:** Autómatas programables, redes de Petri, eventos discretos, envasado de gaseosa, SCADA, lenguaje ladder.

## ABSTRACT

This paper explains the development of modeling of a system of production and packaging of soda based on the use of mathematical formalism named Petri nets and represented by a simplified model, which is made with conventional electronics elements and a programmable Logic Controller. Nowadays, in response to the great advances that have occurred in the industrial field, appear the concurrent discrete event systems whose mathematical modeling and analysis is performed through tools with solid mathematical bases, one of which is the petri nets. For the development of this paper, a bibliographical and analytical methodology has been use to analyze how petri nets contribute in industrial automation applications and get the modeling of discrete event systems and control algorithms, that allows the simulation, validation and generation of code for programmable automates in a system of production and packaging of soda. With the analysis of the modeling of the system of production and packaging of soda, it was possible to verify that petri nets are very useful at the moment of modeling discrete event systems, and thanks to the analysis of the net, it was possible to perform in a simple and orderly way the ladder programming language for the programmable automates.

**Key words:** Automation, programmable automates, discrete events, Petri nets, packaging of soda, ladder language.

## INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años los grandes avances tecnológicos han alcanzado niveles de desarrollo inimaginables para algunas décadas atrás. Día a día, el ser humano siente motivación por indagar, investigar y realizar nuevos descubrimientos, dicha curiosidad ha representado un desarrollo enorme en todas las áreas tecnológicas existentes. Una de las áreas que ha presentado mayor nivel de mejoras significativas en los últimos años ha sido el área industrial, surgiendo nuevos sistemas dinámicos que realizan varias actividades y tareas a la vez, en donde la coordinación y sincronización de acciones es vital, aumentando su complejidad al momento de modelar y analizar el sistema, a estos nuevos sistemas se los denomina sistemas de eventos discretos.

Un sistema de eventos discretos posee características que lo definen como un sistema dinámico (Castellanos Arias & Solaque Guzmán, 2010), en el cual se integran todos los elementos que conforman a una industria para que trabajen en conjunto. Es en ese momento en donde, utilizar los métodos de modelamientos matemáticos clásicos no representan una herramienta adecuada debido a las limitaciones que posee al actuar sobre sistemas complejos. Debido a que los modelamientos matemáticos clásicos no permiten analizar sistemas discretos concurrentes, nace la necesidad de utilizar una herramienta formal matemática capaz de modelar, analizar y simular este tipo de sistemas.

Durante la realización del presente trabajo se pretende analizar la contribución de las redes de Petri, en aplicaciones de automatización industrial para el modelado de sistemas de eventos discretos y algoritmos de control, que permita la simulación, validación y generación de código para autómatas programables en un sistema de producción y envasado de gaseosas, el mismo que será implementado en una maqueta simplificada.

Actualmente existen varias herramientas que brindan la posibilidad de modelar las propiedades y la dinámica que poseen los sistemas de eventos discretos. Uno de los formalismos más utilizados para la representación, análisis y simulación de estos sistemas, son las redes de Petri, desarrolladas por Carl Adams Petri en el año 1960.

Una red de Petri es un lenguaje formal y gráfico con una sólida base matemática que permite realizar el modelado y análisis cuantitativo de distintos sistemas complejos realizando una descripción detallada y precisa del comportamiento del mismo, de esta manera se logra predecir y realizar mejoras en las rutas, así como sincronizar operaciones (Tadao Murata, 1989).

El punto de partida del trabajo investigativo es el desarrollo del sistema de producción y envasado de gaseosas a través de las redes de Petri, de esta manera se busca obtener la simulación y el análisis del funcionamiento del sistema para comprobar el cumplimiento de las propiedades por medio de los diferentes métodos de análisis de la red de Petri utilizando el software PIPE.

Se pudo observar que la dinámica del sistema presento un comportamiento sincronizado, reaccionando de manera inmediata ante las diferentes situaciones que puedan perturbar el sistema. En conclusión, la red de Petri es una herramienta muy útil al momento de modelar y analizar sistemas de eventos discretos concurrentes, en donde las herramientas clásicas no son de mucha utilidad, por lo tanto, conocer y aplicar este tipo de herramientas permitirá al estudiante enfrentar obstáculos tanto en la carrera universitaria como en su vida profesional.

## CAPÍTULO 1: ASPECTOS GENERALES

Los lineamientos definidos de este trabajo de titulación son expuestos en el presente capítulo, haciendo énfasis en el problema de investigación, los objetivos y el diseño metodológico de estudio.

### 1.1. Planteamiento del problema.

Para lograr entender la dinámica de un determinado proceso se recurre a realizar modelamientos matemáticos, con la finalidad de obtener un conjunto de funciones matemáticas que brinden la posibilidad de representar de una manera aproximada, el comportamiento del sistema. Al modelamiento matemático se lo considera como el principal punto de partida para el estudio de cualquier proceso industrial, dicho modelamiento se puede realizar por representación matemática (función de transferencia) y la representación gráfica (diagrama de bloques).

Debido al avance tecnológico y a la demanda productiva en el sector industrial diariamente se fija la necesidad de incrementar la productividad de la empresa, minimizando los costes de producción y mejorando la calidad de la misma, es ahí donde el modelamiento matemático clásico no es una herramienta adecuada debido a las limitaciones que posee al momento de actuar sobre sistemas complejos. Como es el caso de los sistemas de manufactura flexible, en donde el modelamiento matemático se torna dificultoso, debido a que se trata de sistemas que trabajan en conjunto, integrando todos los elementos que conforman a una industria.

Actualmente, los grandes avances que presenta la tecnología han permitido desarrollar distintas técnicas para modelar sistemas de eventos discretos concurrentes, llegando a cumplir con las necesidades que presenta una industria para poder funcionar de manera correcta y estable, mejorando la calidad de sus productos, disminuyendo el tiempo de fabricación del producto y minorizando los costes de producción. Para lograr aquello es necesario comprender totalmente la dinámica que rige al sistema, es en este punto donde el control clásico no puede aplicarse debido a la complejidad de los procesos, surgiendo la necesidad de modelar, analizar, diseñar, validar algoritmos, realizar pruebas y procedimientos de automatización para cumplir retos cada vez más

complejos, como la resolución de problemas de sincronización e interacción entre las máquinas automatizadas y evitar que se produzcan colisiones en el sistema.

Para alcanzar el análisis de sistemas industriales automatizados, el profesional o estudiante, debe de utilizar las distintas herramientas que permiten realizar la representación de modelos de sistemas de eventos discretos, tales como Gráfica de Transición de Estado, Redes de Petri, Gráfico Funcional de Etapa-Transición conocido como GRAFCET (Graphe Fonctionnel de Commande Etape Transition) por sus siglas en francés y Especificación de Sistemas de Eventos Discretos conocido como DEVS (Discrete Event System Specification) por sus siglas en inglés.

Con el paso del tiempo, los procesos industriales se vuelven cada vez más complejos y los sistemas de eventos discretos concurrentes aparecen con mayor frecuencia en el área industrial. Para lograr determinar el comportamiento dinámico de este tipo de sistemas, se propone utilizar la herramienta de redes de Petri, las cuales, en el ámbito industrial son utilizadas como método para el diseño tanto del proceso industrial como para el autómata programable, como lo expone (Murillo, 2008) en su artículo científico “Redes de Petri: Modelado e implementación de algoritmos para autómatas programables”.

## **1.2. Justificación.**

Se define a los sistemas de eventos discretos como sistemas dinámicos que poseen estados discretos, dichos estados solo se los consideran en determinados momentos, los mismos que están separados por intervalos de tiempo (Basilio, Carvalho, & Moreira, 2010). La manera en que se comporta un sistema de producción y envasado de gaseosas es capaz de ser modelado como un sistema de eventos discretos, donde las relaciones estado-evento son las que gobiernan a la evolución de sus estados en el espacio temporal.

La razón por la que se escogió a las redes de Petri como herramienta para modelar y analizar al sistema de producción y envasado de gaseosas es porque se las considera como un formalismo muy utilizado en los sistemas de eventos discretos. El uso de las redes de Petri se debe a que realiza una combinación entre un sólido fundamento matemático, representación gráfica y la capacidad de modelar procesos

paralelos y distribuidos. Las redes de Petri son una generalización de la teoría de autómatas y utilizan métodos gráficos para representar sistemas como condiciones y eventos. (T Murata, 1989).

Los modelamientos matemáticos o los controles clásicos no son herramientas adecuadas para modelar sistemas de eventos discretos concurrentes debido al grado de complejidad que poseen. En el presente trabajo investigativo se plantea modelar un sistema de producción y envasado de gaseosas, proceso que presenta características de un sistema de eventos discretos, por esta razón se utiliza como herramienta a las redes de Petri para lograr realizar el análisis del sistema propuesto y para generar el código en lenguaje Ladder utilizado por el autómata programable.

Para representar el funcionamiento dinámico del sistema, se elabora una maqueta simplificada del proceso, utilizando un controlador lógico programable, el mismo que será programado en lenguaje Ladder mediante el software RSLogix 500. Además de la programación del controlador lógico programable, se utilizará el software InTouch de Wonderware para realizar la interface hombre máquina, en donde se apreciará el mecanismo del proceso.

### **1.3. Delimitación.**

Generalmente las redes de Petri son utilizadas para el modelado de sistemas de eventos discretos (SED). Por ello, el presente trabajo demuestra las principales ventajas y características del uso de las redes de Petri en procesos industriales, con la finalidad de obtener algoritmos de control para la programación de autómatas programables a partir del modelado estudiado.

Para constatar el estudio representativo del uso de los modelados de procesos industriales con redes de Petri, se presenta un sistema producción y envasado de gaseosas en una maqueta simplificada, la cual presenta las siguientes características:

- a) Para el controlador del sistema se utiliza un controlador lógico programable MicroLogix 1100 de la compañía Allen Bradley.
- b) Los sensores y actuadores utilizados en el prototipo serán representados a través dispositivos indicadores que simulan el proceso de los mismos.

- c) Para el desarrollo de la programación del autómata programable se utiliza el software RSLogix 500 y para desarrollar la HMI se utiliza el software InTouch de Wonderware.

El prototipo del sistema simula un fragmento de los diversos procesos con los que el estudiante puede enfrentarse en la industria. Debido a ello, los fines del proyecto se dirigen a los estudiantes de la carrera Ingeniería Electrónica en control y automatismo, Ingeniería Eléctrica y la Ingeniería Eléctrico Mecánico, para que se relacionen con el estudio de las distintas herramientas que se pueden utilizar al momento de modelar un sistema de eventos discretos como las redes de Petri.

#### **1.4. Objetivos.**

##### **1.4.1. Objetivo General.**

Analizar la contribución de las redes de Petri, en aplicaciones de automatización industrial para el modelado de sistemas de eventos discretos y algoritmos de control, que permita la simulación, validación y generación de código para autómatas programables en un sistema de producción y envasado de gaseosas, el mismo que será implementado en una maqueta simplificada.

##### **1.4.2. Objetivos Específicos.**

- a) Analizar las principales características y ventajas que representa utilizar la herramienta de redes de Petri para el estudio y modelado de los diferentes procesos industriales, aplicando los diferentes métodos de análisis de propiedades dinámicas para verificar la veracidad del modelo planteado.
- b) Diseñar un prototipo simplificado del sistema de producción y envasado de gaseosas utilizando un autómata programable e indicadores leds que simulan el proceso, supervisado a través de una interfaz de usuario.
- c) Definir una metodología para la generación del código de programación en lenguaje Ladder para autómatas programables a partir del modelado en redes de Petri, aplicado a un sistema de producción y envasado de gaseosas.

### **1.5. Hipótesis.**

Se propone el modelado de un sistema de producción y envasado de gaseosas utilizando redes de Petri con la finalidad de obtener el algoritmo de control de dicho sistema. En la implementación del prototipo del sistema de producción y envasado de gaseosas se utiliza un autómata programable como controlador, además de los diferentes indicadores que intervienen en el proceso. Para la interacción con el usuario se utiliza el software InTouch de Wonderware, en el cual se desarrolla la HMI y al software RSLogix 500 se lo utiliza como entorno de desarrollo para la programación del autómata.

Para el presente proyecto se plantea la siguiente hipótesis: “Modelar sistemas de eventos concurrentes con redes de Petri que permitan obtener resultados en donde se evidencie la reducción de tiempo e incremento de la eficiencia en la generación de código Ladder para autómatas programables a partir del modelo planteado”.

### **1.6. Tipos de investigación y Metodología de Investigación.**

En el presente proyecto se realiza una investigación de tipo correlacional debido a que se enfoca en analizar el estudio de las redes de Petri en aplicaciones de automatización industrial para el modelado de sistemas de eventos discretos, ya que se considera que no existe la necesidad de crear un prototipo del sistema real para lograr obtener conclusiones relevantes.

Con la finalidad de comprobar las ventajas que se obtienen al usar el modelado de redes de Petri para procesos industriales, se realiza la presente investigación utilizando un enfoque cuantitativo. A pesar de ser un método gráfico el utilizado por las redes de Petri para el modelado, se respaldan en una sólida formulación matemática, que requieren el uso tanto de una investigación de tipo correlacional, como de enfoque cuantitativo. La finalidad de este trabajo es presentar un modelado bajo el estudio de redes de Petri que permita la simulación, validación y generación de código para autómatas programables en un sistema de producción y envasado de gaseosas.

La metodología utilizada es de tipo bibliográfico y analítico. La de tipo bibliográfico permite buscar de forma sistemática información acerca de las investigaciones ya existentes del tema que se está desarrollando, realizada de manera cuidadosa y sistematizada, mientras que la metodología de tipo analítico se la utilizo para realizar el estudio minucioso del modelado del sistema de producción y envasado de gaseosas en donde no solo se estudia el funcionamiento general del proceso, sino más bien, al proceso principal se lo divide en sub-procesos yendo de lo general a lo específico, obteniendo de esta manera resultados más concretos y específicos.

### **1.7. Diseño de investigación.**

Basado en los métodos de investigación seleccionados se desglosan las estrategias básicas que fueron empleadas para el modelado e implementación de un sistema de producción y envasado de gaseosas utilizando redes de Petri, para la generación de código Ladder en autómatas programables, utilizando entornos de desarrollo comerciales para la simulación y supervisión del proceso.

- a) Exponer cuales son las razones que llevaron a escoger el tema de investigación, estableciendo los logros que se desea alcanzar en el proyecto investigativo.
- b) Recopilar información acerca del tema de investigación desde libros, proyectos de investigación de distintos grados académicos, artículos científicos, revista científica, páginas de internet de carácter investigativas y educativas.
- c) Definir el proceso industrial al cual se va a modelar con la herramienta de redes de Petri en el trabajo de investigación.
- d) Desarrollar el modelado de redes de Petri con su respectiva validación y su algoritmo de control para definir el código de programación en lenguaje Ladder del proceso estudiado.
- e) Realizar la maqueta simplificada del sistema de producción y envasado de gaseosas.
- f) Comprobar el correcto funcionamiento del proceso.
- g) Determinar el análisis de resultados basado en el modelamiento de redes de Petri aplicado al sistema de producción y envasado de gaseosas.
- h) Redactar las conclusiones y recomendaciones obtenidas del análisis y discusión del estudio realizado.

## CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

El marco teórico que se desarrolla a continuación envuelve conceptos básicos y necesarios que proporcionarán al proceso investigativo una idea más acertada acerca del tema a tratar. Se inicia con una breve investigación del estado del arte, brindando un resumen de trabajos investigativos realizados previamente acerca de la situación actual del tema en el que se trabajará y, sobre todo, los últimos avances que se han obtenido.

### **2.1. Estado del arte.**

Los procesos automatizados cuyos modelados se los realizan utilizando redes de Petri se han convertido en un recurso válido en el ámbito industrial, por esta razón se ha considerado tomar en cuenta ciertos artículos relacionados con la temática del proyecto. A continuación, se expone un resumen acerca de trabajos investigativos realizados durante la última década con la finalidad de recopilar, compartir y establecer comparaciones con la mayor cantidad de información, ofreciendo diferentes posibilidades de comprensión acerca de la temática desarrollada.

De acuerdo a la investigación expuesta por (Chacón & Indriago, 2008) acerca del “Modelo y simulación de sistemas híbridos en procesos industriales” se propone la utilización de controladores lógicos programables para lograr la simulación de procesos industriales modelados con sistemas híbridos basados en el uso de supervisores de eventos discretos direccionados a redes de Petri. Los controladores lógicos programables son usuales para implementar supervisores de eventos discretos, de la misma manera los gráficos de función secuencial son de mucha importancia en el momento de cargar una red de Petri en un controlador lógico programable (PLC, siglas en ingles), pero debido a que no todos los controladores lógicos programables poseen gráficos de función secuencial para el uso de la red de Petri, se recurre a la utilización de diagrama escalera los cuales se asemejan a los diagramas elementales que se usan en los planos eléctricos. Se concluye que existe mucha facilidad al momento de implementar las redes de Petri tanto en los controladores lógicos programables como en las computadoras debido a la gran cantidad de herramientas que se puede encontrar para el análisis del sistema.

Según (Pina Benitez, Sicchar Vilchez, Sanz Perez, & Tamayo Pacheco, 2014) en su proyecto “Diseño de supervisorio inteligente de planta de bloque de construcción”, plantean el propósito de incrementar la productividad y calidad de la fabricación de bloques de construcción de la empresa de Santiago de Cuba, se diseña un supervisorio inteligente utilizando el modelado UML-PN (Lenguaje de modelamiento unificado) basado en metodología MaSE modificada (Metodología de desarrollo de Sistemas Multi-Agente), aplicando redes de Petri jerárquicas extendidas GHENeSys y la arquitectura DBI vinculada a microsistemas con inteligencia difusa colaborativa, con todo lo expuesto, se esquematiza las bases del presente estudio, para finalmente agregar los agentes inteligentes para las tareas ante fallos y mantenimiento preventivo que completaran el sistema supervisorio multiagente de la planta para las 4 secciones: Dosificación, prensado, transporte-curado y empaquetado. Al independizar la toma de decisiones de la experiencia, destreza y agudeza de cada operador en la valoración de los factores existentes, y a su vez se adiciona al diseño la concurrencia con funciones de tolerancia a fallos y mantenimiento preventivo de cada sección de la empresa, se logra elevar la calidad y productividad de la fábrica cumpliendo a cabalidad el objetivo planteado.

Conforme lo expone (Pérez Robles, 2010) determina lo siguiente: Con la finalidad de presentar la teoría de SED (Sistemas de Eventos Discretos) y su aplicación dentro de la TCS (Sistema de Control de Tradición), aplica estos fundamentos para resolver problemas de aplicación industrial y en un rompecabezas. En lo industrial, se realiza el estudio bajo los fundamentos de la teoría SED implementando el marco Ramadge – Wonham, como herramienta de diseño se aplica para la implementación de los supervisores sintetizados se presenta grandes rasgos del lenguaje de programación GRAFCET en un PLC, por lo cual se logró obtener una mejora bastante notoria en los procesos industriales. Por otro lado, al resolver el rompecabezas “cruzar el río” se modela el comportamiento de cada uno de los componentes del sistema representando 9 autómatas bajo la aplicación de la TCS sobre los SED, de esta manera se obtuvo la especificación del supervisor monolítico óptico. Para ambos tipos de estudios se aplicaron la teoría de SED y su aplicación dentro de la TCS resaltando las ventajas que resalta al emplearlas en los diversos sistemas.

Con el objetivo de maximizar la producción de pozos de crudo pesado y extra pesado (Ramírez & Colina, 2014) con el tema “Sistema supervisor inteligente para procesos de producción de petróleo”. La arquitectura del sistema de supervisión se divide en el nivel de control y el nivel de supervisión. En el nivel de control, la metodología considera la implementación de modelos difusos basado en datos de entrada y salida estableciendo una serie de restricciones que garanticen el cálculo de la inversa para la obtención de controladores. En el nivel de supervisión se presenta un módulo de detección y diagnóstico de fallas de los sensores de cada lazo de control regulatorio, detector de eventos para la captura de eventos relacionados con cambio de alguna variable que afecte al proceso, el sistema de toma de decisión que se encarga de ajustar la consigna de operación. Con el diseño del sistema supervisor inteligente y con el módulo de detección y de diagnóstico de fallas se alcanza a detectar a tiempo cualquier variable del proceso que afecte a la cantidad y a la calidad del mismo, de tal manera que garantiza una operación continua en el proceso.

En el trabajo “Diseño e implementación de un sistema de control y monitoreo basado en HMI-PLC para un pozo de agua potable” perteneciente a (Quezada Quezada, Flores García, Bautista López, & Quezada Aguilar, 2014) se basa en diseñar un sistema de control y monitoreo de descarga de agua potable en un pozo en un banco de pruebas, usando un equipo especializado para la automatización. En la actualidad, las HMI (interfaces hombre-máquina) que son normalmente ejecutadas en un computador, son utilizadas para demostrar la manera en que los procesos se comportan, así los operadores son capaces de supervisar de manera virtual a los equipos desde las interfaces gráficas de usuario. El control supervisorio y adquisición de datos está conformado por la integración HMI-PLC, mostrando al PLC como sistema de control de proceso, a la HMI como el monitor del mismo que incluye a las GUI diseñadas, al conjunto integrado HMI-PLC como el sistema de control y monitoreo del pozo de agua potable. Como conclusión se obtiene que las tecnologías que actualmente se utilizan con mayor demanda son para automatizar procesos continuos los cuales requieren un control con PLC como también la manipulación y monitoreo de variables en tiempo real a través de HMI.

Según (Cervantes Canales, 2005) en su trabajo realizado acerca de “Representación y aprendizaje de conocimiento con redes de Petri difusas” expone las

bases acerca de las redes de Petri (RdP), indicando que son un instrumento tanto gráfico como matemático de modelado que sirve para describir de manera formal los sistemas en donde la dinámica se basa en concurrencia, sincronización, exclusión mutua y conflictos. Todas las bases estudiadas en el documento acerca de las RdP, Redes Neuronales y Lógica Difusa son para cumplir el objetivo de lograr la representación de conocimiento y razonamiento con RdP difusas donde las reglas Si- Entonces son el formalismo más utilizado, conocidas también como reglas difusas. Se permite utilizar un modelo de RdP para poder representar las reglas de producción, siendo un grafo dirigido bipartido la representación gráfica de una RdP, los nodos, lugares y transiciones representan que variable define el estado del sistema y a sus transformaciones, los lugares son representados por círculos mientras que las transiciones por barras. En el documento mediante los ejemplos propuestos se puede concluir que existe diferencia de efectividad entre un modelo de algoritmo que otro, siendo el algoritmo backpropagation el más efectivo.

En el artículo científico “Modelado y control de una celda automatizada de manufactura flexible basado en redes de Petri” expuesto por (Foyo Valdés, Puga Velázquez, & Hernández Martínez, 2010). Se plantea como objetivo obtener una solución al problema que aparece en las redes de Petri al implementarlo en sistemas dinámicos de eventos discretos, teniendo como ejemplo a las celdas automatizadas de manufactura flexibles. El proyecto recurre a los sistemas automatizados de manufactura flexible (FMS, siglas en ingles) en donde sus componentes son: almacén hexagonal giratorio, centro de maquinado vertical (VMC, siglas en ingles) de CNC y robot transportador gantry, controlados a través de los PLC Siemens S7-200 en forma local y S7-300 en función de enlace maestro. En los resultados se verifica la integración y configuración de varios elementos de sistema tomando en cuenta la propuesta descrita en este trabajo concluyendo que este se puede extrapolarse en sistemas de manufactura con mayor grado de dificultad.

Un proyecto didáctico y completo de automatización industrial que se debe recalcar, es el de (Arias Toapanta, 2013) en su proyecto “Diseño e implementación de un módulo didáctico en automatización industrial aplicando buses de campo para la Empresa Ecuainsetec”, el cual se diseñó con la finalidad de promover la iniciativa de que los profesionales que pertenecen a la empresa Ecuainsetec tomen el curso en

automatización industrial y se inclinen por optimizar procesos y recursos en el área de trabajo, beneficiando a la empresa con el aumento de ventas y aumentando la confiabilidad de la capacitación. El módulo de entrenamiento utiliza equipos industriales de áreas como: neumática, electroneumática, sensores industriales e instrumentación con las variables más utilizadas en el campo: presión, nivel, caudal y temperatura. Para la programación del PLC se utilizó el software CoDeSys, en el cual se muestran los diferentes lenguajes de programación para PLC'. Para el SCADA se utilizó el software InTouch y Pantallas HMI, y finalmente, la comunicación con el PLC se la enlazó con el uso del bus de campo Ethernet.

Gracias al aporte realizado por (Solís Quisiyupanqui & Carpera Del Pozo, 2010), acerca de “Prototipo de un selector automático de materiales y colores” se logra entender que dicho trabajo tiene como finalidad encontrar una solución al alto precio y a la pérdida de tiempo de producción en el proceso de distribución y selección de materiales. Dicho proyecto se enfoca en la utilización de sensores ópticos e inductivos para realizar la detección de materiales, los mismos que al reconocer el tipo de material y color envían una señal al PLC, causando la activación de un actuador neumático para que se encargue de la selección y distribución del material. De la programación se encarga el PLC, cerebro del sistema ensamblado, el mismo que realiza el control automático de todas las fases del proceso, se utiliza el lenguaje de programación “Lista de instrucciones”, configurando antes los módulos tanto de entrada como de salida para que el PLC logre reconocer el programa que una vez terminado se lo descarga desde una PC. El proceso permite concluir que se elimina parcial o totalmente la intervención del ser humano, así como la notable reducción de los gastos de mano de obra, además se obtiene una velocidad de selección y clasificación de 491 materiales por hora, lo que es igual a la reducción de personal de 4 operarios a 1.

Los autores (Velasco Delgado, Perez Sandoval, & Flores Marulanda, 2014), en su trabajo “Diseño y construcción de una estación de clasificación automática con visión de máquina” dan a conocer no solo el diseño y la construcción, sino también la caracterización de un sistema de tipo automático para la clasificación de un producto incorporando la visión de máquina. A este diseño se le incluye lo que es la tecnología Free and Open Source Software, así como los equipos Allen Bradley. Para la clasificación de productos con visión de máquina realiza el diseño e implementación

de una aplicación de visión de máquina, este software posee la capacidad de clasificar objetos de hasta dos clases en uno de cuatro tipos preestablecidos. La adecuación de la banda para lograr eficiencia al momento de transportar el producto es el inicio, seguido por la adquisición de imágenes mediante una cámara que trabaja en conjunto con un sensor y por último la comunicación del PLC quien es el que se encargara de ordenar acciones de tipo física. Luego de realizar pruebas de funcionamiento con botellas y pieza de PVC, se logra comprobar que la clasificación del producto funciona de manera correcta, llegando a 0.20s el tiempo de procesamiento en visión para una pieza de PVC.

En la trabajo titulado “Redes de Petri: Modelado e implementación de algoritmos para autómatas programables” realizada por los autores (Murillo, 2008), trata acerca del uso de las redes de Petri al momento de realizar el modelado y la implementación de algoritmos de control en PLC. Existen diversas opiniones acerca del tema teniendo algo en común, que para diseñar algoritmos de control en el PLC es necesario que haya varias metodologías, lo negativo de estas metodologías es la gran cantidad de variantes que sufren las redes de Petri dificultando la adecuada selección de la red de Petri específica. Buscando una solución a esta problemática, algunos fabricantes europeos han estandarizando un solo método para el diseño en los controladores secuenciales, realizándolo bajo el estándar IEC 848. Las redes de Petri han sido de mucha utilidad en las ultimas 4 décadas, especialmente en el modelado de los sistemas complejos. El trabajo se centra en familiarizar y brindarle una visión tanto panorámica como cronológica de las redes de Petri asociadas con los PLC para poder lograr el diseño e implementación de algoritmos de control para los PLC.

Los autores (Castellanos Arias & Solaque Guzmán, 2010), en su artículo acerca del “Modelado con redes de Petri e implementación con GRAFCET de un sistema de manufactura flexible con procesos concurrentes y recursos compartidos”. El objetivo del trabajo es identificar la dinámica de los sistemas de manufactura flexible en asociación con una red de Petri, además de encontrar la secuencia óptima de funcionamiento del sistema. Para lograrlo se procede a realizar un modelo matemático, el mismo que permite estimar el vector de tiempo que se acumula en un proceso modelado a través de una red de Petri, formando parte de la base para encontrar la secuencia más efectiva del sistema modelado. Como paso final, se implementó en un

laboratorio de automatización la simulación del funcionamiento de un sistema de manufactura flexible modelado mediante un montaje electro hidroneumático controlado con GRAFCET a través un PLC. Como resultado se obtuvo que la secuencia SD4 es la mejor opción para un sistema hipotético basado en el criterio de tiempo mínimo de producción.

En la tesis presentada por (Trigos Martínez, 2016), acerca de “Las redes de Petri interpretadas en el diagnóstico de fallos de sistemas híbridos. Aplicación a un helicóptero no tripulado” se basa en garantizar la seguridad y fiabilidad de los distintos procesos industriales, comenzando con el diseño y construcción del modelo y diagnosticador los cuales se encargan de la detección de fallos definitivos y añadiéndole una dinámica de tiempo para la detección de fallos intermitentes. Como banco de pruebas para la implementación de la herramienta de diagnósticos de fallos se tomó en cuenta dos procesos industriales, el primero un HVCA (Calefacción, Ventilación y Aire Acondicionado), mientras que el segundo se centró en un proceso de envasado de líquidos. Se tomó como ejemplo de sistema a un helicóptero no tripulado, en donde la seguridad es una verdadera problemática. Con la división de sistemas en subsistemas, el procedimiento inicia, para después añadir en el sistema completo una red de Petri diagnosticadora global mostrando las variables críticas al operador determinando la salud del helicóptero no tripulado. Como resultado se obtuvo que la red de Petri diagnosticadora no solo capta los fallos permanentes sino también intermitentes, dando un grupo de alarmas de la salud de la aeronave al piloto.

Según (Mosquera Arce & Vivas Montoya, 2007), en la tesis titulada “Aplicación de las redes de Petri al control de un ascensor automático” mediante el uso de las redes de Petri junto a autómatas programables se pretende diseñar un sistema de control automático aplicado a un ascensor, estableciendo el comportamiento que se desea lograr en el ascensor tomando en cuenta modelos reales y la seguridad que brinda el mismo. Se diseñó un sistema de control utilizando redes de Petri, la misma que se simuló para determinar si funcionaba de manera deseada, una vez diseñado el sistema de control, se codificó la red de Petri en un lenguaje en el que los autómatas programables puedan acoplarse. El sistema diseñado se compone de cuatro niveles con pulsadores en la parte interior que sirven para solicitar el ascensor a un determinado piso, se realiza la codificación necesaria para que el sistema funcione, mientras que la

programación del PLC se centra en la codificación de la red de Petri la misma que está dividida en tres partes. Como conclusión se obtiene que las redes de Petri brindan un sistema dinámico y gráfico para los diseños de distintos sistemas y procesos, además de permitir una rápida solución a problemas imprevistos sin tener que realizar considerables reestructuraciones en la red.

## **2.2. Automatización.**

Durante los últimos años las ingenierías han sobresalido de manera muy notable aportando en el desarrollo industrial y fortaleciendo a las ciencias modernas. Uno de los campos con mayor éxito en su desarrollo ha sido la automatización, logrando integrar campos del control automático industrial, los sistemas de control, la instrumentación industrial, el control de procesos y las redes de comunicación industrial (H. Páez Logreira, Zabala Campo, & Zamora Musa, 2015), alcanzando de esta manera crear procesos o dispositivos capaces de reaccionar frente a situaciones de manera eficaz y autónoma.

### **2.2.1. Antecedentes Históricos.**

A lo largo de la historia, el ser humano gracias a su ingenio ha fabricado máquinas que simulan alguna acción que realiza el cuerpo humano. En el antiguo Egipto, sus habitantes unificaron brazos mecánicos a las estatuas de sus dioses, dichos brazos eran manejados por sacerdotes, quienes aseguraban que los movimientos eran realizados por los mismos dioses, tiempo más tarde los egipcios fabricaron estatuas que eran manejadas con sistemas hidráulicos, usados para asombrar a los adoradores de dioses.

En el transcurso del siglo XVI y XVII una gran cantidad de juguetes mecánicos fueron fabricados, aquellos muñecos ya poseían características de robots. Fue en 1805, cuando Henri Maillardert fabricó una muñeca mecánica que tenía la capacidad tanto de escribir como de dibujar. Esta muñeca funcionaba con un conjunto de levas que se usaban como el programa para la muñeca en el procedimiento de realizar la escritura. Durante la revolución industrial se realizaron una gran cantidad de invenciones mecánicas, muchas de las cuales se dirigían al sector textil, como por ejemplo la

hiladora giratoria creada por Hargreaves en el año 1770 o la hiladora mecánica creada por Croptom en el año 1779. (Ordaz Cassá, 2005).

Gracias a los desarrollos en la electricidad y electrónica, nuevos autómatas salieron a la luz, en donde sus capacidades mejoraron notablemente, siendo capaces de repetir acciones y funciones intelectuales. Hoy en día podemos visualizar que en el mundo industrial la automatización juega un papel muy importante en su desarrollo, optimizando, multiplicando y mejorando la calidad de los productos. (García Moreno, 2001).

### **2.2.2. Fundamentos modernos de la Automática.**

En 1775 surge la máquina de vapor de simple efecto construida por James Watt, dando nacimiento a la era moderna de la automatización. En 1784 la máquina de doble efecto se basaba en dos automatismos, el primer automatismo se encargaba de distribuir de vapor, mientras que el segundo automatismo regulaba las bolas, las mismas que mantenían una velocidad de árbol de salida constante.

Actualmente se define a la automática como la ciencia y la técnica de la automatización, que junta a un grupo de teorías y tecnologías para formar parte de la concepción, construcción y el empleo de los sistemas automáticos. El campo de la automatización abarca un gran abanico de posibilidades, hoy en día el término automatización no solo se refiere a un campo en específico, dentro de los automatismos se puede contar con los automatismos secuenciales, los servosistemas, los sistemas adaptivos y los sistemas de autoaprendizaje. (García Moreno, 2001).

### **2.2.3. Conceptos básicos.**

El concepto de automatización hace referencia a la agrupación de un dispositivo electrónico que es el responsable de controlar el funcionamiento de una máquina o proceso (García Moreno, 2001). Un sistema al cual se agrega un dispositivo, denominado automatismo, tiene la capacidad de reaccionar frente a cualquier situación que surja trabajando en la función del control para el cual ha sido implementado. La automatización consta de un sistema compuesto por:

- a) Proceso o máquina que se desea controlar.
- b) La unidad de control, cuya función es la de realizar acciones que se necesiten para mantener el control.
- c) Actuadores.

La automatización en conjunto con los elementos mencionados, recopila información necesaria por los captadores, la misma información es utilizada por la unidad de control. De acuerdo a la información que llega a la unidad de control, se realizan variaciones en el estado o en el proceso. Los actuadores se encargan de realizar cambios físicos en el proceso, todo esto es gracias a la unidad de control que se encarga de generar ordenes hacia los actuadores. (Pértiga, 2016).

#### **2.2.4. Componentes de la Automatización.**

Según (Orozco Gutiérrez, Guarnizo Lemus, & Holguín Londoño, 2008) en su libro “Automatismos Industriales”, expresan que tener el control de un proceso o sistema sin la necesidad de que un operario participe directamente sobre dispositivos o elementos de salida es el principal objetivo del automatismo. El operario únicamente está en la facultad de participar sobre las variables de control debido a que el automatismo tiene el deber de actuar sobre las salidas a través de los accionamientos con la finalidad de tener el control total del proceso o de la planta.

En su estructura un automatismo está compuesto por dos partes totalmente diferentes denominadas:

- a) Parte operativa. - Está conformada por un grupo de dispositivos, máquinas y subprocesos, los cuales tienen como finalidad cumplir funciones de producción específicas, por lo general esta parte operativa tiene una gran cantidad de elementos de potencia.
- b) Parte de control. - Se encuentra conformada por dos grupos, los elementos de procesamiento y/o mando, interfaces de comunicación y de diálogo con el hombre.

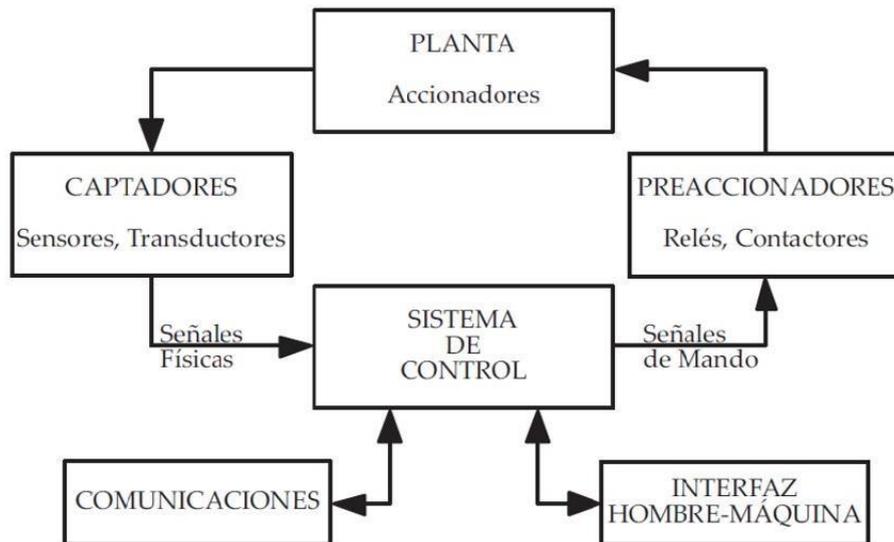


Figura 2. 1: Modelo de un sistema de control.

Fuente: (Orozco Gutiérrez, Guarnizo Lemus, & Holguín Londoño, 2008).

### 2.2.5. Clasificación de los sistemas de control según su tecnología.

La tecnología a lo largo del tiempo ha dado grandes pasos en su desarrollo, los controladores de la automatización han seguido de la mano al gran avance tecnológico, la clasificación tecnológica de lo automatización se puede dividir en dos grupos: lógica cableada y lógica programada. (García Moreno, 2001).

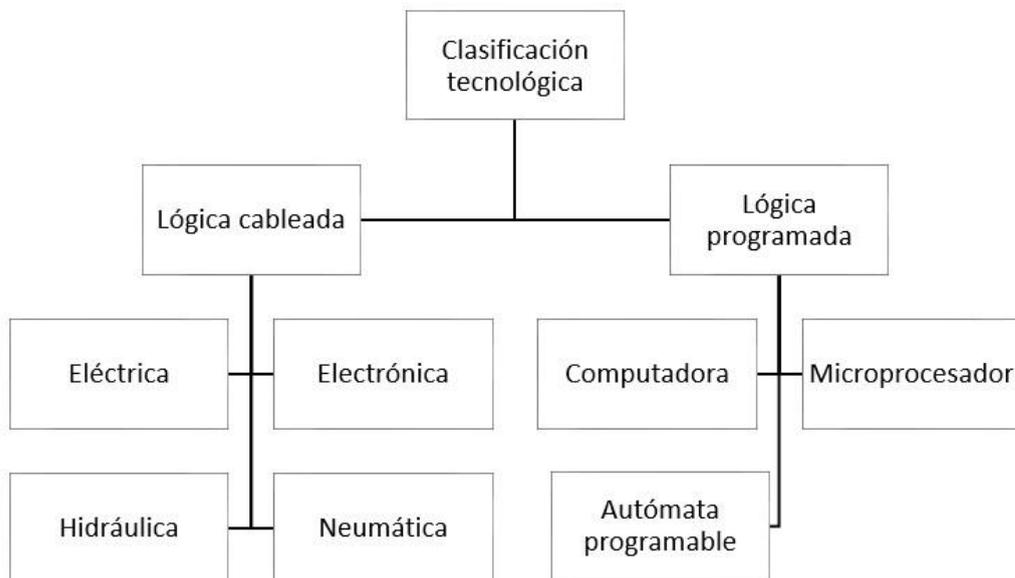


Figura 2. 2: Clasificación tecnológica de la automatización.

Fuente: (García Moreno, 2001).

Elaborado por: Autores.

### **2.2.5.1. Lógica Cableada.**

El nombre de lógica cableada hace referencia a la forma que caracteriza a las conexiones que se utiliza para conectar los diferentes elementos individuales que forman parte del sistema. Las conexiones se realizan de acuerdo al origen de los elementos, si se trata de elementos que poseen origen eléctrico, las conexiones se efectuarán a través de relés, interruptores, finales de carrera, etc. Si se trabaja con elementos electrónicos, lo que se utilizará para las conexiones será compuertas lógicas.

Las tecnologías mencionadas utilizan el mando de tipo “Todo o Nada”, las mismas que tienen la capacidad de ser modeladas a través del álgebra de Boole y se las conoce como sistemas de conmutación, esta tecnología todo o nada es igual a la binaria en la cual utilizan uno o cero. Normalmente la lógica cableada posee un gran grado de aceptación por los desarrolladores de automatismos al momento de crear sistemas con poca complejidad, pero no es recomendable utilizar este tipo de tecnología en sistemas que presentan grandes dificultades (Orozco Gutiérrez, Guarnizo Lemus, & Holguín Londoño, 2008).

### **2.2.5.2. Lógica Programada.**

Su tecnología se basa en el nacimiento del microprocesador y de los sistemas programables que se acoplan a este. Debido a los avances que ha alcanzado la microelectrónica a través del tiempo, el abanico de esta tecnología disminuye y frente a la lógica cableada presenta:

- a) Gran capacidad de flexibilidad.
- b) Arquitecturas de control distribuidos.
- c) Posibilidad de realizar cálculos científicos.
- d) Comunicación y gestión.

Uno de los inconvenientes que presenta la lógica programada en corto y largo plazo es la que necesita de un personal calificado para realizar la programación y asistencia, debido a que son herramientas totalmente informáticas. Otro de los inconvenientes es la vulnerabilidad que presenta frente a las condiciones violentas propias de las industrias, aunque cabe recalcar que son temas que han presentado

mejoras significativas. ((García Moreno, 2001);(Orozco Gutiérrez, Guarnizo Lemus, & Holguín Londoño, 2008)).

## **2.3. Redes de Petri**

### **2.3.1. Introducción a las redes de Petri**

#### **2.3.1.1. Definición**

Las Redes de Petri fueron introducidas por Carl Adam Petri en 1962. Su éxito se basa en la simplicidad de su mecanismo básico. Se lo considera como un término agrupador por el cual se designa un amplio número de modelos de sistemas, procedimientos, técnicas y patrones descriptivos, relacionados todos entre si, basados en el mismo principio específico. Esta herramienta de modelado de sistemas secuenciales discretos y concurrentes, permite la identificación de los aspectos básicos de los sistemas distribuidos tanto conceptual como matemáticamente, además permiten visualizar el comportamiento dinámico de un sistema con simulación gráfica. ((Sanz, 2013); (R. & H., 1992); (Granda, 2012)).

#### **2.3.1.2. Elementos que conforman una red de Petri**

Las redes de Petri son una herramienta de modelado de sistemas secuenciales concurrentes y discretos, mediante una simulación gráfica permiten visualizar el comportamiento dinámico de un sistema, se establece como un grafo formados por lugares o plazas que determinan las acciones, transiciones para llevar el sistema de un lugar a otro y arcos orientados que unen lugares con transiciones o viceversa, donde las fichas en los lugares se denominan marcas o tokens y determinan el estado del sistema. A continuación, se presenta la tabla donde se puede observar la representación gráfica y la descripción de los elementos que conforman una red de Petri. (Sanz, 2013).

#### **2.3.1.3. Ventajas de una red de Petri**

Conforme lo expone (Vergara Diaz, 2014) las redes de Petri pueden ser usadas para visualizar una comunicación similar a diagramas en bloques y redes y diagramas de flujo. Los tokens son utilizados para simular las actividades dinámicas y la concurrencia de los sistemas.

Tabla 2. 1: Elementos de una red de Petri.

Elementos	Detalle	Gráfico
Lugares	Los lugares o plazas representan un lugar que será utilizado dentro del sistema. Se representan por una letra p, corresponderá a espacio fijo dentro del sistema por ejemplo un almacenamiento, estación, máquina, etc. Las plazas también representan los posibles estados dentro del sistema.	P 
Transiciones	Las transiciones permiten relacionar 2 plazas, se los denomina como los eventos que producen cambios en los estados. Se representan por la letra T.	T 
Arcos	Un arco une un lugar con una transición, o viceversa e indica la dirección de la secuencia de eventos. Los arcos de igual dirección son representados con un solo arco etiquetado con el número n.	
Marca o Tokens	Nos permiten visualizar el estado del sistema, son representadas por un punto dentro de un lugar o plaza. Son números naturales o puntos colocados dentro de los lugares o plazas.	P 
		P 

Elaborado por: Autores.

Fuente: (Recalde, Silva, Ezpeleta, & Teruel, 2004).

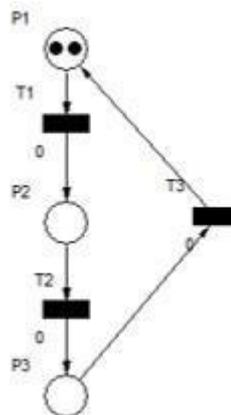


Figura 2. 3: Ejemplo de una red de Petri.

Fuente: (Recalde, Silva, Ezpeleta, & Teruel, 2004).

Elaborado por: Autores.

Entre otras ventajas, presentamos las siguientes:

- a) Permite utilizar modelos matemáticos que gobiernen el comportamiento del sistema.
- b) Son útiles en el diseño de sistemas de hardware y software, para simulación y diseño de diversos problemas de ingeniería.
- c) Pueden considerarse como autómatas formales o generadores de lenguajes formales y tienen asociación con la teoría de grafos.
- d) Son excelentes para representar procesos concurrentes, también puede representar procesos donde pueden existir restricciones sobre la concurrencia, precedencia o frecuencia de esas ocurrencias.
- e) Los autómatas pueden ser representados por una red de Petri y viceversa, debido a que existen herramientas informáticas que facilitan esta área.

### 2.3.2. Marcado de una red de Petri

De acuerdo a ((Murillo, 2008); (T Murata, 1989)) El estado de una red se lo denomina como marcado y está definido por el número de tokens que existen en cada lugar o plaza, se denota por:

$$M = \{ \tau_1, \tau_2, \tau_3, \dots, \tau_n \}$$

Una definición de Red de Petri es:  $P = (P, T, F, W, M_0)$ . Donde:

$P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$  es un conjunto finido de lugares.

$T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$  es un conjunto finito de transiciones.

$F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$  es un conjunto de arcos dirigidos.

$W: F \rightarrow \{1,2,3, \dots\}$  es una función de pesos de los arcos.

$M_0: P \rightarrow \{1,2,3, \dots\}$  es el marcado inicial de la red.

$P \cap T = \emptyset$   $P \cup T \neq \emptyset$ .

Cada marcación corresponde a un estado en la red, y la dinámica de la red da lugar a una nueva marcación. Para la figura el marcaje de la red es:  $(0,3,1,1,0,0)$ .

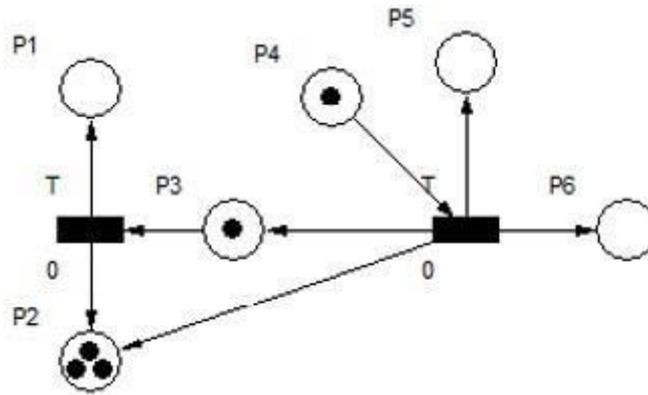


Figura 2. 4: Marcaje de una red de Petri.  
Fuente: (Murillo, 2008).  
Elaborado por: Autores.

### 2.3.3. Propiedades de una red de Petri

Las redes de Petri como herramienta de modelado gráfico y matemático tienen dos tipos de propiedades generales: las dependientes del marcado inicial llamadas propiedades funcionales y las independientes del marcado inicial llamadas propiedades estructurales. (T Murata, 1989).

De acuerdo a (T Murata, 1989) las propiedades funcionales, son aquellas que reflejan el comportamiento dinámico del sistema y son las siguientes:

- a) Limitación. - Los sistemas de control no pueden tener un comportamiento ilimitado en la mayoría de sus elementos por las propias limitaciones físicas del sistema, específicamente la capacidad de almacenes o recursos compartidos.(Sanz, 2013).
- b) Vivacidad. - Permite la navegación entre estados, si generalizamos esta capacidad a todo el sistema se puede detectar partes de la red que detienen su funcionamiento.
- c) Reversibilidad y estado particular. - La red tiene que garantizar su repetitividad, debido a que el trabajo de todo sistema de control es cíclico y también tiene que garantizar que su comportamiento no sea aleatorio.
- d) Persistencia. - Una red de Petri es persistente si para cualquiera de las transiciones habilitadas, el disparo de una transición no deshabilitaría a la otra transición.(Murillo, 2008).
- e) Alcanzabilidad. - A partir de un estado inicial se requiere que la red avance automáticamente hasta un estado dado, si no tiene esa capacidad, no podrá ejecutar el comportamiento deseado.

Otras propiedades funcionales de la redes de Petri de acuerdo a lo expuesto por (Murillo, 2008) son las siguientes:

- a) Cobertura. - Un marcado  $M$  dentro de una Red de Petri en un conjunto de marcados cubiertos o contenidos.
- b) Distancia sincrónica. – Es una métrica asociada al grado de dependencia mutua entre dos eventos en un sistema condición/ evento.

Por otro lado, las propiedades estructurales se las define como aquellas que son inherentes a la estructura de la red de Petri y estas son: Vivacidad estructural, controlabilidad, limitación estructural, conservabilidad, repetitividad, consistencia, invariante  $S$  y  $T$  (de transición y lugar) y por último tenemos disparabilidad limitada estructural. (T Murata, 1989).

#### **2.3.4. Método de análisis de las propiedades de una red de Petri.**

Para el desarrollo del análisis de las propiedades existen varios métodos, el método del árbol de cobertura, este árbol es llamado árbol de alcanzabilidad para redes acotadas y para redes no acotadas resulta un árbol de marcados infinito, por otro lado tenemos el de acercamiento por ecuación matricial, se obtiene un análisis de forma analítica, y el análisis de técnicas de reducción permite la reducción de sistemas complejos en sistemas más simples de menos lugares y transiciones denominada subred o “macro” el cual mantiene las propiedades originales de la red que le dio origen. ((Murillo, 2008); (Desel & Esparza, 1995)).

#### **2.3.5. Tipos de redes elementales.**

Los tipos de redes se diferencian por la forma en que son marcadas las redes (cantidad de tokens) y por la adición de elementos auxiliares. Las redes clásicas incluyen los sistemas condición/evento (C/E–systems) y las redes lugar/transición (P/T-nets), las extensiones derivadas de ellas son las no temporizadas, P o T temporizada, estocásticas, uso de arcos habilitadores e inhabilitadores. Por último, las redes de alto nivel abarcan las redes Predicado/evento (P/E-nets, redes coloreadas y redes relacionadas. ((Granda, 2012);(Controlled Discrete Event Systems, 1997)).

## 2.4. Autómatas Programables.

La posibilidad de manejar procesos complejos se ha logrado gracias al gran avance tecnológico que se ha conseguido, estableciendo controles más precisos manipulando las variables que se dan lugar en la naturaleza. Dentro de los dispositivos que permiten dicho control se tiene al Controlador Lógico Programable, mejor conocido como PLC (Programmable Logic Controller) por sus siglas en inglés, el mismo que se los emplea tanto en controles simples como en complejos.

### 2.4.1. Introducción a los Controladores Lógicos Programables.

#### 2.4.1.1. Historia.

La invención del PLC fue centrada en las necesidades que poseía en ese entonces la industria automotriz, en sus inicios las empresas solo los utilizaban para reemplazar la difícil y costosa lógica cableada y no fue hasta 1968 en donde GM Hydramatic (División de Transmisiones Automáticas de General Motors) envió una petición en la cual proponía que la lógica cableada fuese sustituida totalmente, siendo la propuesta de Bedford Associates la ganadora, la misma que se basó en la creación de un Controlador Modular Digital (MODICON) siendo así el nacimiento del primer PLC. (Morales Ruíz & Gavilánes Carrion, 2013).

#### 2.4.1.2. Definición.

El PLC es un dispositivo que llegó a la industria para reemplazar los circuitos secuenciales de relés que se usaban para controlar máquinas. Estos dispositivos son utilizados en distintas aplicaciones que tienen mucho que ver con los trabajos cotidianos, usar un PLC envuelve a operaciones de maquinado, ensamblaje automatizado, manejo de materiales y en la mayor parte de tareas que involucren movimientos repetitivos. (Ramírez Cortés, 2001).



Figura 2. 5: Familia de controladores Allen Bradley.

Fuente: (Rockwell Automation, 2008).

### 2.4.1.3. Elementos constitutivos de un PLC.

Los autómatas programables están compuestos por una serie de elementos que juntos se encargan de realizar las diversas tareas que el operario solicite. En la figura 2 se detallan los componentes básicos que componen a un controlador lógico programable.

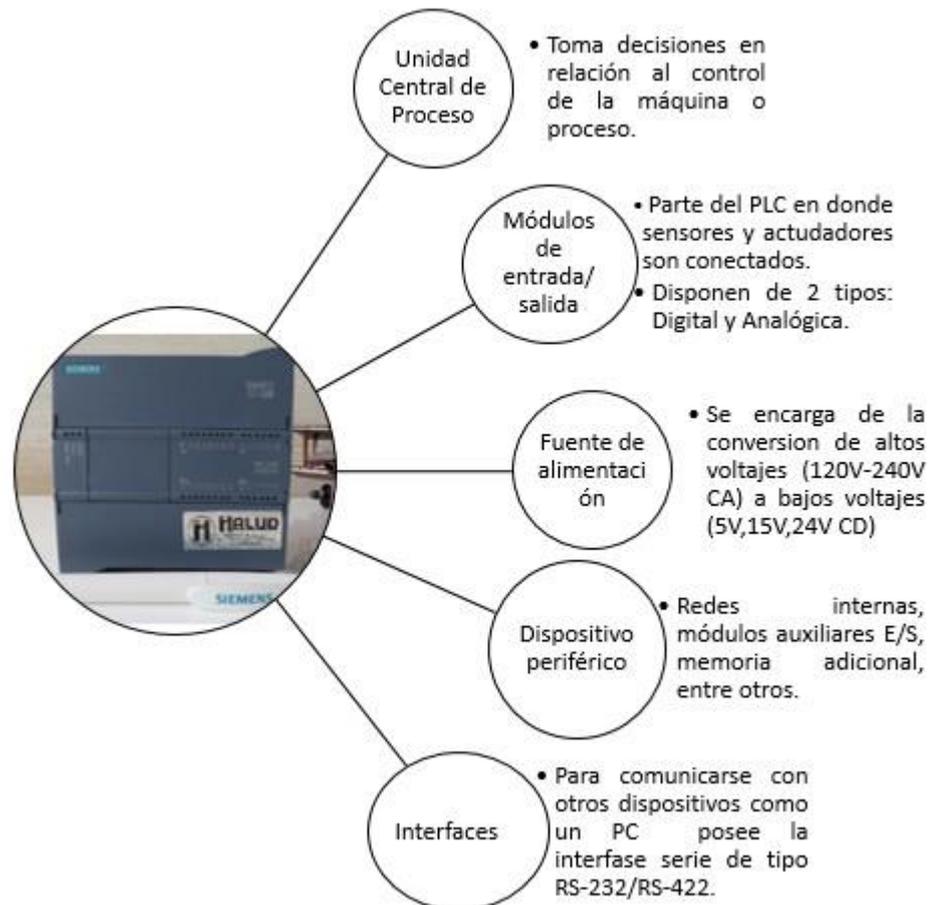


Figura 2. 6: Mapa conceptual de los elementos básicos de un PLC.

Elaborado por: Autores.

Fuente: ((Vallejo D, 2005); (Maza Cabello, 2009)).

### 2.4.1.4. Campos de aplicación

Gracias al gran número de cualidades con respecto al diseño de un PLC, su campo de aplicación es muy amplio y su amplitud va estrechamente relacionado con el continuo desarrollo tanto de hardware como de software, lo cual permite que se cumplan los requerimientos exigidos en procesos reales. Su principal uso se da en aquellos lugares en donde urge la necesidad de control, señalización y maniobra, debido a esto su campo engloba desde procesos de fabricación industrial sin importar el tipo hasta transformaciones industriales, tomando en cuenta sus pequeñas dimensiones, lo que le permite al PLC formar parte de procesos de producción

periódicamente cambiantes o secuenciales, así como también aplicar en maquinaria industrial de plástico, embalajes, instalaciones de seguridad, señalización, control, entre otros campos. ((Automación Micromecánica S.A.I.C, 2009); (Palma Pozo & Sangopanta Ardila, 2011); (Aguilera Martínez, 2002)).

#### **2.4.1.5. Ventajas y desventajas de un PLC.**

De acuerdo a lo expuesto por (Pinatoja Ilbay & Cushquicullma Colcha, 2013) cada autómatas programable posee sus propias cualidades y características, por esta razón no todos los autómatas brindan las mismas ventajas acerca de la lógica cableada.

Entre las ventajas generales que proporciona un PCL están:

- a) Mayor precisión en el control.
- b) Respuestas más rápidas.
- c) Flexibilidad en el control de procesos industriales.
- d) Consumo mínimo de energía.
- e) Un solo PLC es capaz de gobernar distintos actuadores a la vez.

Entre las desventajas que presenta un PLC se puede mencionar:

- a) Requiere de una mano de obra especializada.
- b) Para tareas sencillas el costo es muy elevado utilizando PLC.
- c) Centraliza el proceso.
- d) Carece de un lenguaje estándar o universal de programación.

#### **2.4.2. Arquitectura del PLC.**

Al hablar acerca de la arquitectura del PLC, se hace referencia a las partes que lo componen. Según (Aguilera Martínez, 2002) los autómatas programables cuentan con diferentes componentes, los cuales se dividen en estructuras externas e internas.

##### **2.4.2.1. Arquitectura externa de un PLC.**

Los PLC externamente están conformadas por los siguientes elementos:

- a) Carcasa. - Es el bloque en donde se encuentran insertados los elementos.
- b) Módulo. - El módulo del PLC se clasifica de acuerdo a la procedencia del mismo. En caso de la estructura americana se separa las E/S del autómatas, mientras que en la estructura europea los módulos pertenecen a una función como lo es la fuente de alimentación, CPU, E/S, etc.

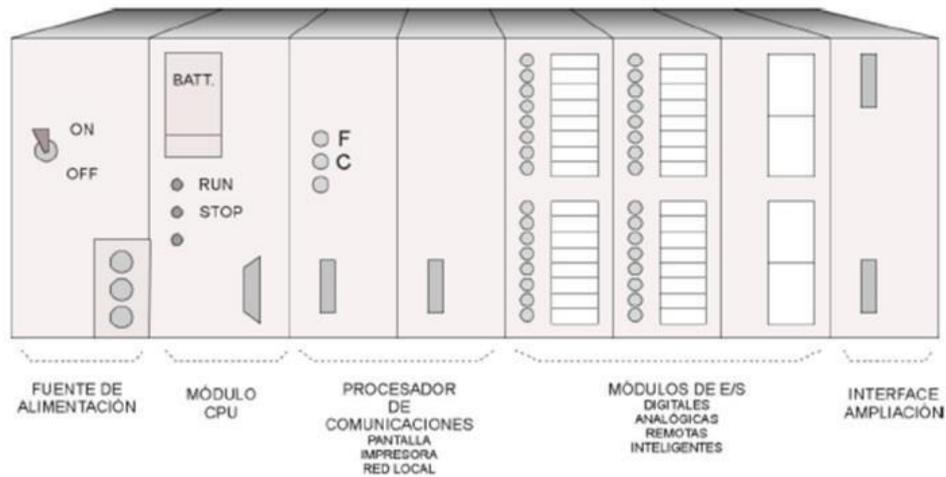


Figura 2. 7: Arquitectura básica de un PLC.  
Fuente: (F. Torres & Jara, 2011).

- c) Fuente de alimentación. - Por lo general los PLC cuentan con dos diferentes tipos de alimentación independiente: alimentación del PLC y la alimentación destinadas a las entradas y a las salidas.

#### 2.4.2.2. Arquitectura interna de un PLC.

Internamente los PLC están compuestos por:

- Sección de entradas. - son aquellas líneas de entrada, las mismas que se dividen tanto en entradas digitales como entradas analógicas. Para los dos tipos de entradas se tiene rangos de tensión propios. En esta sección es donde van conectados los sensores.
- Sección de salidas. - Es aquella serie de líneas de salida que así mismo como la sección de entrada pueden clasificarse en digitales o analógicas. Aquí van conectados los actuadores.
- Unidad central de proceso (CPU). - Su función es la de procesar el programa que realiza el usuario, el CPU cuenta con distintas zonas de memoria, instrucciones de programa y registros.
- Memoria del controlador. - Se pueden dividir en dos grandes grupos, la parte de la memoria del controlador que se encarga de los datos del proceso y la que se encarga de los datos de control. El primer tipo de datos hace referencia a las señales de planta, entradas, salidas, a las variables internas, y a los datos alfanuméricos, mientras que los datos de control se encargan de la parte de memoria que se dividen en programa del usuario y la configuración del PLC.

### **2.4.3. Tipos de PLC.**

Existe una extensa cantidad y variedad de autómatas programables en la actualidad, según lo expuesto por (UNED, 2011), el PLC se clasifica en distintas categorías citadas en la siguiente sección.

#### **2.4.3.1. PLC compacto**

Se los denomina de esa manera ya que este tipo de autómatas incorpora CPU, PS, módulos de entrada y salida en un mismo segmento. Normalmente el número de E/S digitales es fijo, no sobrepasan los 30 puertos, así mismo posee uno o dos canales que le sirven de comunicación para la programación del PLC y se caracteriza por tener un HMI. También cuenta con una entrada en la cual se puede acoplar un contador de alta velocidad y dos de E/S analógicas. Generalmente este tipo de PLC es utilizado como reemplazo de los relés.

#### **2.4.3.2. PLC modular**

Una gran diferencia entre el PLC modular y el PLC compacto es la capacidad superior de potencia que posee el de tipo modular, además de poseer una mayor cantidad de funciones. Normalmente la CPU, CP y otros módulos están en paquetes separados en un riel DIN. Otra característica del PLC modular es que pueden utilizar sin problemas una gran cantidad de E/S, soportan programas más grandes y tienen la capacidad de operar bajo el modo multitarea. Son usados para el control, regulación, posicionamiento, manipulación etc.

#### **2.4.3.3. PLC de tipo montaje en rack.**

Muy similares al PLC modular en cuanto a capacidad y funciones, lo que hace diferente al PLC de tipo montaje en rack es la diferencia que hay en el rack en donde se colocan los módulos de PLC. Este tipo de rack contiene ranuras para los distintos módulos y un sistema de bus integrado que sirve para la comunicación entre los módulos. La mayor ventaja de este equipo es la rapidez al momento de intercambiar datos e información entre los módulos, además de disminuir el tiempo de reacción por parte de los módulos.

#### **2.4.3.4. PLC con panel operador (OPLC).**

Su principal característica de este tipo de PLC es que posee una interfaz HMI que consiste en una pantalla táctil y un monitor, el monitor se caracteriza por tener la posibilidad de ser adaptado tanto a tipo texto como a tipo gráfico.

#### **2.4.3.5. Otros tipos de PLC.**

Debido a la gran cantidad de PLC existente en el mundo industrial actual, se hace extensa su clasificación por lo que estos tipos de PLC se los han agrupado por características distintas a las ya mencionadas:

- a) PLC con ordenador industrial. - Aquellos que unifican en un mismo sistema un PC normal con un PLC. La parte del PLC se basa tanto en hardware como en software, mientras que los ordenadores poseen una gran cantidad de aplicaciones en la automatización, una de las funciones más importantes de estos potentes ordenadores es la de recopilar una gran cantidad de datos e intercambiarlos con el OPC.
- b) PLC de tipo de ranura. - Este PLC se basa en una tarjeta especial, cuyas funciones son las mismas que cualquier CPU o PLC normal. Además, el PLC en su ranura de tarjeta posee al menos un canal de comunicación en donde se conectan con el bus de campo tanto entradas como salidas remotas.
- c) PLC de tipo software. - es un PLC virtual que se instala en un ordenador. Para la comunicación con las máquinas hace uso de los puertos de comunicación del PC, ya sea Ethernet o COM, o unas tarjetas especiales de tipo bus del sistema. Su principal desventaja es la falta de memoria individual al momento de guardar datos de los distintos procesos. Además, no existe la garantía de que otras aplicaciones como las HMI puedan trabajar simultáneamente con el PLC virtual sin tener problemas.

#### **2.4.4. Lenguaje de los autómatas.**

Según los autores ((Medina, 2008); (UNED, 2011); (Automación Micromecánica S.A.I.C, 2009); (DELTA, 2009); (Jiménez, 2003)) coinciden en las ideas relacionadas con los lenguajes que utiliza el PLC. El lenguaje de los autómatas hace referencia a un lenguaje formal necesario para lograr la comunicación entre el

usuario y el PLC, el usuario puede ser tanto un programador como un operario del proceso al cual se encuentre anexo el PLC. El objetivo fundamental de los lenguajes de programación es expresar los distintos procesos que pueden ser realizados tanto por máquinas como ordenadores. Debido al gran número de lenguajes que los fabricantes de PLC han desarrollado ha sido necesario una estandarización y no fue hasta agosto de 1992 donde se alcanzó el estándar internacional bajo la dirección del IEC 1131-3 (IEC 65). Se ha definido cinco lenguajes de programación con la finalidad de cubrir el amplio abanico de aplicaciones que se presentan al momento de programar el PLC:

- a) Diagrama de contactos o Lógica de Escalera (LAD).
- b) Diagrama de funciones secuenciales o GRAFCET
- c) Diagrama de bloques de funciones (FBD).
- d) Texto estructurado (ST).
- e) Lista de instrucciones (IL o STL).

#### 2.4.4.1. Diagrama de contactos o lógica de escalera.

Se caracteriza por ser un lenguaje gráfico, el mismo que puede ser soportado por casi todos los tipos de PLC existentes. Se basa en conexiones gráficas entre variables de tipo booleano, teniendo mucha similitud con los controladores de tipo relé antiguos, en donde el flujo de energía era representado en diagramas de circuitos eléctricos.

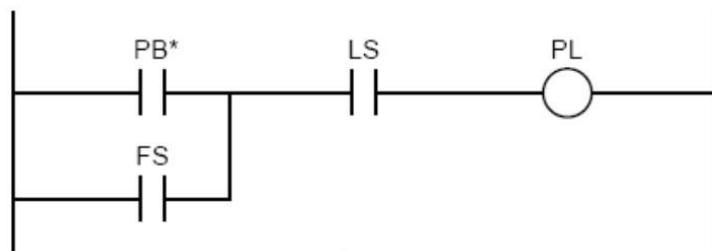


Figura 2. 8: Ejemplo de un diagrama utilizando lógica de escalera.  
Fuente: (Jiménez, 2003).

Su principal característica es la utilización de barras de alimentación, elementos de enlace y estados. Permite al usuario usar contactos, bobinas y bloques de funciones. Es de simple estructuración, los buses engloban a una red LD tanto a la derecha como a la izquierda. El bus del lado izquierdo se encarga de dispersar energía a todos los elementos que se encuentren conectados, y estos dependiendo de la

condición en que se encuentren interrumpen o permiten el paso del flujo de energía hasta los siguientes elementos. Con el transcurso del tiempo este tipo de lenguaje ha ido evolucionando y hoy en día se es capaz de añadir instrucciones cada vez más poderosas a las simples operaciones de relé, como la inclusión de bloques de información, el mismo que permite que el lenguaje de escalera básica aumente su potencia. (Automación Micromecánica S.A.I.C, 2009).

#### 2.4.4.2. Diagrama de funciones secuenciales.

Se trata de un lenguaje gráfico que permite al usuario representar el programa y describir sistemas de automatismos secuenciales en forma de diagramas. Son programas muy bien estructurados teniendo como elementos básicos a las etapas, las acciones y las transiciones. Un diagrama de función secuencial está conformado por un conjunto de etapas las cuales se representan mediante rectángulos, mientras que las transiciones están representadas por líneas verticales las cuales se usan para la conexión de las etapas. Este lenguaje en STEP 7 se lo conoce como lenguaje gráfico estructurado de programación (S7-GRAPH). (UNED, 2011).

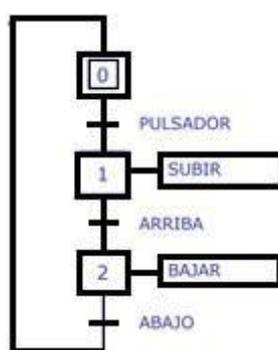


Figura 2. 9: Ejemplo de un diagrama de funciones secuenciales.  
Fuente: (González, 2004).

#### 2.4.4.3. Diagrama de bloques de funciones.

Según el trabajo expuesto por (H. D. Páez Logreira, Zamora Musa, & Bohórquez Pérez, 2015) el diagrama de bloques de funciones es muy esencial al momento de programar un PLC, poseen la posibilidad de ser invocados desde el programa principal OB. Con la finalidad de que los datos sean utilizados posteriormente en el programa principal, dichos datos se guardan en espacios de memoria denominados DB. Los diagramas de bloques constan de un parámetro que se lo conoce como STATIC, el mismo que actúa en el momento que se llama a un FB, generando una instancia DB la cual acompaña a la llamada del FB.

Resulta conveniente el uso de diagramas de bloques de funciones al momento de realizar el control y la programación de algún proceso industrial. Están definidos por el estándar internacional IEC 6199, desarrollado en conjunto con el estándar IEC 61131-3 el cual define los aspectos de los FB.

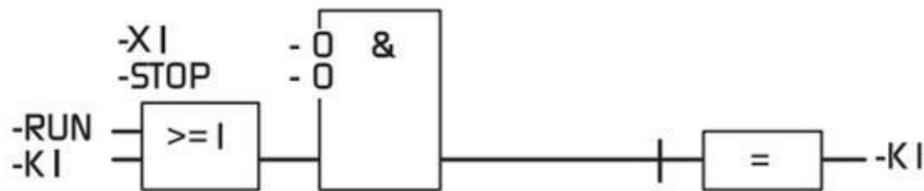


Figura 2. 10: Ejemplo de un diagrama de bloques funcionales.  
Fuente: (Torres Zambrano, 2005).

#### 2.4.4.4. Texto estructurado.

Pertenece al grupo de lenguajes de alto nivel conformado por bloques que tiene sintaxis similar a la de pascal. El texto estructurado es capaz de emplearse para ejecutar de manera veloz sentencias complejas, las cuales puede ser de distinto tipo de datos e incluso es capaz de manejar valores tanto analógicos como digitales. Entre las ventajas del texto estructurado se puede mencionar que soporta tanto ciclos de iteración como ejecuciones condicionales. ((Aguilera Martínez, 2002);(Bradley & Software, 2008)).

```
IF ( BotonPartir OR Motor ) AND NOT BotonParar THEN
    Motor := TRUE;
ELSE
    Motor := FALSE;
END_IF;
```

Figura 2. 11: Ejemplo de un segmento del lenguaje texto estructurado.  
Fuente: (Aguirre Paredes, 2016).

#### 2.4.4.5. Lista de instrucciones.

Pertenece al grupo de lenguajes de bajo nivel. En este tipo de lenguaje se permite una sola operación por línea, se lo recomienda utilizar cuando se realizan aplicaciones básicas. Está conformado por una serie de instrucciones de diferentes tipos que son escritas en forma de secuencias de instrucciones booleanas. ((Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, 2008); (Aguilera Martínez, 2002)).

AN	-XI
AN	-STOP
(	
A	-RUN
O	-KI
)	
=	-KI

Figura 2. 12: Ejemplo de un segmento del lenguaje lista de instrucciones.  
Fuente: (Torres Zambrano, 2005).

## **CAPÍTULO 3: CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA DE PRODUCCIÓN Y ENVASADO DE GASEOSAS.**

Este capítulo está orientado a caracterizar, modelar, diseñar y validar un sistema para la producción y envasado de gaseosas utilizando el modelado con redes de Petri. En primera instancia se describe el funcionamiento del sistema, para lo cual se procede a dividir el sistema en tres etapas: producción de gaseosas, lavado de botellas y llenado de botellas. Se procede a realizar un análisis de cada uno de los sub-procesos que conforman cada etapa y se realiza la verificación y validación del modelo.

### **3.1. Consideraciones iniciales del sistema.**

En el ámbito industrial, la automatización de sistemas o procesos productivos son una necesidad, puesto que en la actualidad la calidad, el costo y el tiempo de fabricación del producto son aspectos fundamentales para captar y mantener el mercado, por lo cual la optimización de recursos y el aumento de la productividad son necesidades prioritarias de las empresas.

El proceso que se ha seleccionado como base para el presente trabajo investigativo es el modelado y validación de un sistema de producción y envasado de gaseosas, cuya finalidad es la de automatizar la planta, para ello se recurre al modelado con redes de Petri. En los siguientes párrafos se describe el sistema en su totalidad, considerando varios aspectos generales en la descripción del proceso.

En la industria de producción de gaseosas, el sistema de producción y envasado contiene un número de sub-procesos mayor a los que se va a describir en el presente trabajo investigativo, esto se debe a que la finalidad de la investigación no es la de estudiar con rigurosidad la planta del sistema de producción y envasado de gaseosas, más bien, el objetivo es demostrar las ventajas que se presentan al momento de modelar sistemas con redes de Petri utilizando el método de análisis matemático y gráfico. Para ello se ha simplificado algunos sub-procesos de la planta, sin perder la secuencia original del proceso en estado real.

### **3.1.1. Descripción del sistema de producción y envasado de gaseosas.**

Para inicializar la descripción del sistema, se cree necesario listar las materias primas que intervienen en este proceso, cada uno de los productos que forman parte de la materia prima utilizadas en esta planta pasan por un proceso de mezclado y filtrado hasta obtener el producto final que es la gaseosa. La materia prima utilizada en este sistema de producción y envasado de gaseosas es: (a) Agua tratada, (b) Azúcar, (c) Concentrados, y (d) Gas carbónico.

Cada uno de los productos mencionados conforman a dos grandes procesos de la planta de producción: la parte de producción de gaseosas y la parte de envasado de la misma. Estas dos etapas de procesos están compuestas por operaciones específicas. La parte de producción de gaseosas es la encargada de realizar el tratamiento respectivo del líquido efectuando las correctas mezclas de ingredientes (materia prima) para su presentación final. La segunda parte del proceso que es la del envasado de gaseosas tiene como función el lavado, llenado y tapado de botellas de gaseosas, como se puede observar en la figura, en donde se presenta la imagen de la planta realizada en el software Wonderware InTouch-10. Para realizar el gráfico del sistema se consideró almacenamientos al finalizar cada etapa de mezclado, bombas al final de cada almacenamiento asumiendo es necesaria aplicar presión en esa parte del sistema.

Para describir el funcionamiento del sistema, las máquinas que forman parte del proceso, los sensores y actuadores utilizados en cada sub-proceso de la planta de producción, se divide el sistema de producción de gaseosas en 3 etapas:

- Etapa de producción de gaseosas.
- Etapa de lavado de botellas.
- Etapa de llenado de botellas.

Para cada etapa se presentan los diagramas de bloques representados en las figuras 3.2 y 3.3 respectivamente. Para la descripción del funcionamiento del sistema de producción y envasado de gaseosas, se clasificó y ordenó la información recopilada de los siguientes autores: ((Embonor S.A, 2013); (Rojas Lujan, 2002); (Merino Peña & Moscoso Coello, 2007)).

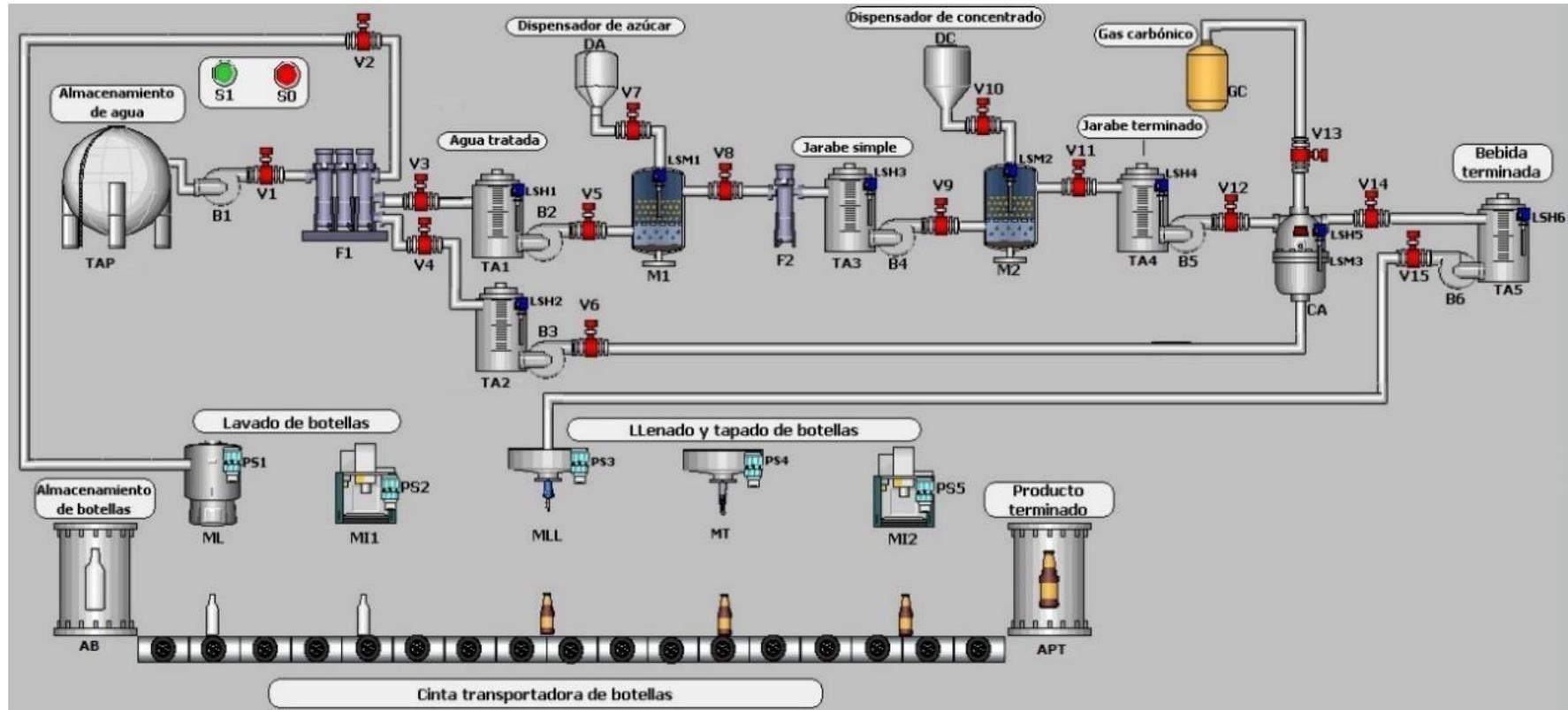


Figura 3. 1: Gráfico del sistema de producción y envasado de gaseosas.

Elaborado por: Autores.

Fuente: ((Embonor S.A, 2013);(Rojas Lujan, 2002);(Merino Peña & Moscoso Coello, 2007).

a) Etapa de producción de gaseosas.

El paso para inicializar la etapa de producción de gaseosas, es el tratamiento de agua. El tratamiento del agua consiste en tres tipos de filtros: filtro de arena, filtro de carbón activado y filtro pulidor. El proceso de filtración permite la desinfección del agua quedando como resultado el agua libre de microorganismo, sabores extraños y contaminantes químicos.

El segundo paso es la elaboración de jarabe simple, el cual consiste en mezclar el agua tratada con edulcorantes nutritivos como es el azúcar en medidas exactas. Al mezclar el agua tratada con el azúcar se producen impurezas, por tal motivo se procede a filtrar el jarabe simple a baja presión.

El tercer paso es la elaboración del jarabe terminado, en donde se dosifican el agua tratada y el jarabe terminado en proporciones adecuadas, posteriormente son mezclados. Por medio de una bomba, la mezcla es impulsada al carbonatador, en donde el líquido cae sobre una bandeja distribuidora, la cual tiene pequeñas perforaciones en línea con las placas de enfriamiento. Por estos orificios, la bebida se escurre en forma de una delgada lámina que desciende por las placas de enfriamiento en una atmósfera de gas carbónico, el mismo que es absorbido a medida que va perdiendo calor hasta depositarse en la parte inferior del estanque carbonatador.

Debido al efecto de la presión a la que es sometida, la bebida terminada sale por una cañería en dirección a la máquina llenadora. Se muestra el diagrama de bloque correspondiente a esta etapa del sistema en la figura 3.2.

b) Etapa de lavado de botellas.

Desde el tanque de suministro de agua llega el líquido que es utilizado por la máquina lavadora de botellas, esta es una máquina automática por inyección de una solución cáustica que limpia las botellas y las enjuaga a presión con agua para obtener una botella limpia y estéril.

La botella lavada es trasladada hacia una máquina de inspección, en donde cada botella que sale de la lavadora es revisada por dicha máquina para asegurarse que esté en perfectas condiciones para ser llenadas.

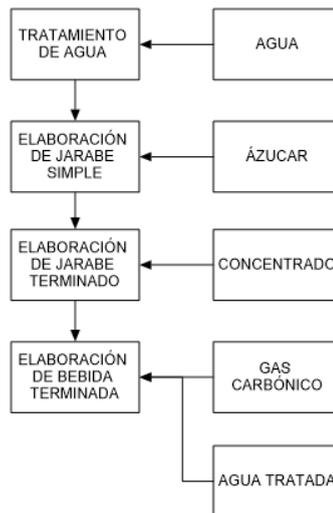


Figura 3. 2: Diagrama de bloque de la etapa de producción de gaseosas.

Elaborado por: Autores.

Fuente: ((Embonor S.A, 2013); (Merino Peña & Moscoso Coello, 2007)).

c) Etapa de llenado de botellas.

En esta etapa, el envase es presurizado a la misma presión de la llenadora, el cual se encuentra bajo presión del gas carbónico, por medio de gravedad, una vez que se alcanza el equilibrio de presiones entre la llenadora y el interior de envases, la bebida es transferida hasta el interior del envase.

Inmediatamente a la salida de la llenadora, la botella es capsulada con una tapa hermética, con la finalidad de que la bebida conserve sus características organolépticas. Finalmente, la botella tapada es inspeccionada en pantallas iluminadas, verificando que existe el nivel de llenado que se encuentra dentro de las especificaciones de control y calidad del producto.

Cabe recalcar que las etapas explicadas anteriormente son las consideradas a realizar el modelado de la planta mediante la herramienta de redes de Petri, por lo cual se ha omitido ciertas consideraciones importantes que son realizadas en el sistema de producción y envasado de gaseosas en una planta real, por ejemplo, la etapa de despaletizado, desencajonado, almacenamiento, entre otros. El diagrama de bloque de la etapa de lavado y llenado de botellas se presenta en la figura 3.3.

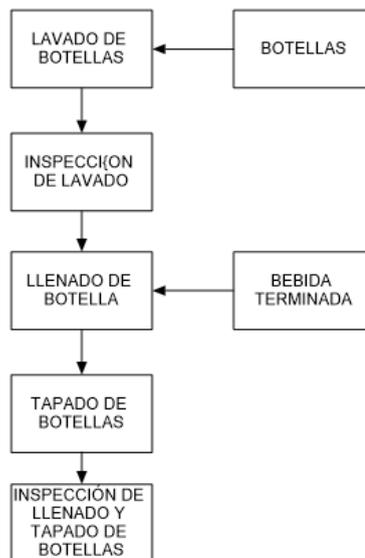


Figura 3. 3: Diagrama de bloque de la etapa de llenado y tapado de botellas.  
Elaborado por: Autores.

Fuente: ((Embonor S.A, 2013);(Merino Peña & Moscoso Coello, 2007)).

### 3.1.2. Características del sistema de producción y envasado de gaseosas.

En este segmento del trabajo investigativo se mencionará las características de los elementos y dispositivos que forman parte del proceso real, hay que tener en cuenta que los sensores y actuadores serán representados en la maqueta simplificada mediante indicadores leds simulando su funcionamiento.

El dispositivo que gobernará el sistema de producción y envasado de gaseosas será un controlador lógico programable, PLC. El controlador lógico programable, marca Allen-Bradley, es el MicroLogix 1100, cuyas características según la información brindada por (Rockwell Automation, 2008) son las siguientes:

- Cuenta con una alimentación de 24V DC y utiliza una corriente de 5A, posee un puerto Ethernet/IP de 10/100 Mbps permitiendo la comunicación entre dispositivos similares.
- Es capaz de funcionar en línea, realizando modificaciones al programa durante su ejecución. El puerto con el que trabaja es una combinación entre RS-232/RS-485, lo que proporciona una gran cantidad de protocolos distintos de red y punto a punto.
- Incorpora una pantalla de cristal líquido en la cual se puede mostrar el estado de las E/S digitales, así como los datos que posee el controlador internamente.

- Posee un contador y dos PTO/PWM de alta velocidad de 40 Hz, incorpora dos entradas analógicas (0-10 VCC con una resolución de 10 bits), 10 entradas digitales y 6 salidas digitales, las cuales pueden aumentar en número debido a la capacidad de utilizar módulos de expansión tanto digitales como analógicos. La cantidad de módulos de expansión que permite utilizar el PLC es de hasta cuatro módulos de E/S.

Para realizar el control del caudal de la manera establecida dentro del proceso, se utiliza una electroválvula on/off, con una alimentación de 24V DC, 150 PSI de presión máxima a 70°F, con un indicador de abierto/cerrado, entre otras características. Para representar el funcionamiento de la electroválvula dentro de la maqueta simplificada del proceso se utilizará un led indicador donde el estado del led simula el estado de la electroválvula on/off.

La bomba bicilíndrica de doble efecto es la encargada de suministrar la presión para permitir el flujo del líquido a través de las válvulas de salida. Se utiliza una bomba de movimiento alternativo, (TECNOVIN SRL, 2008) con un desfasado cigüeñal en 90° para permitir el flujo continuo con el mínimo de pulsaciones en el líquido a bombear. El control del motor de la bomba es electrónico, brindándole protección por sobrecarga a la bomba, permite al usuario ajustar el rendimiento del equipo de acuerdo a su necesidad, desde 100HL/Hs hasta su caudal máximo. En la maqueta simplificada, para la representación del funcionamiento de la bomba bicilíndrica de doble efecto, se recurrirá al uso de un led indicador, el mismo que simulará el estado on/off de la bomba.

Para controlar y visualizar el nivel del líquido que existen en los tanques de almacenamiento, se utilizan sensores de nivel. La información técnica del dispositivo Micropilot NMT81 encontrada en el catálogo (Endress Hauser, 2016) indica que el sensor de nivel tiene las siguientes características:

- Actúa con tecnología de radar, la precisión que brinda el dispositivo al momento de medir el nivel del líquido es de +/- 0,5 mm (1/32 pulgadas).
- Tiene la capacidad de medir niveles, con un rango mínimo de 0 m (0' 0") y con un máximo de 70 m (229' 8") convirtiéndolo en un dispositivo ideal en los procesos industriales. Es necesario mencionar que, en la maqueta simplificada,

a los sensores de nivel se los representará con indicadores leds simulando el estado on/off de los mismos.

Para lograr realizar la etapa de detección de botellas, se utiliza un sensor de presencia DR-Q15T con tecnología láser. Las características técnicas del dispositivo que las provee (OPTEX FA CO, 2016) informan lo siguiente:

- Su rango de detección de objetos tiene como máximo una distancia de 1.5 metros (4.9 FT), es capaz de detectar objetos con tamaños desde los 15 mm hasta los 1.5 metros, trabajan con corriente directa (10 – 30 voltios).
- El tiempo de respuesta del dispositivo es de 0.35 ms y cuenta con un diodo láser rojo de 650 nm. Estos dispositivos son de uso industrial, no se ven afectados por el polvo, vapor o humedad. En la maqueta simplificada, los sensores de presencia serán representados mediante indicadores leds, simulando el estado on/off del dispositivo.

Para realizar el transporte de botellas, las industrias cuentan con sistemas capaces de cumplir las tareas requeridas, utilizando cintas como medio de transporte. Para su diseño se toma en cuenta varios factores, como la velocidad que necesita la cinta, el peso que es capaz de soportar, el tipo de elemento se va a transportar, entre otros. Para la industria de producción de gaseosas, las cintas transportadoras son de uso ligero, debido a que el peso del envase es mínimo y la estructura de la misma es horizontal.

De acuerdo a la información brindada por (DZ Gear Motor, 2012) los motores que utiliza son de la marca DONGZHAN, cuya tensión nominal es de 220 VAC trifásico, el motor es de tipo asíncrono con una potencia de salida de 750W y una potencia nominal de 2200W, la frecuencia a la que trabaja es de 50-60 Hz, con la frecuencia de 50 Hz la velocidad de salida es de 1340-1400 rpm y con un frecuencia de 60 Hz la velocidad de salida que se obtiene es de 1610-1740 rpm. Para la representación de la cinta transportadora en la maqueta simplificada, se utilizará indicadores leds indicando el estado on/off de la misma.

Las máquinas que intervienen en el sistema de producción y envasado de gaseosas, como la máquina mezcladora, la máquina llenadora, entre otras, serán

representadas en la maqueta simplificada mediante indicadores leds, los mismos que simularán el accionar de las máquinas.

### **3.1.3. Funciones del sistema de producción y envasado de gaseosas.**

En el modelado del sistema de producción y envasado de gaseosas, se refleja la dinámica de cada una de las etapas del sistema, cada etapa tiene sus funciones y la interrelación entre ellas permite el funcionamiento ideal de la planta, a continuación, se describen las funciones del sistema.

a) Tratamiento de agua.

El sistema es capaz realizar el proceso de filtración, donde se realiza la desinfección del agua, el líquido tratado es distribuido a las etapas de producción de jarabe y lavado de botellas.

b) Producción de gaseosa.

El sistema se encarga de realizar las mezclas adecuadas hasta obtener la bebida terminada, este proceso consiste en tres procesos de mezclado con ingredientes como, el azúcar, el concentrado y el gas carbónico.

c) Limpieza de botellas.

Esta parte del proceso se proceden a lavar las botellas por medio de una máquina automática por inyección dejando las botellas limpias y estériles, pasan por una máquina de inspeccionamiento, la cual se encarga de verificar el correcto lavado de las botellas.

d) Envasado y tapado de botellas.

Por medio de una máquina llenadora las botellas son llenadas con la bebida terminada, luego se encapsulan con una tapa hermética para ser inspeccionadas por una máquina que verifica el nivel de llenado de las botellas.

### **3.2. Análisis de la planta de producción y envasado de gaseosas.**

Se describe el análisis del funcionamiento del sistema detallando los diferentes estados y variables del proceso basándose en la descripción de las características y funciones del mismo realizadas en la etapa anterior. El tablero de control del sistema de producción y envasado de gaseosas consta de dos pulsadores: marcha (S1) y paro (S0), encargados de encender y apagar el sistema. Para realizar la descripción del

funcionamiento del sistema se divide el sistema de la misma manera como se lo ha realizado anteriormente, con la finalidad de lograr un análisis estructural del sistema.

### **3.2.1. Análisis de la etapa de elaboración de gaseosa.**

Esta etapa consiste en realizar la correcta mezcla de materias primas hasta lograr una bebida terminada (gaseosa), para el correcto funcionamiento de esta etapa se han tomado elementos de control, estaciones de almacenamientos principales y secundarios, actuadores y máquinas necesarias para cumplir el funcionamiento del mismo. Todos los elementos que forman parte del sistema serán representados por una nomenclatura descritas en el anexo A.

#### **i. Tratamiento de agua**

Al presionar el pulsador de marcha el agua del tanque del almacenamiento principal (TAP) es trasladada por medio de una bomba (B1) y válvula (V1) hacia el banco de filtros (F1) (ver figura 3.4), donde pasará el proceso de purificación. Terminado el proceso de purificación pasa a ser acumulada en dos tanques: el tanque de almacenamiento de agua tratada (TA1) utilizado para la elaboración del jarabe simple, este almacenamiento es llenado por medio de una válvula (V3) y al tanque de almacenamiento de agua tratada (TA2) llenado por medio de una válvula (V4), el agua tratada del TA2 es utilizado para la elaboración de bebida terminada.

Ambos tanques proceden a llenarse, el llenado alto de los tanques de almacenamiento son detectados por un sensor de nivel alto (LSH1) y sensor de nivel alto (LSH2) respectivamente para cada tanque, dichos sensores de nivel se encargan de cerrar las válvulas de entrada de cada tanque y abrir las válvulas de salida de los mismos y a su vez encender las bombas encargadas de impulsar el líquido hacia las diferentes etapas donde serán requeridos, estas válvulas y bombas de salida se establecieron con la nomenclatura (B2) (V5) para el TA1 y (B3) (V6) para él TA2.

Después del proceso de filtrado se encuentra conectada una válvula (V2), la cual está conectada con la máquina lavadora de botellas que serán explicadas en otra etapa del sistema. En el diagrama del proceso de la figura 3.4 se

observa todos los elementos que forman parte del proceso de tratamiento de agua, también se adjunta la figura 3.5 la cual muestra un diagrama de flujo del proceso con la finalidad de indicar de manera concreta y sencilla esta parte del sistema.

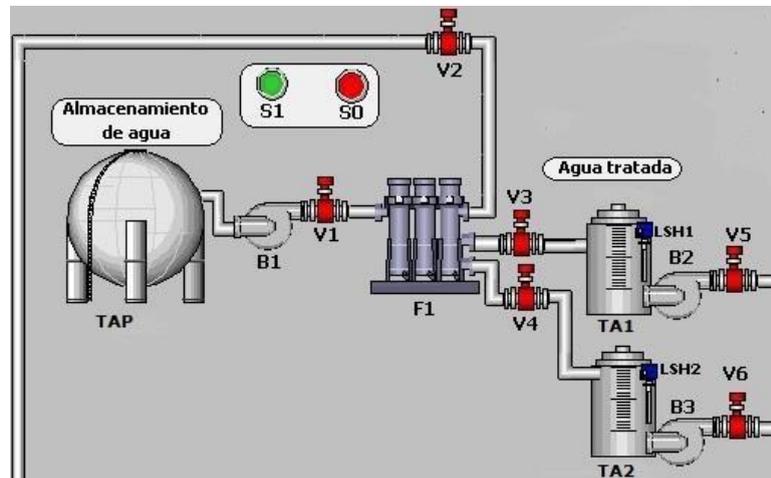


Figura 3. 4: Diagrama del proceso de tratamiento de agua.

Elaborado por: Autores.

Fuente: ((Embonor S.A, 2013);(Merino Peña & Moscoso Coello, 2007)).

ii. Elaboración de jarabe simple.

Esta etapa del proceso consiste en mezclar el agua tratada con azúcar formando el jarabe simple. El agua tratada llega a la mezcladora (M1) (ver figura 3.6), por medio de la bomba 2 y válvula 5 como se explicó en la etapa anterior. En la mezcladora, el sensor de nivel medio (LSM1) detecta el nivel de agua tratada requerido para la mezcla, al llegar el agua tratada al nivel requerido se apaga la B2 y se cierra la V5, luego se apertura la válvula (V7) ubicada en el dispensador de azúcar (DA) procediendo a verter la cantidad de azúcar requerido para la mezcla.

Al terminar de dispensar el azúcar, automáticamente se enciende la M1 por un tiempo determinado, culminado el tiempo, M1 se apaga. Luego que se realiza la mezcla se apertura la válvula (V8), válvula que está ubicada a la salida de la mezcladora, la cual permite el paso de la mezcla hacia el filtro (F2), donde se eliminan todas las impurezas generadas por la mezcla.

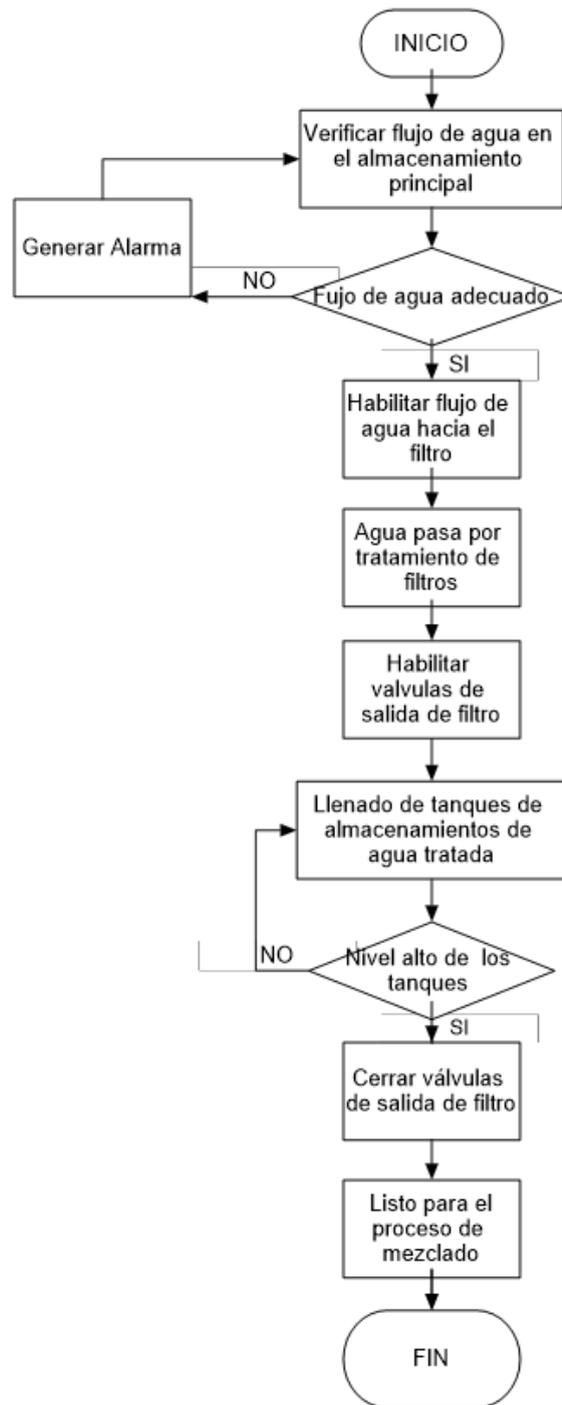


Figura 3. 5: Diagrama de flujo del proceso de tratamiento de agua.  
 Elaborado por: Autores.  
 Fuente: ((Embonor S.A, 2013); (Merino Peña & Moscoso Coello, 2007)).

El jarabe simple libre de impurezas pasa a ser almacenado en el almacenamiento de jarabe simple (TA3), en donde un sensor de nivel alto (LSH3) cierra la V8 y enciende la bomba (B4) y apertura la válvula (V9) permitiendo el paso del jarabe simple hacia la etapa de elaboración de jarabe terminado. En el diagrama del proceso de la figura 3.6 se observa todos los

elementos que forman parte del proceso de elaboración de jarabe simple, también se adjunta la figura 3.7 la cual muestra un diagrama de flujo de esta etapa del sistema.

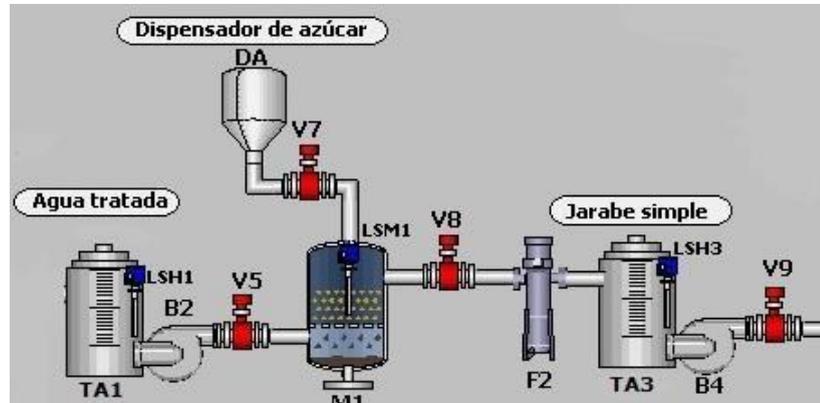


Figura 3. 6: Diagrama del proceso de elaboración de jarabe simple.

Elaborado por: Autores

Fuente: ((Embonor S.A, 2013); (Merino Peña & Moscoso Coello, 2007)).

i. Elaboración de jarabe terminado.

Esta etapa del proceso consiste en mezclar el jarabe simple con el concentrado formando el jarabe terminado. El jarabe simple llega a la mezcladora (M2) (ver figura 3.8), por medio de la bomba 4 y válvula 9 como se explicó en la etapa anterior. En la mezcladora, el sensor de nivel medio (LSM2) detecta el nivel de jarabe simple requerido para la mezcla, al llegar el jarabe simple al nivel requerido, el sensor de nivel apaga la B4 y cierra la V9, luego apertura la válvula (V10) ubicada en el dispensador de concentrado (DC) procediendo a verter la cantidad de concentrado requerido para la mezcla, ver figura 3.8.

Al terminar de dispensar el concentrado automáticamente se enciende la M2 por un tiempo determinado, culminado el tiempo se apaga. Luego que se realiza la mezcla se apertura la válvula (V11), válvula ubicada a la salida de la mezcladora 2, la cual permite el paso de la mezcla hacia el tanque de almacenamiento (TA4) en donde un sensor de nivel alto (LSH4) cierra la V11 y enciende la bomba (B5) y apertura la válvula (V12) permitiendo el paso del jarabe terminado hacia la etapa de elaboración de bebida terminada. En el diagrama del proceso de la figura 3.8 se observa todos los elementos que forman parte del proceso de elaboración de jarabe terminado, también se

adjunta la figura 3.9 la cual muestra un diagrama de flujo de esta etapa del sistema.

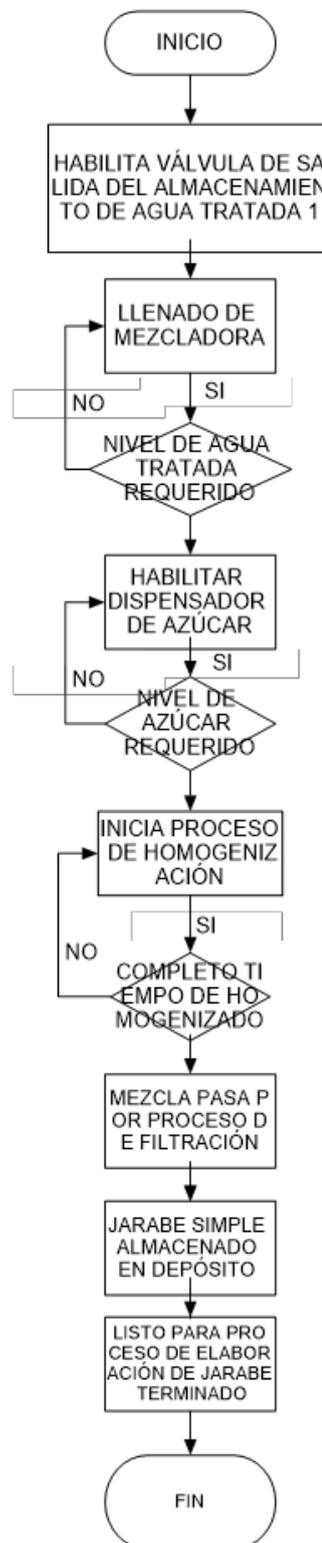


Figura 3. 7: Diagrama de flujo del proceso de elaboración de jarabe simple. Elaborado por: Autores. Fuente: ((Embonor S.A, 2013); (Merino Peña & Moscoso Coello, 2007)).

ii. Elaboración de bebida terminada.

Esta etapa del proceso consiste en la carbonatación de la bebida donde interviene el jarabe terminado, agua tratada y gas carbónico formando la bebida terminada. El jarabe terminado llega al carbonatador (CA) (ver figura 3.10), por medio de la bomba 5 y válvula 12 como se explicó en la etapa anterior.

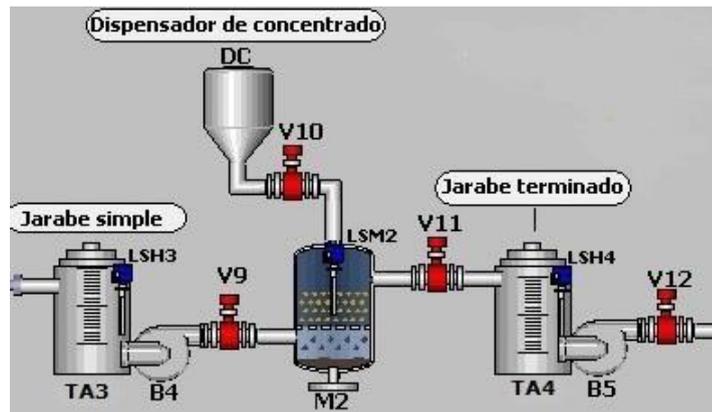


Figura 3. 8: Diagrama del proceso de elaboración de jarabe terminado.

Elaborado por: Autores.

Fuente: ((Embonor S.A, 2013);(Merino Peña & Moscoso Coello, 2007)).

En el carbonatador el sensor de nivel medio (LSM3) detecta el nivel de jarabe terminado requerido, al llegar el jarabe terminado al nivel requerido, el sensor de nivel medio (LSM3) apaga la B5 y cierra la V12, luego enciende la bomba 3 y apertura la válvula 6 ubicada en el tanque de almacenamiento de agua tratada 2, permitiendo el paso del agua tratada hacia el carbonatador. El sensor de nivel alto (LSH5) detecta el nivel de agua tratada requerida en el carbonatador y procede a apagar la B3 y a cerrar la V6.

Al cumplir el nivel alto del carbonatador, se apertura la válvula (V13) ubicada en el dispensador de gas carbónico (GC) el cual se encarga de suministrar la cantidad de gas requerido. Al terminar de dispensar el gas automáticamente se enciende el CA por un tiempo determinado, culminado el tiempo este se apaga.

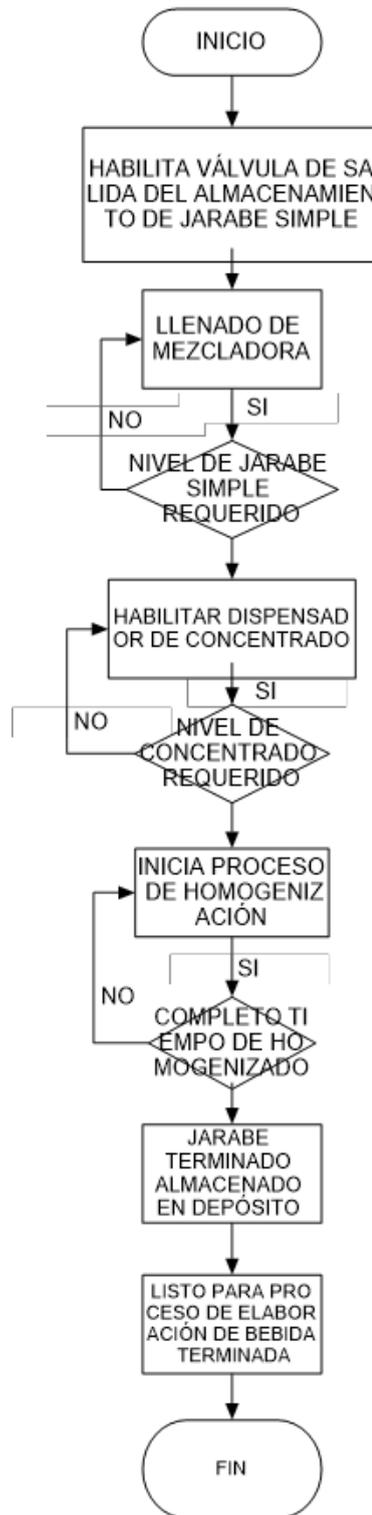


Figura 3. 9: Diagrama de flujo del proceso de elaboración de jarabe terminado.  
 Elaborado por: Autores.  
 Fuente: ((Embonor S.A, 2013); (Merino Peña & Moscoso Coello, 2007)).

Luego que la bebida terminada esta lista, se apertura la válvula (V14), válvula ubicada a la salida del carbonatador, la cual permite el paso de la bebida terminada hacia el tanque de almacenamiento (TA5) en donde un sensor de

nivel alto (LSH6) cierra la V14 y enciende la bomba (B6) y apertura la válvula (V15) permitiendo el paso de la bebida terminada hacia la etapa de llenado de botellas. En el diagrama del proceso de la figura 3.10 se observa todos los elementos que forman parte del proceso de elaboración de bebida terminada, también se adjunta la figura 3.11 la cual muestra un diagrama de flujo de esta etapa del sistema.

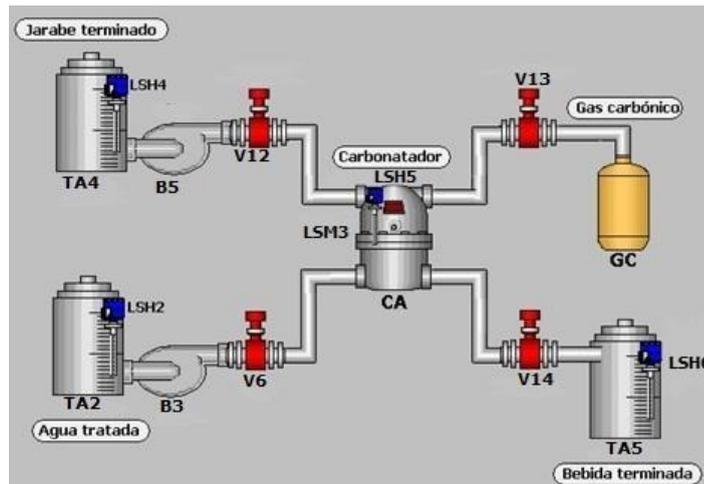


Figura 3. 10: Diagrama del proceso de elaboración de bebida terminada.

Elaborado por: Autores.

Fuente: ((Embonor S.A, 2013); (Merino Peña & Moscoso Coello, 2007)).

### 3.2.2. Análisis de la etapa de envasado de gaseosa.

Esta etapa consiste en preparar el envase de la gaseosa para ser llenado con la bebida terminada, para el correcto funcionamiento de esta etapa se han tomado elementos de control, estaciones de almacenamientos principales y secundarios, actuadores y máquinas necesarias para cumplir el funcionamiento del mismo. Todos los elementos que forman parte del sistema serán representados por una nomenclatura descritas en el anexo A.

#### i. Etapa de lavado de botellas.

La primera etapa del proceso de envasado de gaseosa, es la etapa de lavado de botellas, la cual consiste en lavar botellas correctamente, este proceso tiene su respectivo inspeccionamiento con la finalidad de cumplir con su función. Sincronizado con las etapas anteriores se enciende la cinta transportadora (CT), encargada de transportar las botellas desde el almacenamiento hasta la máquina lavadora de botellas (ML) (ver figura 3.12). Las botellas al llegar a

la etapa de lavado son detectadas por un sensor de presencia (SP1), al ser detectadas por el sensor se detiene la CT y actúa la máquina de lavado por un tiempo determinado, culminado este tiempo se apaga, inmediatamente se activa la CT transportando las botellas lavadas hacia la máquina de inspección (MI1).

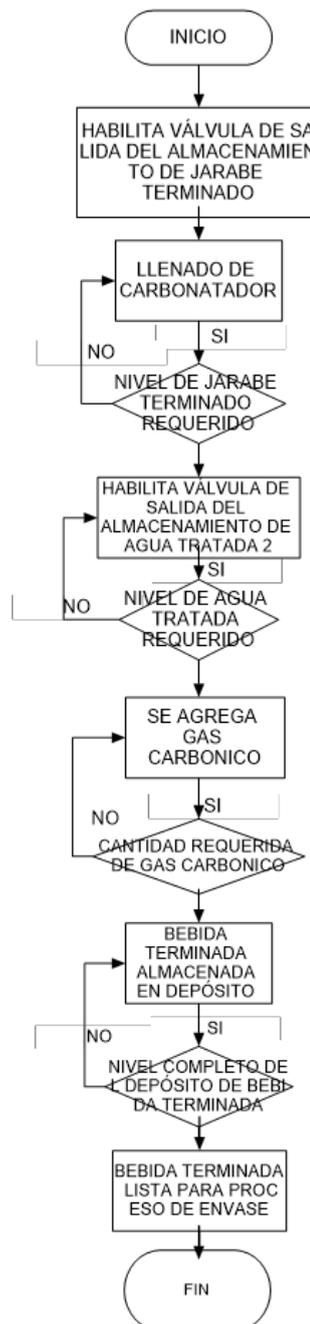


Figura 3. 11: Diagrama de flujo del proceso de elaboración de bebida terminada.  
 Elaborado por: Autores  
 Fuente: ((Embonor S.A, 2013); (Merino Peña & Moscoso Coello, 2007)).

Las botellas al llegar a la etapa de inspeccionamiento son detectadas por un sensor de presencia (SP2), al ser detectadas por el sensor se detiene la CT y actúa la máquina de inspección por un tiempo, culminado este tiempo se apaga, de inmediato se activa la CT trasladando las botellas lavadas correctamente hacia la etapa de llenado de botellas. En el diagrama del proceso de la figura 3.12 se observa todos los elementos que forman parte del proceso de lavado de botellas, también se adjunta la figura 3.13 la cual muestra un diagrama de flujo de esta etapa del sistema.

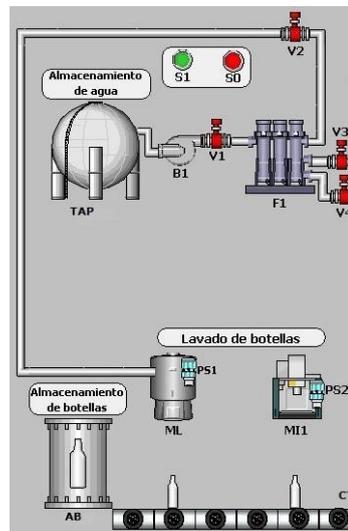


Figura 3. 12: Diagrama del proceso de lavado de botellas  
 Elaborado por: Autores  
 Fuente: ((Embonor S.A, 2013); (Merino Peña & Moscoso Coello, 2007)).

ii. Etapa de llenado y tapado de botellas.

La etapa final del proceso de envasado de gaseosa, es la etapa de llenado y tapado de botellas, este proceso tiene su respectivo inspeccionamiento con la finalidad de cumplir con exactitud su función. Al llegar las botellas hasta la máquina llenadora de botellas (MLL) son detectadas por un sensor de presencia (SP3), el cual detiene la CT y a su vez se enciende bomba 6 y válvula 15, permitiendo el paso de la bebida terminada hacia la máquina llenadora de botellas (ver figura 3.14).

La máquina de llenado se activa por un tiempo determinado, culminado este tiempo se apaga, inmediatamente se activa la CT transportando las botellas llenadas hacia la máquina de tapado, la cual actuara por un sensor de presencia

(SP4) deteniendo la CT hasta que la botella sea tapada, tapada la botella se activa la CT y las traslada hacia la máquina de inspección (MI2).

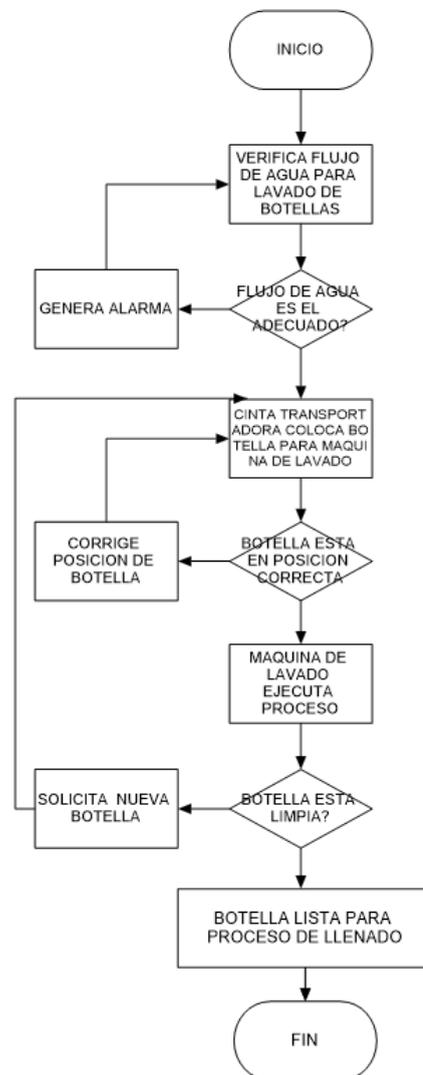


Figura 3. 13: Diagrama de flujo del proceso de lavado de botellas.

Elaborado por: Autores.

Fuente: ((Embonor S.A, 2013); (Merino Peña & Moscoso Coello, 2007)).

Las botellas al llegar a la etapa de inspeccionamiento son detectadas por un sensor de presencia (SP5), al ser detectadas por el sensor se detiene la CT y actúa la máquina de inspección por un tiempo, culminado este tiempo se apaga, de inmediato se activa la CT trasladando el producto terminado hacia su almacenamiento. En el diagrama del proceso de la figura 3.14 se observa todos los elementos que forman parte del proceso del llenado y tapado de botellas, también se adjunta la figura 3.15 la cual muestra un diagrama de flujo de esta etapa del sistema.

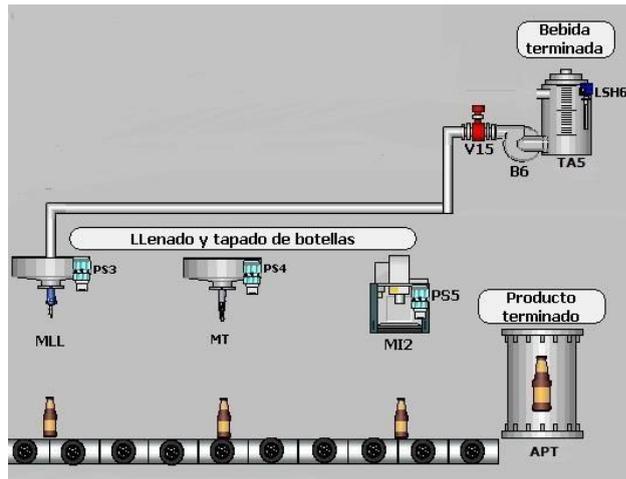


Figura 3. 14: Diagrama del proceso de llenado y tapado de botellas.  
 Elaborado por: Autores.  
 Fuente: ((Embonor S.A, 2013); (Merino Peña & Moscoso Coello, 2007)).

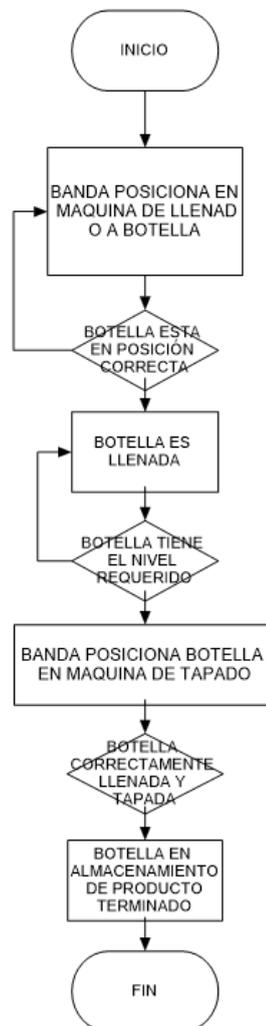


Figura 3. 15: Diagrama de flujo del proceso de llenado y tapado de botellas.  
 Elaborado por: Autor.  
 Fuente: ((Embonor S.A, 2013); (Merino Peña & Moscoso Coello, 2007)).

### 3.3. Modelado del sistema de producción y envasado de gaseosa con redes de Petri.

En la modelación o diseño de un sistema de automatización con cualquiera de los métodos formales conocidos, se busca alcanzar la verificación y validación de los sistemas. Debido a ello, la simulación de la red de Petri del sistema de producción y envasado de gaseosa se desarrolló en el software Visual Object net ++.

El software Visual Object net ++ es una herramienta de ingeniería visual que permite la simulación gráfica de redes de Petri, permite al usuario representar, simular, ver y documentar la red de Petri de eventos discretos puros, también soporta redes de Petri híbridas, continuas y otras extensiones de las mencionadas. (Chen, 2005). En el anexo B se encuentra más información acerca del software.

En el modelado del sistema, los lugares o plazas por definición representan un lugar en el espacio que será utilizado dentro del sistema, estas plazas dentro del modelado del sistema se utilizaron para representar almacenamientos, estado de líquido o botella, señal emitida por sensores, disponibilidad de máquinas, por otro lado, las transiciones se las denomina como los eventos que producen cambios en los estados, dentro del modelado representan la apertura de válvulas, estados de la cinta transportadora, inicio y final de trabajo de las máquinas, como se puede observar en la figura 3.16, la cual muestra el modelado de la etapa de jarabe simple, el funcionamiento de esta etapa se encuentra en la descripción en la sección 3.2.1 donde también se encuentra la figura que representa esta etapa del sistema.

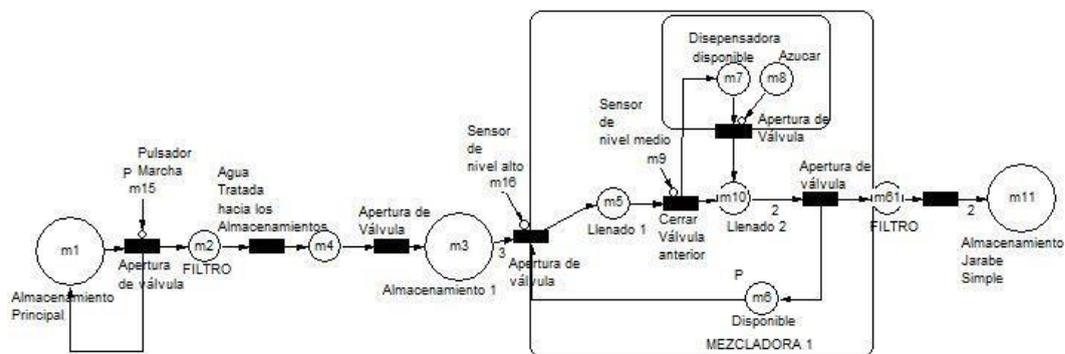


Figura 3. 16: Modelado de la etapa de jarabe simple del sistema.  
Fuente: Autores.

Para realizar el modelado de la etapa de jarabe simple, se considera 3 almacenamientos principales: Almacenamiento principal, almacenamiento 1, el cual corresponde al almacenamiento de agua tratada 1 y finalmente el almacenamiento de jarabe simple, estos almacenamientos son representados por lugares de tamaño grande en el modelado. El filtro, la máquina mezcladora, la dispensadora de azúcar y los diferentes estados que toma el líquido dentro del proceso son representados por plazas de tamaño normal. Por otro lado, las acciones de apertura/cierre de válvula son representados por transiciones las cuales para ser habilitadas dependen del pulsador de marcha y sensores de nivel.

Los sensores de nivel y el pulsador de marcha son representados por lugares de tamaño pequeño conectados a las transiciones por arcos inhibidores. Los arcos inhibidores fueron utilizados debido a que en el sistema se necesita representar que las válvulas serán abiertas/cerradas si y solo si la señal de un sensor ubicada en ese estado del sistema lo indica, para representar la dinámica del sistema se necesita que la señal se encuentre habilitada cuando el token llegue en ese estado. Los arcos inhibidores desde un lugar “p” a una transición “t” indica que la transición solo puede dispararse si hay tokens en el lugar, es decir, una transición “t” la que le llega un arco inhibidor desde un lugar o está habilitada si lo está en el sentido habitual. (Llorens Agost, 2003).

El diseño de la red se realizó bajo reglas de ejecución esenciales para redes de Petri como lo indica (Rodríguez Flores, 2006) , la regla de habilitación se cumple solo si cada entrada contiene por lo menos el número de tokens igual al peso del arco dirigido de “p” a “t”, y la regla de disparo que indica que en una transición habilitada remueve de cada lugar de entrada un número de tokens igual al peso del arco dirigido conectado, estas dos reglas de ejecución fundamentales para el diseño de una red de Petri, se cumplen en el modelo de la figura 3.19 donde se presenta el modelado del sistema de producción y envasado de gaseosa.

La conexión secuencial entre plazas, arcos inhibidores y los diferentes pesos de los arcos de conexión, son características fundamentales de la red de Petri para conseguir representar la dinámica del sistema en ella. Para diseñar el modelo completo del sistema de producción y envasado de gaseosa se cumple la metodología descrita a continuación.

Los tanques de almacenamiento del sistema: almacenamiento principal, almacenamiento 1 de agua tratada, almacenamiento 2 de agua tratada, almacenamiento de jarabe simple, almacenamiento de jarabe terminado, almacenamiento de bebida terminada, almacenamiento de botellas y finalmente el almacenamiento de producto terminado son representados por lugares de tamaño grande.

Para representar las máquinas mezcladoras se diseña la red previniendo los disparos simultáneos de las transiciones que representan las máquinas, considerando que el proceso de mezclado se realiza sobre un token (cantidad de líquido), pero no puede trabajar sobre dos o más tokens a la vez, para ello se debe agregar un lugar extra asociado a dicha transiciones. Este lugar extra debe tener como única transición anterior y posterior a la transición considerada. Esto se presenta en la figura 3.17, la cual muestra cómo se define el reciclado de una transición para una red de Petri.

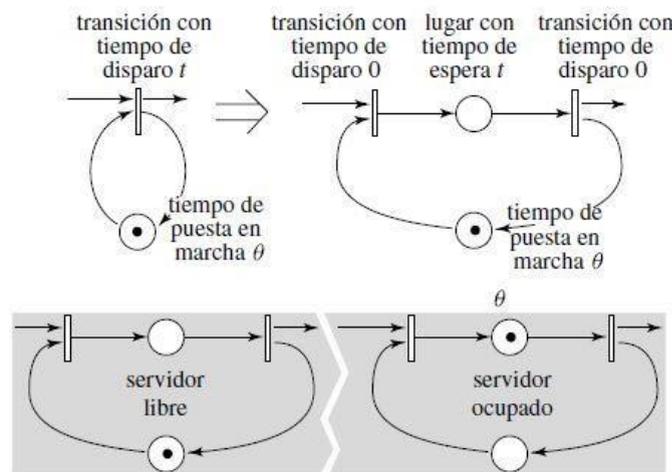


Figura 3. 17: Reciclado de una transición  
Fuente: (Katz & Kofman, 2001)

El agregado de este bucle recibe el nombre de reciclado de la transición. El lugar de tiempo de espera que se observa en la figura, para el modelado de las máquinas, se representa por lugares correspondientes a llenado 1 (materia prima 1) y llenado 2 (materia prima 2) unidos por una transición, asignando un tiempo de espera positivo al lugar reciclado para forzar un tiempo mínimo entre la finalización de un disparo y el inicio del siguiente. (Katz & Kofman, 2001).

Los dispensadores de materias prima son representados por la unión de dos lugares en una transición, lo que se define como sincronización en el consumo, como

se muestra en la figura 3.18. Las marcas esperan en estos lugares hasta el instante en el cual resulta disponible la última marca que es necesaria para habilitar el disparo de la transición, en este instante son consumidas simultáneamente todas las marcas que son necesarias para el disparo de la transición.

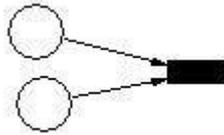


Figura 3. 18: Unión en una transición.  
Fuente: (Katz & Kofman, 2001).

Las máquinas utilizadas en la etapa de envasado de gaseosa son representadas al igual que las máquinas mezcladoras, se previenen los disparos simultáneos en las transiciones que representan las máquinas por medio de la estructura del reciclado de una transición representada en la figura 3.17. Para representar el llenado del líquido (tokens) en los almacenamientos (lugares), se consideran pesos 2 y 3 en los arcos de salida de los lugares indicados, ya que los pesos de los que van de un lugar a una transición representan el número mínimo de recursos de la clase almacenada en dicho lugar que son necesarios para activar dicha transición.

Como se explicó en la sección anterior las plazas conectadas a una transición utilizando arcos inhibidores representan los sensores de nivel, presencia, pulsador de marcha (señales de activación). La unión de todos los elementos considerando las reglas de ejecución y algunas estructuras especiales como el reciclado de una transición y la sincronización de consumo explicadas anteriormente, forman el modelado del sistema de producción y envasado de gaseosa de la figura 3.19.

### **3.3.1. Análisis obtenido a partir de la simulación mediante Visual Object net ++.**

Observar la dinámica del sistema mediante la simulación permitió realizar el análisis del funcionamiento del sistema. Durante la simulación se reflejaron diferentes conflictos debido a la falta de sincronización entre las etapas principales del sistema que conforman el sistema. Se analiza también otros conflictos que pueden generarse al tener un cambio que perturbe el sistema. A continuación, se detalla cuáles son los

conflictos a resolver en el modelado del sistema, los mismos que se pueden observar en la figura 3.22.

### 3.3.1.1. Conflictos que se observaron en el modelado del sistema.

El sistema de producción y envasado de gaseosas consta de dos etapas principales, como se explica en la sección 3.2, donde se realiza el análisis del funcionamiento del sistema de producción y envasado de gaseosa, se entiende que las dos etapas principales del sistema: etapa de producción de gaseosa y etapa de envasado de gaseosa funcionan paralelamente. La falta de sincronización entre los procesos que conforman estas etapas conlleva que el sistema presente colisiones, las cuales se establecieron a partir del análisis que se obtuvo a partir de la simulación del modelado. En la sección 3.2.2 serán analizados posibles soluciones a los conflictos presentados.

El almacenamiento 1 que se observa en la figura 3.20, corresponde al almacenamiento de agua tratada 1, este almacenamiento posee un marcado con 23 tokens el cual, incrementa cada milisegundo, lo que se interpreta como un rebose en dicho almacenamiento. Este aumento de tokens se da, debido a que la válvula de salida del filtro, la cual, es representada por una transición, siempre permanece activa. Esta misma situación se presenta en el almacenamiento 2 y la válvula que es utilizada en la máquina lavadora de botellas.

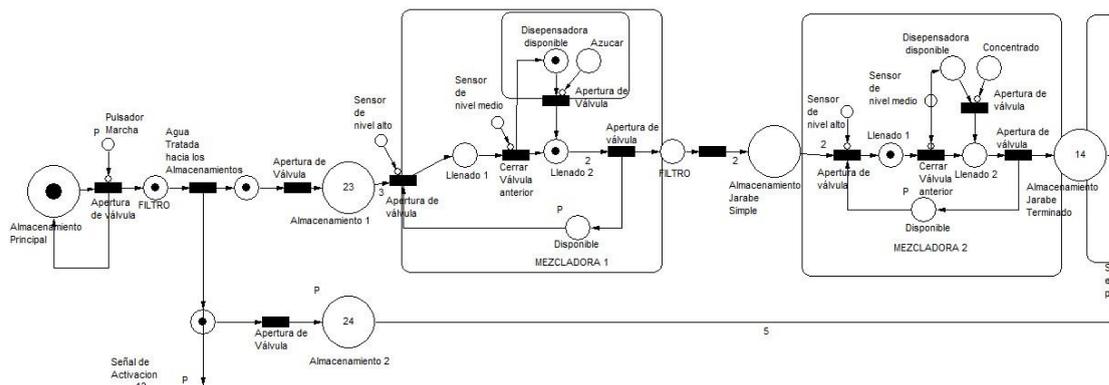


Figura 3. 19: Conflictos en las etapas de tratamiento agua y elaboración de jarabe simple Fuente: Autores.

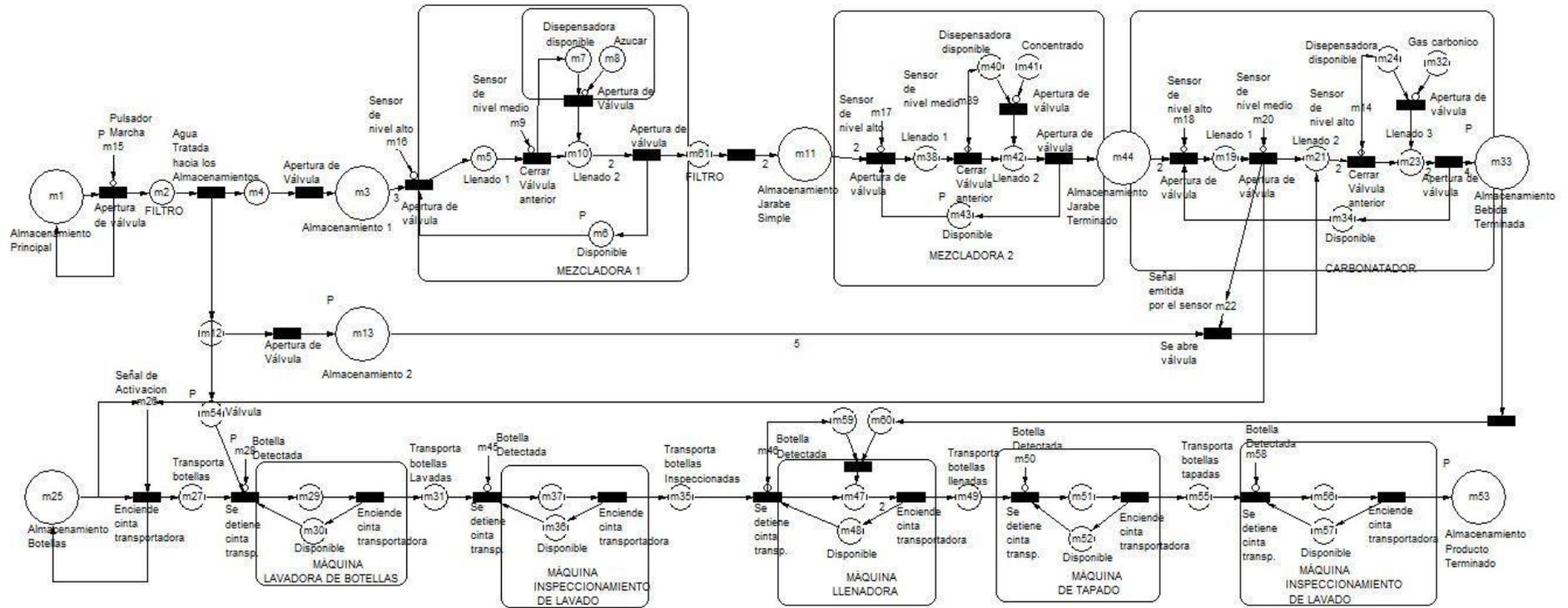


Figura 3. 20: Modelado del sistema de producción y envasado de gaseosa.  
 Fuente: Autores.

En el almacenamiento de jarabe terminado, como se observa en la figura 3.20, también se presenta un incremento de 14 tokens en ese lugar, pero esta colisión se refleja después de un largo tiempo de estar en proceso todo el sistema y esto se debe a la falta de sincronización entre la etapa de elaboración de jarabe terminado y la etapa de elaboración de bebida terminada.

Por otro lado, en la etapa de envasado, se presenta la misma situación que se presenta en los almacenamientos mencionados anteriormente, pero en esta etapa, la colisión se da en la cinta transportadora, la cual presenta un almacenamiento de 38 tokens antes de que las botellas sean lavadas, esto se debe a que el almacenamiento de botellas no considera el tiempo que se demora máquina lavadora de botellas, se establece también que la máquina lava una botella al tiempo, como se observa en la figura 3.21.

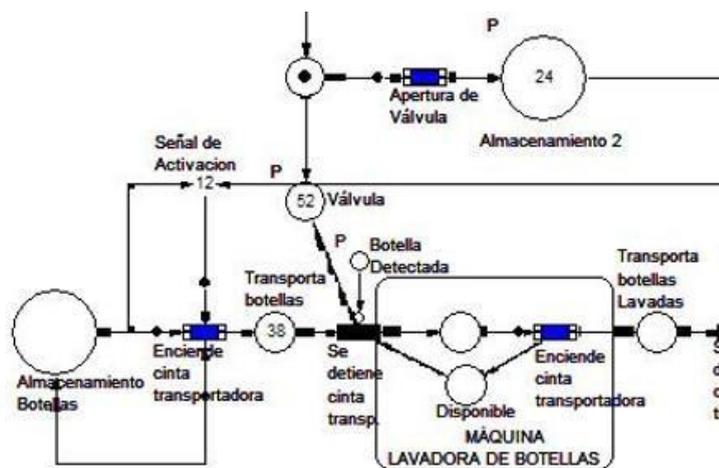


Figura 3. 21: Conflictos en la etapa de lavado de botellas.  
Fuente: Autores.

La misma colisión que se da al transportar las botellas hacia la máquina lavadora de botellas, se presenta al transportar las botellas hacia la máquina llenadora de botellas con un incremento en ese lugar de 12 tokens, por lo tanto, también se observa la falta de sincronización entre la máquina de inspeccionamiento de lavado y la máquina llenadora de botellas. En la figura 3.22 se observa también que el lugar que representa la válvula de conexión entre el almacenamiento de bebida terminada y la máquina llenadora de botellas también presenta un incremento de 25 tokens, por lo tanto, se concluye que esto se debe a la falta de sincronización entre la etapa de

elaboración de bebida terminada y la etapa de envasado, las cuales son las etapas principales de todo el sistema.

### **3.3.1.2. Conflictos que pueden generarse al tener perturbaciones en el sistema**

En el modelado del sistema realizado en la figura 3.19 se considera que para que el sistema empiece a funcionar, como condición inicial tiene que, en los lugares que corresponden al almacenamiento principal y al almacenamiento de botellas deben de tener un token para habilitar las transiciones conectadas a los mismos. El token representa el flujo del líquido, o las botellas disponibles en los almacenamientos (lugares). Con respecto a la condición inicial, surgió el siguiente cuestionamiento:

¿Cómo reacciona el sistema al faltar flujo de agua en el tanque de almacenamiento principal y al faltar botellas en su respectivo almacenamiento? En el modelado realizado del sistema de producción y envasado de gaseosa, no se considera la posibilidad de que puede faltar la materia prima esencial para cumplir con la función de producir y envasar gaseosa, por lo tanto, no se puede reflejar en la simulación del modelo cómo se comporta ante esa situación.

Por otro lado, en el modelado del sistema se considera que las máquinas y las válvulas se encuentran en correcto estado, de ahí surge la siguiente interrogante: ¿Cómo reacciona el sistema si llega a sufrir un daño alguna válvula o máquina durante el proceso? En el modelado del sistema tampoco se considera esta probabilidad, por lo que no se puede observar en la simulación, cuál sería el comportamiento que debería tomar el sistema al momento de presentarse un suceso como este.

### **3.3.2. Resolución de los conflictos del modelado del sistema simulados en Visual Object++.**

Al realizar el modelado del sistema donde se resuelven los conflictos establecidos, se procura llevar una concurrencia o paralelismo estructural en el modelado cumpliendo las propiedades estructurales y comportamiento de la red de Petri. En todas las etapas del sistema se establecieron las siguientes funciones que ayudan a resolver los conflictos establecidos anteriormente y también permiten determinar cómo debe reaccionar el sistema ante las diferentes perturbaciones:

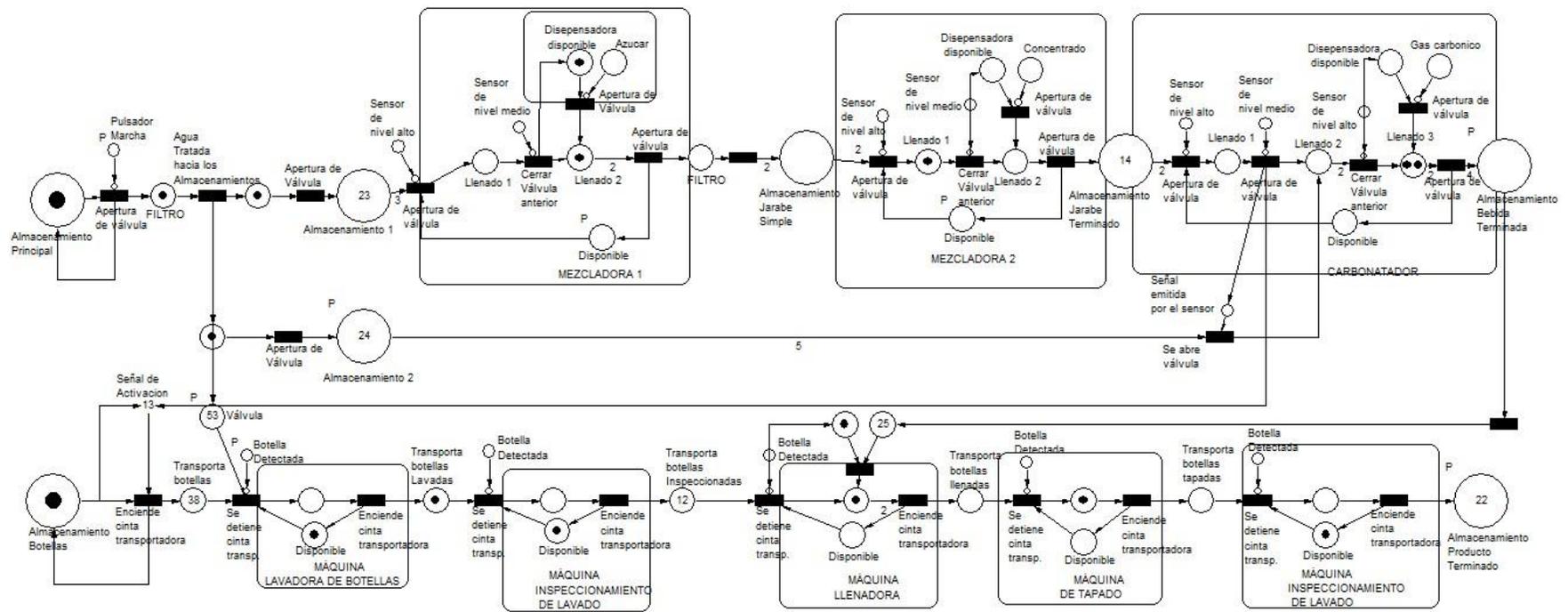


Figura 3. 22: Simulación del modelado de producción y envasado de gaseosa.  
 Fuente: Autores.

Control de válvula de salida del filtro: Apertura y cierre.

- Alarma en caso de daño de válvula de salida de filtro.
- Condición de seguridad que toma el sistema en caso de daño de válvula de salida de filtro.

Operación de máquina mezcladora:

- Disponibilidad de operación de mezcladora.
- Alarma en caso de daño de máquina mezcladora.
- Condición de seguridad que toma el sistema en caso de daño de máquina mezcladora.

Flujo de agua en el tanque de almacenamiento principal:

- Alarma en caso de que no exista flujo de agua en el tanque de almacenamiento principal
- Condición de seguridad que toma el sistema en caso de que no exista flujo de agua en el tanque de almacenamiento principal.

En caso de que la materia prima se agote:

- Condición de seguridad que toma el sistema en caso de que la materia prima se agote, impide el paso del flujo hacia la máquina.
- Alarma en caso de que se agote la materia prima.

Para la explicación del nuevo modelado del sistema, se presenta el modelado de la etapa de elaboración de jarabe simple solo con el almacenamiento de agua tratada 1 en la figura 3.23, se omite el almacenamiento de agua tratada 2 con la finalidad de facilitar la explicación del mismo. Según el análisis obtenido a partir de la simulación del modelado anterior, al controlar la válvula de salida de filtro, permite evitar colisiones y lograr la sincronización del sistema.

Como se puede observar en la figura 3.23, al añadir estas condiciones al sistema, se modificó en una gran parte el modelado inicial. En esta etapa del sistema se añade 5 transiciones, las cuales se diferencian por el nombre TC1, TC2...TC5, estas transiciones y las plazas conectadas a ellas son las encargadas de representar las funciones establecidas. Para poder representar que el flujo de agua sea constante al iniciar el sistema, se conecta el almacenamiento principal a la transición (Apertura de válvula) por medio de un arco inhibidor, el cual se encargara de enviar tokens durante todo el proceso, excepto que se indique que no existe flujo de agua.

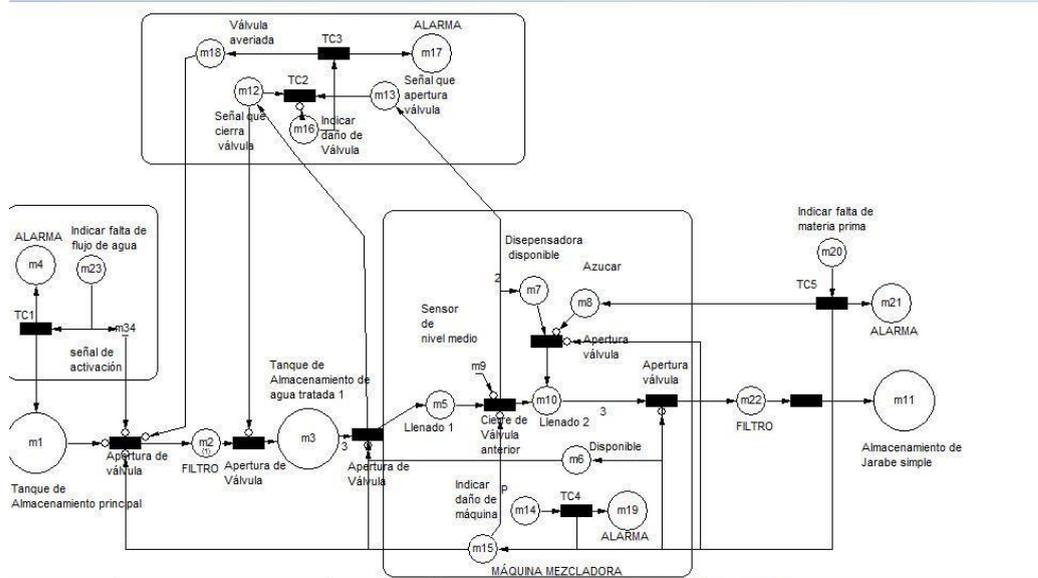


Figura 3. 23: Modelo corregido de la etapa de elaboración de jarabe simple del sistema.  
Fuente: Autores.

La transición 1 (TC1) permite controlar el sistema al indicar falta de flujo de agua en el almacenamiento principal, de manera que al indicar con un token a la plaza correspondiente automáticamente envía un token al lugar que representa la alarma (m4) y a su vez envía el token al almacenamiento principal (m1), el cual se conecta a todo el sistema por medio de un arco inhibitorio, al llegar el token a la plaza del almacenamiento principal impide la apertura de la válvula de salida de flujo, esto quiere decir que se impide la ejecución de la transición, dando como resultado que se detenga el sistema, las otras etapas pueden continuar solo si tienen la cantidad de flujo requerido para seguir con el proceso.

Las etapas posteriores del sistema terminan su ciclo de operación solo si la cantidad de flujo de agua es suficiente para seguir en operación, lo cual, dentro del modelado del sistema, dicho comportamiento se observa mediante el flujo de tokens. Las transiciones TC2 y TC3 están diseñadas para accionar la válvula de salida de filtro dependiendo de las otras transiciones que son habilitadas en la secuencia del sistema, la válvula se cierra cuando el almacenamiento de agua tratada 1 (m3) este en nivel alto, en el caso de la presente red esto se interpreta cuando lleguen 3 tokens a la plaza que representa dicho almacenamiento.

Por otro lado, la apertura de la válvula se acciona cuando se encuentre el tanque de almacenamiento vacío (ausencia de tokens), al realizar este control en la red se previene el rebose del tanque (m3). Al indicar el daño de válvula a TC2 se acciona TC3 y produce la llegada de un token a la plaza que corresponde a la alarma (m17) y a su vez detiene la entrada de agua, cerrando válvulas anteriores, lo cual, dentro del modelado se obtiene con arcos inhibidores por medio de la plaza (m18) que en la figura se distingue con el nombre de “válvula averiada”.

Al indicar el fallo de la máquina mezcladora, TC4 se activa enviando un token a la plaza correspondiente a la alarma (m19) y a su vez cierra las válvulas anteriores (transiciones), permitiendo que el sistema se quede estático, de igual manera como en los casos anteriores esto se logra con arcos inhibidores conectados desde una plaza (m15) hasta las diferentes transiciones (válvulas) que se observan en el diseño del sistema en la figura 3.24. Esta acción se toma debido a que la máquina mezcladora es parte esencial del proceso, el funcionamiento correcto de la máquina permite el desarrollo de las siguientes etapas del sistema y también para evitar daños en tuberías y rebose de agua (incremento de tokens) en el tanque de almacenamiento (m3).

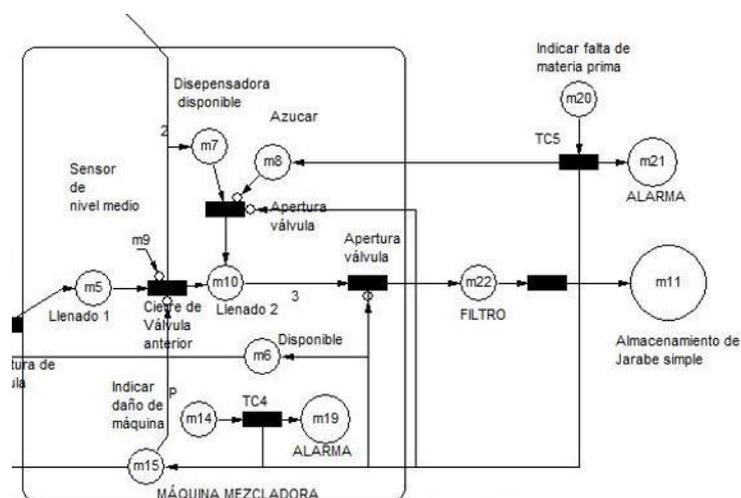


Figura 3. 24: Modelo corregido de la máquina mezcladora de jarabe simple del sistema. Fuente: Autores.

Finalmente, la transición TC5 se encarga de la dinámica del sistema ante la falta de materia prima en la máquina dispensadora de azúcar (m7), la cual se determina al ingresar un token a la plaza (m20) y a su vez indicar la presencia de alarma, enviando un token a la plaza (m21), de igual manera esta parte del sistema es fundamental para

que la máquina mezcladora realice la función adecuada por lo tanto al activarse TC5, por precaución el sistema cierra las válvulas anteriores (transiciones) por medio de la plaza (m15) deteniendo la operación del sistema.

Al realizar estas modificaciones en el sistema, se eliminaron las colisiones, y se analizó el comportamiento del sistema ante las perturbaciones definidas, bajo el mismo esquema de control se realizó el modelado de todas las etapas. La figura 3.25 muestra el modelado del sistema de producción y envasado de gaseosa que no presenta colisiones, y que la reacción ante perturbaciones prioriza la seguridad del sistema.

### **3.3.3. Análisis para el modelado del sistema con redes de Petri.**

De acuerdo a lo expuesto por ((Flores Rodríguez & Cerón Aguirre, 2006); (Llorens Agost, 2003)), en sus trabajos investigativos, las redes de Petri se caracterizan por ser un conjunto de ecuaciones matemáticas que representan el comportamiento de un sistema. Mediante estas ecuaciones se puede analizar de manera formal a la red de Petri, examinando sus propiedades y haciendo relación de las mismas con eventos tangibles como operaciones concurrentes, liberaciones de bloqueo, sincronización apropiada, entre otros. Las redes de Petri pueden ser estudiadas a través de dos distintas propiedades, las propiedades de comportamiento, las mismas que dependen de un marcado inicial y las propiedades estructurales, las cuales no tienen dependencia alguna del marcado inicial. Para realizar el análisis de una red de Petri existen tres métodos posibles:

- a) El árbol de cobertura.
- b) Las ecuaciones matriciales.
- c) Las técnicas de reducción y síntesis.

El análisis de la red de Petri resultante del sistema de producción y envasado de gaseosa se realiza a través de dos métodos, el árbol de cobertura y las ecuaciones matriciales, utilizando el software PIPE. Mediante este software y los resultados que arroja el mismo, se comprueba si la red de Petri cumple con las propiedades de comportamiento.

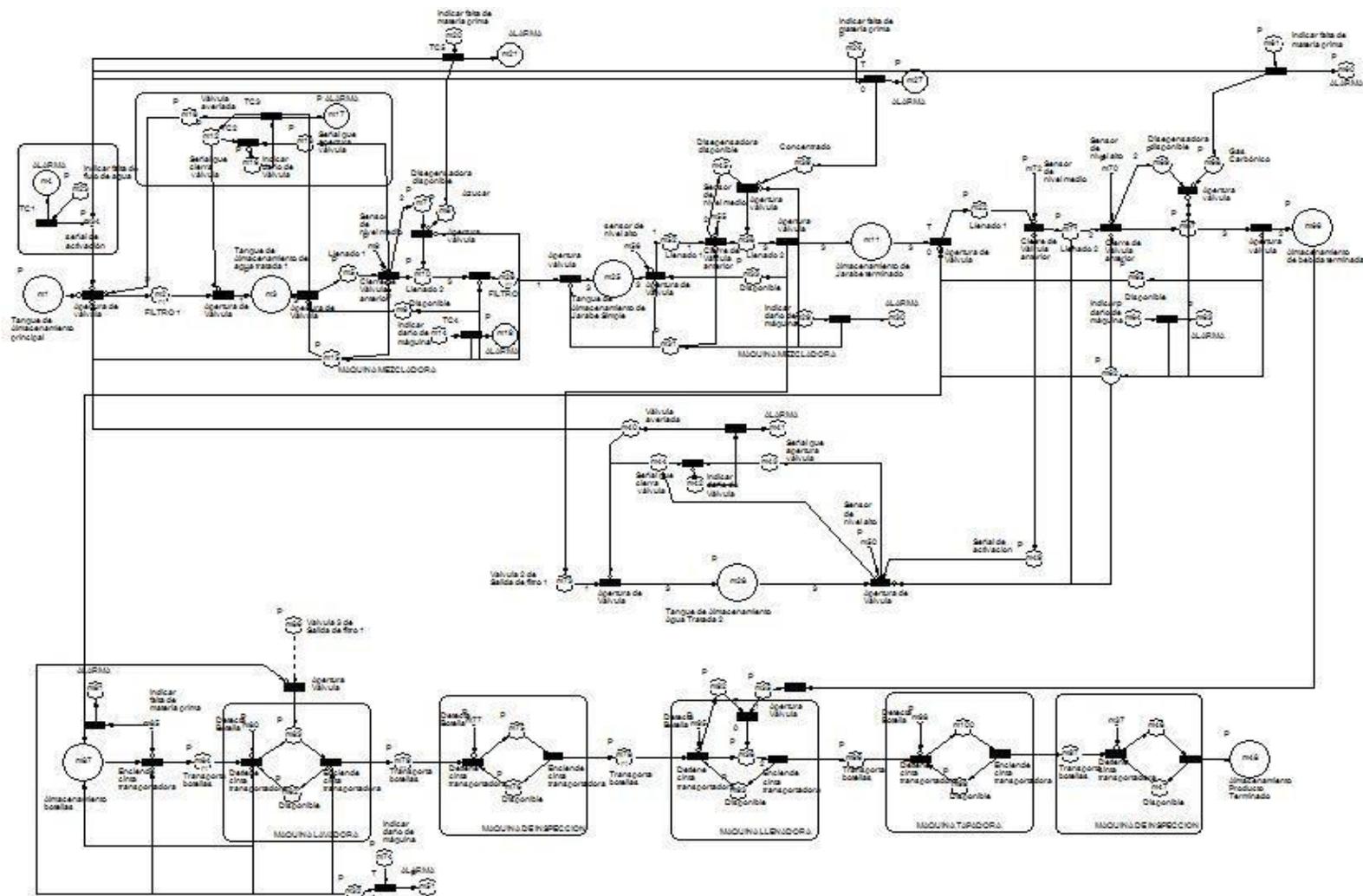


Figura 3. 25: Modelado del sistema de producción y envasado de gaseosa corregido.  
Fuente: Autores.

### 3.3.3.1. Análisis mediante el método del árbol de cobertura del modelado de la etapa de jarabe simple.

Dentro de los métodos existentes para realizar el análisis de una red de Petri se encuentra el método de árbol de cobertura o alcanzabilidad. Este método permite enumerar los marcados alcanzables existentes de una red de Petri y consiste en colocar como raíz del árbol al marcado inicial de la red y disparar todas las transiciones que se encuentren habilitadas. Esta acción conlleva a nuevos marcados que habilitan transiciones. Los nuevos marcados habilitados se los considera como una nueva raíz, de esta manera se pueden generar recursivamente todos los marcados alcanzables, provocando un crecimiento indefinido del árbol de cobertura. Para controlar el tamaño del árbol de cobertura y generar un árbol finito, se utiliza el símbolo  $\omega$ , dicho símbolo representa un número grande de tokens, el cual cumple con cuatro reglas aritméticas, tales que para cualquier entero  $\alpha$ :

$$\alpha < \omega \qquad \omega \leq \omega \qquad \omega + \alpha = \omega \qquad \omega - \alpha = \omega$$

Utilizando las notaciones y el algoritmo que se basa en las cuatro reglas aritméticas, se obtiene el árbol de alcanzabilidad. Si en el análisis de la red de Petri, el símbolo  $\omega$  no aparece, se cumple el método de árbol de alcanzabilidad. Este método depende del marcado inicial de la red, debido a esto, es necesario determinar las propiedades de comportamiento. Al igual que las reglas aritméticas, existen propiedades que se estudian con el árbol de cobertura  $T$  para una red de Petri  $(P, T)$ :

- Una red  $(P, T)$  está acotada y, por tanto,  $(P, T)$  es finito si y solamente si  $\omega$  no aparece en ningún modo de  $(P, T)$
- Una red  $(P, T)$  es segura si y solamente si en los nodos  $T$  sólo aparecen 0's y 1's.
- Una transición  $t$  está muerta si y solamente si no aparece como etiqueta de un arco en  $(P, T)$
- Si  $t$  es alcanzable desde  $t_0$  entonces existe nodo etiquetado con  $t$  tal que  $t_0 \leq t$
- Una red  $(P, T)$  es conservativa si y solamente si la suma ponderada de los tokens en cada nodo del árbol de alcanzabilidad es constante.

El modelado de la etapa de jarabe simple del sistema de producción y envasado de gaseosas fue desarrollado en el software PIPE como se muestra en la

figura 3.26. Este software brinda la posibilidad de hallar de árbol de cobertura a través del módulo reachability/coverability graph. El árbol de cobertura del modelado del sistema se muestra en la figura 3.27.

Cabe recalcar que al momento de ser analizado matemáticamente, las transiciones T1C, T2C, T3C y T5C, fueron omitidas, debido a que para analizar la red no se debe de considerar al inicio del sistema conectar el primer lugar a la primera transición por medio de un arco inhibitor eso genera un número de tokens infinito hacia todo el sistema, lo cual, es necesario para analizar la dinámica del sistema en caso de que se presente una perturbación al sistema, pero para efecto de análisis matemático solo se realiza con una retroalimentación, considerando que el sistema funciona correctamente.

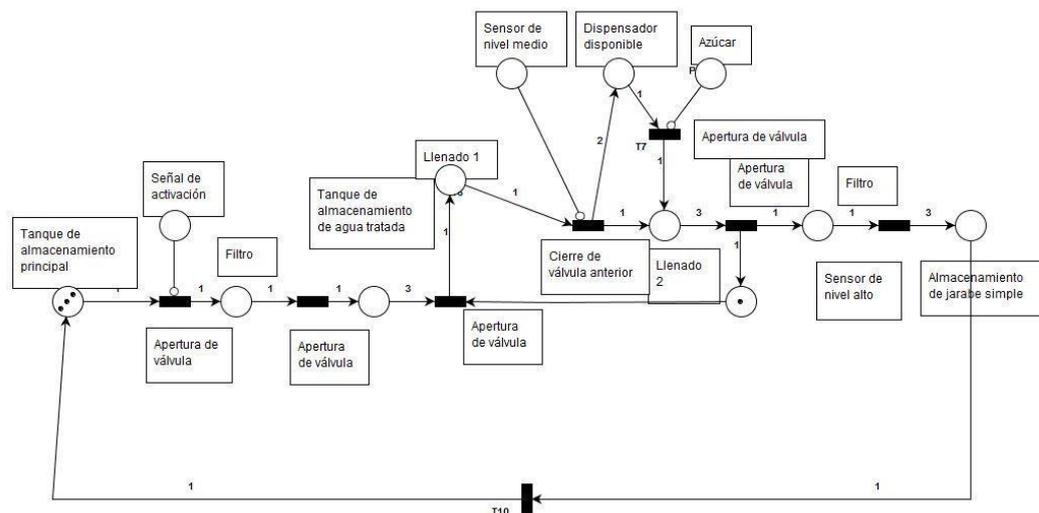


Figura 3. 26: Modelado de la etapa de jarabe simple para análisis matemático. Fuente: Autores.

En la figura 3.27 se observa el árbol de cobertura de la etapa de jarabe simple. En los resultados obtenidos del árbol de cobertura, el símbolo  $\omega$  no aparece, por lo tanto, la red de Petri posee la propiedad de alcanzabilidad. El análisis del árbol de cobertura permite concluir que la red está acotada, debido a esto,  $\infty \rightarrow$  es finito. Además, no existen transiciones muertas, ya que todas las transiciones pertenecientes a la red etiquetan algún arco del árbol de cobertura.

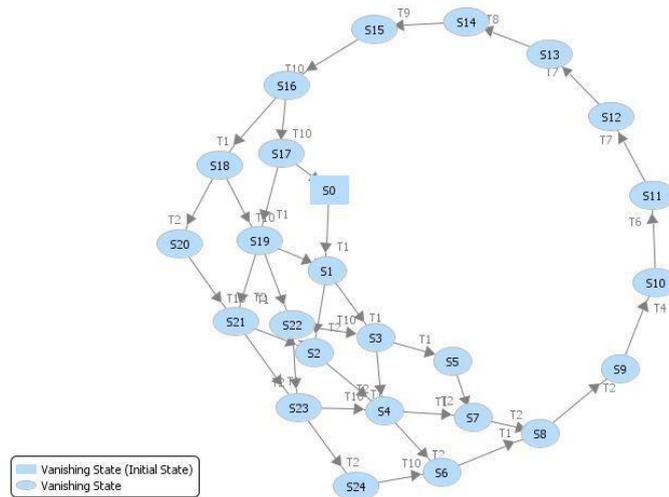


Figura 3. 27: Árbol de cobertura del modelado de la etapa de jarabe simple.  
Fuente: Autores.

El S0 que se muestra en el árbol de alcanzabilidad se refiere al marcado inicial M0. El marcado de toda la red se lo detalla en la tabla, dichos marcados se los visualizan posicionando el cursor sobre el marcado que se desee analizar en la ventana de análisis del módulo reachability/coverability graph. Los marcados corresponden a los lugares P0, P1, P2 .....P12. En la tabla de marcado se puede observar que no solo aparece 0's y 1's en todos los marcados de la red, solo en los marcados que corresponden al estado S4, S10, S14, S19, S21 y S23 se observa ese marcado, en el resto de estados se observa que al menos presenta un 2 o un 3, por lo tanto, analizando este comportamiento de la red, se concluye que no es segura y esto sucede por el peso de los arcos que son diferentes a 1, cabe recalcar que el peso de los arcos fue necesario para representar la dinámica de la llegada del azúcar hacia la mezcladora.

Tabla 3. 1: Marcado del árbol de cobertura de la etapa de jarabe simple.

Estado	Marcado	Estado anterior	Estado siguiente
S0	3, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0	S17 (T10)	S1 (T1)
S1	2, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0	S0 (T1); S19 (T10)	S2 (T2); S3 (T1)
S2	2, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0	S1 (T2); S21 (T10)	S4 (T1)
S3	1, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 2, 0, 0, 0	S1 (T1); S22 (T10)	S4 (T2); S5 (T1)
S4	1, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 1, 1, 0, 0	S2 (T1); S3 (T2); S23 (10)	S6 (T2); S7 (T1)

S5	0, 0, 0, 0, 0, 3, 0, 0, 0, 0, 0, 1	S3 (T1)	S7 (T2)
S6	1, 0, 0, 0, 0, 0, 2, 0, 0, 0, 0, 1	S4 (T2); S24 (T10)	S8 (T2)
S7	0, 0, 0, 0, 0, 2, 1, 0, 0, 0, 0, 1	S4 (T1); S5 (T2)	S8 (T2)
S8	0, 0, 0, 0, 0, 1, 2, 0, 0, 0, 0, 1	S6 (T1); S7 (T2)	S9 (T2)
S9	0, 0, 0, 0, 0, 0, 3, 0, 0, 0, 0, 1	S8 (T2)	S10 (T4)
S10	0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0	S9 (T4)	S11 (T6)
S11	0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 2, 1, 0	S10 (T6)	S12 (T7)
S12	0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 2, 0	S11 (T7)	S13 (T7)
S13	0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 3, 0	S12 (T7)	S14 (T8)
S14	0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1	S13 (T8)	S15 (T9)
S15	0, 0, 0, 3, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1	S14 (T9)	S16 (T10)
S16	1, 0, 0, 2, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1	S15 (T10)	S17 (T10); S18 (T1)
S17	2, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1	S16 (T10)	S6 (T10); S19 (T1)
S18	0, 0, 0, 2, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 1	S16 (T1)	S20 (T2); S19 (T10)
S19	1, 0, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 1	S17 (T1); S18 (T10)	S21 (T2); S1 (T10); S22 (T1)
S20	0, 0, 0, 2, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 1	S18 (T2)	S21 (T10)
S21	1, 0, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 1	S19 (T2); S20 (T10)	S2 (T10); S23 (T1)
S22	0, 0, 0, 1, 0, 2, 0, 0, 0, 0, 0, 1	S19 (T1)	S23 (T2); S3 (T10)
S23	0, 0, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 1	S21 (T1); S22 (T2)	S24 (T2); S4 (T10)
S24	0, 0, 0, 1, 0, 0, 2, 0, 0, 0, 0, 1	S23 (T2)	S6 (T10)

Fuente: Autores

Otro módulo del software PIPE, es el módulo State Space Analysis (análisis de espacio de estado), el cual indica si la red cumple con las tres propiedades estructurales: Limitada, segura y si existen puntos muertos. Aplicando este análisis para el modelado de la red de Petri de la etapa de tratamiento, se obtiene que la red no presenta puntos muertos, es limitada y no segura como se muestra en la figura 3.28.

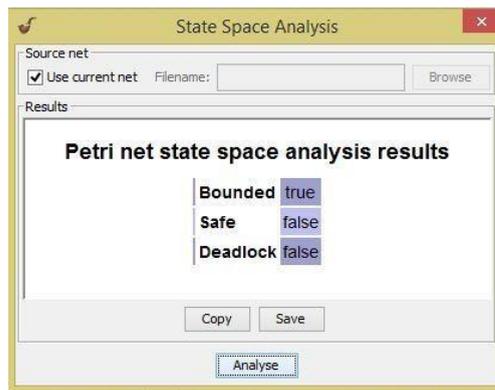


Figura 3. 28: Resultados del análisis de propiedades estructurales de la red de la etapa de jarabe simple.

Fuente: Autores.

#### 3.3.4. Validación del modelado del sistema de producción y envasado de gaseosa.

Otro de los métodos que se utilizan para la validación de una red de Petri, es la matriz de incidencia, esta matriz describe la manera en cómo los nodos pertenecientes a una red de Petri están interconectados. Dicha interconexión de los nodos no tiene relación con el marcado inicial, por esta razón, la aproximación es usada para determinar tanto las propiedades estructurales como las propiedades de comportamiento de las redes de Petri. (T Murata, 1989).

Para realizar el modelado completo del sistema de producción y envasado de gaseosas se utilizó el software PIPE, considerando que el sistema funciona de manera correcta. Por la estructura de la red, el software PIPE no arrojó respuestas con respecto al resultado del árbol de cobertura, por esta razón, para lograr validar la red, la etapa fue analizada por medio de la función Invariant Analysis. El modelado de la red se muestra en la figura 3.30.

### 3.3.4.1. Análisis mediante el método de invariantes del modelado del sistema de producción y envasado de gaseosas.

En el trabajo investigativo realizado por (T Murata, 1989), se muestra una tabla, en la que se resumen las condiciones necesarias y suficientes para ciertas propiedades estructurales.

Tabla 3. 2: Propiedades Estructurales. Condiciones necesarias y suficientes.

Propiedades	Condiciones Necesarias y Suficientes
Conservativa	$\exists \mathbf{v} > 0, A\mathbf{v} = 0$
Parcialmente Conservativa	$\exists \mathbf{v} > \neq 0, A\mathbf{v} = 0$
Repetitiva	$\exists \mathbf{v} > 0, A^T \mathbf{v} \geq 0$
Parcialmente Repetitiva	$\exists \mathbf{v} > \neq 0, A^T \mathbf{v} \geq 0$
Consistente	$\exists \mathbf{v} > 0, A^T \mathbf{v} = 0$
Parcialmente Consistente	$\exists \mathbf{v} > \neq 0, A^T \mathbf{v} = 0$

Elaborado por: Autores.

Fuente: (Llorens Agost, 2003).

De acuerdo a lo expuesto por (Llorens Agost, 2003) se define a un invariante de un sistema como la afirmación que se cumple en cualquier estado alcanzable. Existe la posibilidad de encontrar ciertos vectores en las redes de Petri, a partir de la estructura de la red que inducen invariantes.

Un P-invariante es un vector  $\mathbf{v} \geq 1$  de enteros no negativos que satisface la ecuación  $A\mathbf{v} = 0$ . Al realizar la combinación de esta ecuación con  $\mathbf{v} = \mathbf{v} + \mathbf{v}$  se obtiene que  $\mathbf{v} = \mathbf{v}$ , lo que significa que el número total de tokens iniciales en  $\mathbf{v}$  ponderado por el P-invariante, es constante.

Un T-invariante es un vector  $\mathbf{v} \geq 1$  de enteros no negativos que satisface la ecuación  $A\mathbf{v} = 0$ . Al realizar la combinación de esta ecuación con  $\mathbf{v} = \mathbf{v} + A^T \mathbf{v}$  se obtiene que  $\mathbf{v} = \mathbf{v}$  con  $\mathbf{v} = \mathbf{v}$  lo que significa que si el vector contador de disparos es idéntico a un T-invariante entonces el marcado final es igual al marcado inicial.

A partir de la matriz de invariante se analiza las propiedades estructurales de la red, el resultado de esta matriz se obtuvo mediante el software PIPE, como se muestra en la figura 3.31, interpretando los resultados matemáticos se deduce lo siguiente, la red está cubierta por T- invariante positivas, por lo tanto, es una red viva y limitada, lo que concuerda con el módulo State Space Analysis, reflejado en la figura 3.29. Cabe recalcar, que ambos métodos estudian las propiedades estructurales de la red de Petri.

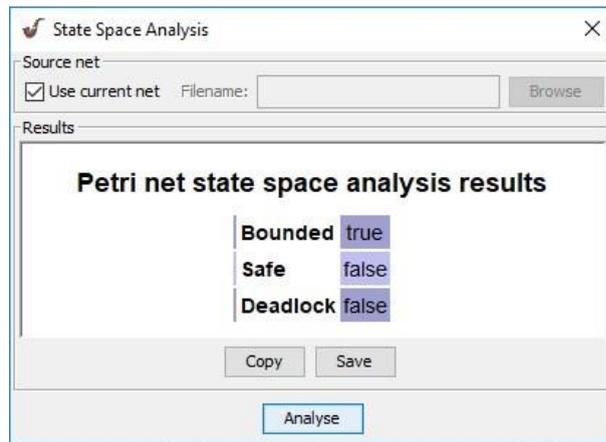


Figura 3. 29: Resultados del análisis de propiedades estructurales de la red de producción y envasado de gaseosa.  
Fuente: Autores.

El modelado del sistema de producción y envasado de gaseosas, fue realizado en el software PIPE, este software provee un gestor de módulos de análisis, en el cual se encuentran diferentes métodos de análisis para los diferentes tipos de redes de Petri. Para analizar si la red cumple con las propiedades estructurales, se analiza la red mediante el análisis invariante y análisis de espacio de estados.

Con respecto al análisis invariante, el resultado de la matriz de transiciones invariantes indica que el marcado final es igual que el marcado inicial, lo que significa que la red de Petri es estructuralmente viva, quiere decir, que existe un marcado inicial para el que está viva, al cumplirse con esta propiedad se define que la red carece de puntos muertos sin importar la secuencia de disparo que se le otorgue.

El resultado de la matriz de transiciones invariantes demuestra que la red cumple con la propiedad de limitación, entonces, se dice que la red es k-limitada para un marcado inicial dado, por ende, todos sus lugares son k- limitados para ese marcado inicial, por lo tanto, la red de Petri modelada garantiza la finitud de sus marcados

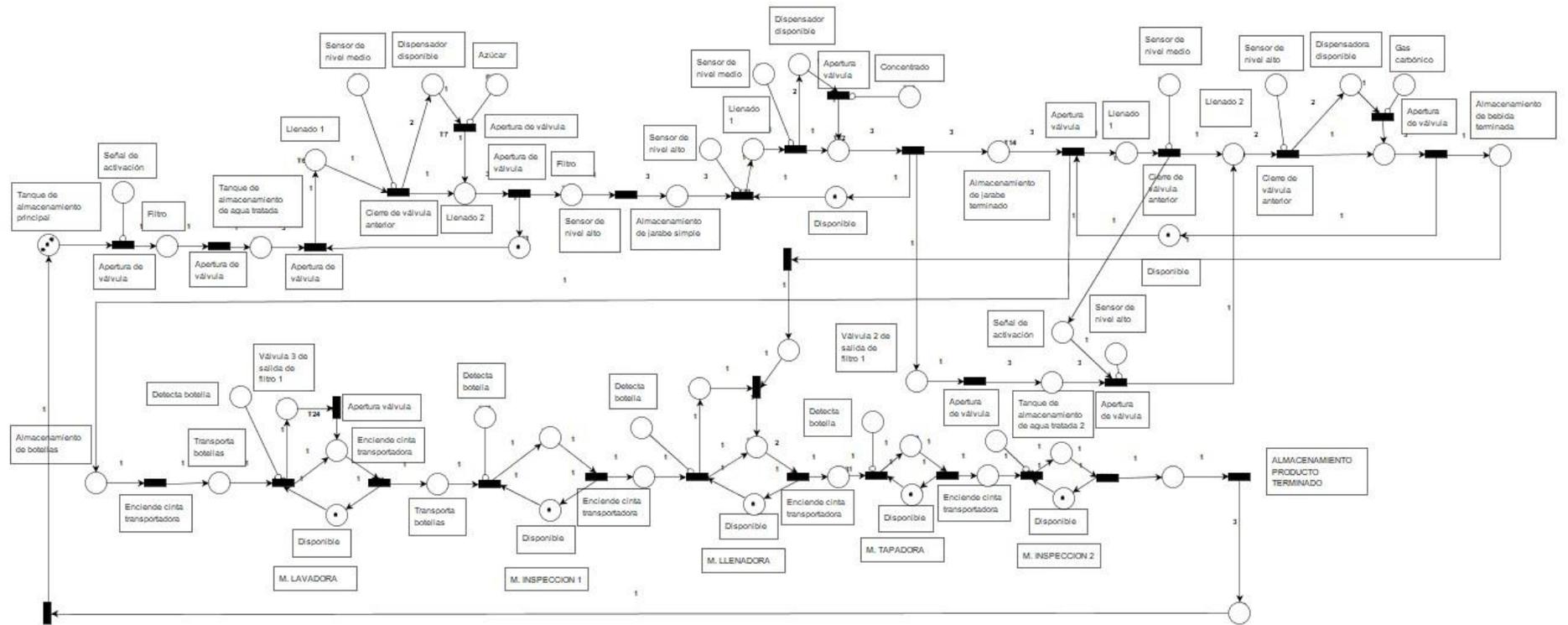


Figura 3. 30: Modelado del sistema de producción y envasado de gaseosa para análisis matemático  
Fuente: Autores.



alcanzables. Estas propiedades pueden hallarse desde la interpretación del resultado de la matriz de transiciones invariantes.

La interpretación de resultados de la matriz de lugares invariantes no resulto favorable para la red de Petri, el número total de tokens en el marcado inicial, ponderado por la matriz P-invariantes no es constante, esta matriz nos permite definir si la red cumple con la propiedad de limitación, pero dicha propiedad, fue analizada por la matriz de transiciones invariantes.

Mediante el módulo de análisis de espacio del gestor de análisis del software PIPE, se obtuvo que la red no posee puntos muertos, si es limitada o acotada y no es segura, al no ser segura indica que no todos los marcados posibles de los lugares poseen más de una marca, ya que por definición una red es segura es acotada a uno, lo que matemáticamente es (k-limitada).

#### **3.4. Metodología utilizada para la generación de código Ladder para el autómata programable.**

Para el desarrollo de los distintos modelos de sistema se usan herramientas como las redes de Petri que brindan la posibilidad de modelar procesos industriales de una manera correcta y segura. Los controladores lógicos programables normalmente supervisan sistemas de eventos discretos y trabajan con las redes de Petri, para lograr la implementación de la red de Petri en el PLC se establece una relación entre la red de Petri y la memoria del PLC, utilizando el lenguaje de diagrama escalera debido a que no todos los PLC poseen gráficos de función secuencial.

El modelado del sistema de producción y envasado de gaseosas se ha realizado en conjunto con la asignación de variables tanto de entrada como de salida para cada uno de los sensores y actuadores que forman parte del proceso. En el presente sistema, las entradas son los mandos de inicio y paro, mientras que las salidas son los sensores y actuadores debido a que estos elementos son representados en la maqueta simplificada mediante indicadores leds. Cada una de las variables del proceso, ya sea entrada o salida están asociadas con una dirección perteneciente al PLC y las memorias internas (marcas) deben de definirse para cada uno de los estados (lugares) de la red

de Petri, en la figura 4.1 se muestra la metodología utilizada para esta fase del proyecto, cada paso de esta metodología se detalla a continuación:

- Elaborar una tabla de variables donde se definen las entradas del proceso, el tipo de variable, la dirección del PLC y la descripción de las mismas.
- Elaborar una tabla donde se definen las salidas del proceso, el tipo de variable, la dirección del PLC y la descripción de las mismas.
- Elaborar una tabla donde se detalla cada estado de la red de Petri a la cual se le asigna una marca con las acciones que se cumplen dentro del modelado del sistema.
- Se separa la red de Petri por etapas donde cada etapa corresponde a una secuencia de marcas.
- En cada marca se definen los estados de las variables de entrada o salida del proceso establecidos en esa etapa del sistema.
- Las transiciones que conectan los estados se definen como condiciones necesarias a cumplir para pasar de una marca a otra.

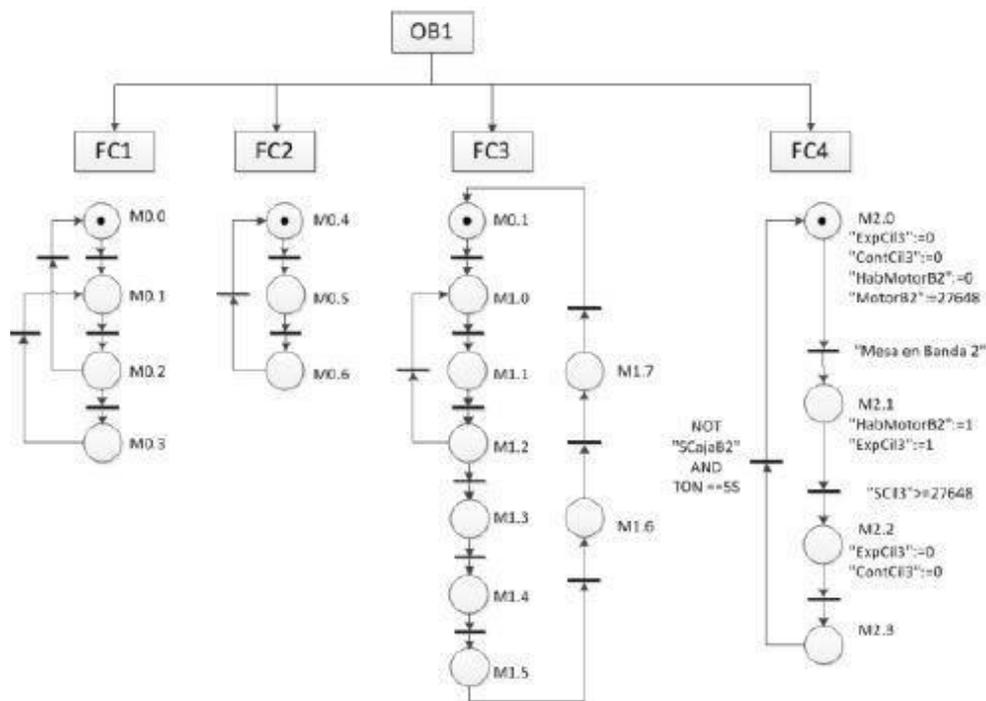


Figura 3. 32: Metodología utilizada para la generación de código Ladder para autómatas. Fuente:(Vásquez Salazar, Sarmiento Maldonado, & Muñoz Muñoz, 2016).

## **CAPÍTULO 4: PRESENTACIÓN DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN.**

En este capítulo se muestra un resumen de los resultados alcanzados al término de trabajo investigativo. Se presenta un análisis general del sistema, del modelado del sistema y de la implementación del mismo. Por otra parte, se realiza la discusión basada en las consideraciones iniciales y los resultados obtenidos al finalizar el proyecto.

### **4.1. Resultados del sistema de producción y envasado de gaseosas.**

Se presentan los resultados del presente trabajo investigativo en base a la información recopilada sobre redes de Petri y su aplicación en sistemas de eventos discretos, por lo cual, toda la teoría acerca de esta herramienta de diseño fue aplicada para modelar y validar el sistema por métodos de análisis matemáticos y mediante métodos gráficos. Un punto importante en este análisis de resultados fue la simulación realizada en el software Visual Object Net ++, en donde se pudo observar la dinámica del sistema.

#### **4.1.1. Resultados referentes al estado del arte.**

Se ha elaborado el estado del arte con el fin de recopilar información fundamental relacionada con el modelado de redes de Petri y los avances que se han dado hasta la actualidad con respecto a la utilización de esta herramienta. Para el desarrollo del presente proyecto se toma como base diferentes trabajos investigativos relacionados con la temática del proyecto, esto permitió abordar el tema de investigación aplicando metodologías y herramientas que resultan ser una ventaja al momento de ser aplicadas a este trabajo investigativo.

Dentro de todas las investigaciones realizadas, se resaltan las siguientes: “Las redes de Petri interpretadas en el diagnóstico de fallos de sistemas híbridos”, “Aplicación a un helicóptero no tripulado”, “Diseño de código PLC para control supervisorio local bajo un enfoque holárquico”, “Diseño de supervisorio inteligente de planta de bloque de construcción”, debido a que son investigaciones que demuestran la utilización de esta herramienta dentro de los diferentes tipos de sistemas.

#### **4.1.2. Resultados del sistema: descripción, características y funciones.**

Como parte del proceso del modelado del sistema de producción y envasado de gaseosas, ha sido necesario describir, caracterizar y definir las funciones principales del sistema. Este resultado ha permitido definir de forma muy detallada las características y el funcionamiento del sistema objeto de este estudio. Se considera esta fase del proyecto como parte fundamental para realizar el modelado del sistema con redes de Petri.

Cada etapa del proceso fue descrita de manera simplificada, los elementos característicos que son utilizados en las fábricas reales de este tipo de procesos se definieron de manera general. Esta caracterización cumple las condiciones necesarias que se requieren para el correcto funcionamiento del sistema. Al simplificar la descripción del sistema se redujo considerablemente el tamaño de la red de Petri, sin perder las funciones principales que cumple el sistema de producción y envasado de gaseosas.

Al realizar el análisis del funcionamiento de la planta de producción y envasado de gaseosas en la sección 3.2, se considera que es un sistema de eventos discretos donde las etapas que conforman al sistema trabajan recurrentemente, al realizar la simulación del modelado del sistema esta característica funcional, propia del sistema se resaltó al representar el proceso de una manera recurrente, se logró observar cómo evolucionan los estados del sistema con el tiempo, es decir la dinámica del sistema. El comportamiento en los estados se caracteriza por los límites determinados del sistema, los elementos que conforman el sistema y la relación entre ellos.

En las primeras pruebas del modelado los conflictos fueron notorios, debido a la falta de sincronización entre las etapas que realizan la elaboración de la bebida y la etapa de envasado, el sistema como tal, está formado de etapas secuenciales, por lo tanto, se debe de considerar el tiempo que tarda el proceso de una etapa con otra, para evitar colisiones.

El sistema está compuesto por dos etapas principales: la etapa de elaboración de jarabe y la etapa de envasado de gaseosa. En la etapa de envasado se considera que en cada uno de sus procesos (lavado de botellas, llenado, tapado, inspección) trabajan

con una botella al tiempo, en el modelado del sistema se observó una colisión al momento de transportar botellas hacia la máquina lavadora de botellas, como la máquina lava una botella a la vez, la cinta transportadora debe considerar el tiempo que demora la máquina en realizar su función sin acumular botellas antes de esta etapa del proceso.

En la etapa de elaboración de jarabe se debe considerar que ambos almacenamientos de agua tratada no son requeridos al mismo tiempo, el primer almacenamiento es necesario para iniciar el proceso de la siguiente etapa, pero el segundo almacenamiento de agua tratada es requerido después de dos etapas, por lo cual se debe realizar la sincronización entre esos procesos.

Se debe de considerar que el almacenamiento de bebida se va descargando conforme se estén llenando las botellas, esto implica que un proceso esta interconectado con otro, por lo tanto, el almacenamiento de bebida terminada debe llenarse constantemente. Este comportamiento del sistema lleva a concluir que la sincronización asegura el orden de ejecución de los procesos que están compartidos, y la interacción de un proceso con otro esto ayudara a evitar las colisiones.

En el modelado se considera las acciones de daño de una máquina, válvula o falta de materia prima en los almacenamientos debido a que estos eventos afectan a todo el sistema, independientemente en la etapa que se den, lo que conlleva a tomar ciertas consideraciones en la construcción del sistema mediante las cuales se puede minorizar el daño que estos eventos pueden provocar.

Por último, con las condiciones establecidas en la corrección del modelado, se realizó la implementación del sistema en la maqueta simplificada, donde se cumplen todas las funciones del sistema de producción y envasado de gaseosa y la función del SCADA realizada en Wonderware – InTouch.

#### **4.1.3. Resultados del análisis del modelado del sistema mediante diferentes métodos.**

El modelado del sistema de producción y envasado gaseosa con redes de Petri se analizó mediante el método de invariantes utilizando el software PIPE. Las bases matemáticas que conceptualizan este método de análisis permitieron realizar una interpretación de matrices de manera que, se determinó con éxito que la red cumple con las propiedades estructurales de vivacidad y limitación.

Al cumplir el sistema con la propiedad de vivacidad implica que todas las funciones del sistema están disponibles, esto quiere decir que el sistema está libre de bloqueos por lo tanto el sistema no va a tener ningún problema para desempeñarse correctamente. Por otro lado, la propiedad de limitación es la propiedad más importante durante el diseño de la red, esto determina el número máximo de estados que puede tener el sistema, puesto que si el número de marcas excede la capacidad de almacenamiento del sistema se puede tener como consecuencia desde una operación no deseada hasta el bloqueo del sistema.

El modelado del sistema también fue analizado por medio del módulo de análisis de espacio de la red, obteniendo las mismas propiedades del análisis de invariante, por lo tanto, se realizó el análisis de la red mediante dos métodos los cuales dieron resultados favorables para el modelado del sistema.

#### **4.1.4. Resultados de la validación del sistema.**

En la simulación del sistema no se presentaron colisiones, cada etapa del proceso se encontraba sincronizada, se realizaron las pruebas al añadir a la red las condiciones de perturbación (daño de máquina o válvula, falta de materia prima del sistema) en donde se observó que el sistema cumple con todas las consideraciones adecuadas para su seguridad, esto quiere decir que, debido a que el funcionamiento de una etapa depende de otra, se consideró que al presentarse un fallo o inconveniente en una etapa, se detienen las etapas anteriores, y la primeras etapas de la elaboración de jarabe y la etapa de lavado de botella, así se evita daño mayores en el sistema, en consecuencia a esto, se valida el modelado del sistema.

El modelado del sistema de producción y envasado de gaseosas con redes de Petri basados en el análisis de las propiedades se puede caracterizar como una red diseñada para cumplir todas las funciones del sistema al cumplir con la propiedad de vivacidad, y al ser una red limitada quiere decir que es una red finita por lo tanto el sistema no presenta ningún bloqueo o alguna operación no deseada.

#### **4.1.5. Resultados de la generación de código Ladder en la maqueta simplificada del proceso.**

El desarrollo del código de programación en lenguaje Ladder para el autómata se estableció a partir del modelado del sistema en redes de Petri aplicando la metodología detallada en la sección 3.4, esta metodología permitió conseguir una programación estructurada, ordenada y sintetizada, debido a que se fundamenta en la relación entre el modelado de la red de Petri del sistema y la memoria del autómata.

## **4.2. Discusión de resultados**

En esta sección se realiza la interpretación de los resultados obtenidos en el presente trabajo de investigación, verificando las fases conceptuales, metodológicas y empíricas de la misma para la identificación de los factores que han podido influir en los resultados.

### **4.2.1. Análisis de las características y funciones del sistema.**

Las características del sistema (sensores, actuadores, válvulas, almacenamientos, entre otros elementos del sistema), fueron considerados en base a la descripción del proceso, los elementos caracterizados enlazados entre si son capaces de cumplir las funciones establecidas del sistema.

El sistema se logró representar con éxito mediante la herramienta de redes de Petri, la relación de los elementos que forman parte de cada etapa del sistema y los elementos que conforman una red de Petri permiten facilidad al modelar sistemas de eventos discretos, logrando una interpretación completa sobre la dinámica del funcionamiento del sistema.

Al caracterizar el sistema inicialmente se estableció que en el sistema, las etapas de lavado y elaboración de gaseosa empezaban su funcionamiento al mismo instante, al realizar la simulación del modelado, se observó que la falta de sincronismo en la interconexión de una etapa con otra provoca colisiones en el sistema, esto llevó

a realizar unas modificaciones en el análisis del funcionamiento , interconectando un sistema con otro de manera secuencial teniendo como resultado la sincronización del mismo. Esta parte del trabajo investigativo permite concluir que el modelado de sistemas de eventos discretos recurrentes con redes de Petri evita colisiones en el sistema.

Al realizar la simulación del sistema se hicieron pruebas para observar el comportamiento ante diferentes tipos de perturbaciones, esto permitió hacer un modelado más completo, estableciendo las acciones que debe de tomar el sistema para evitar daños mayores dentro del sistema. En base a este resultado se afirma que las redes de Petri permiten evitar colisiones o conflictos en la red, además permite considerar en el modelado perturbaciones que puede afectar la dinámica del sistema, problemas imprevistos que no se pudieron detectar durante el modelado y ofrecer soluciones sin tener la necesidad de realizar cambios considerables a la red, o reestructurarla totalmente.

Por último, este trabajo se pudo evidenciar al realizar la maqueta simplificada del sistema, con respecto a la programación del autómat, no se presentaron inconvenientes puesto que la metodología utilizada permite la estructuración del código dando como resultado la representación de cada proceso del sistema demostrando la validez del modelado realizado en redes de Petri. Para la elaboración de la interfaz no se presentaron inconvenientes debido al dominio del funcionamiento y las características principales del sistema.

#### **4.2.2. Cumplimiento de los objetivos**

En la siguiente sección se detallarán los cumplimientos de los objetivos tanto específicos como el general, los cuales fueron planteados al inicio del trabajo investigativo.

##### **4.2.2.1. Objetivo general**

Se consiguió realizar el análisis de la contribución de las Redes de Petri, en aplicaciones de automatización industrial para el modelado de sistemas de eventos discretos y algoritmos de control, que permita la simulación, validación y generación de código para autómatas programables en un sistema de producción y envasado de gaseosas, el mismo que será implementado en una maqueta simplificada. El análisis

del modelado del sistema de producción y envasado de gaseosas se desarrolló de manera exitosa obteniendo resultados positivos en las pruebas realizadas mediante los distintos softwares utilizados.

#### **4.2.2.2. Objetivos específicos**

Se logró analizar de manera segura y exitosa las principales características y ventajas que representa utilizar la herramienta de redes de Petri para el estudio y modelado de los diferentes procesos industriales, se aplicó los diferentes métodos de análisis de propiedades dinámicas verificando de esta manera la veracidad del modelo planteado. Se consiguió el funcionamiento correcto del diseño de un prototipo simplificado del sistema de producción y envasado de gaseosas utilizando un autómatas programable e indicadores leds que simulan el proceso, supervisado a través de una interfaz de usuario. Y por último a partir del modelamiento de la red de Petri se logró definir una metodología que generó el código de programación en lenguaje Ladder para autómatas programables.

#### **4.2.3. Análisis de la metodología**

La metodología planteada, tanto la bibliográfica como la analítica, han sido extensamente utilizadas en el desarrollo del trabajo. La metodología bibliográfica permitió realizar una recopilación de los materiales bibliográficos adyacentes al tema de investigación, los cuales permitieron elaborar un trabajo estructurado con bases teóricas sólidas, para elaborar un estudio analítico de la cada etapa del proceso. Se inicializo con una exhaustiva búsqueda bibliográfica sobre el sistema a estudiar simplificando el análisis del proceso con la finalidad de ser ajustado al objetivo de la investigación, seguido de un análisis sobre la herramienta utilizada para el modelado del sistema, aplicando metodologías utilizadas en estudios afines con la temática del proyecto de investigación. Por lo tanto, se puede establecer que la metodología utilizada fue seleccionada correctamente, mediante la cual se logró cumplir cada objetivo del proyecto de investigación.

#### **4.2.4. Análisis de la hipótesis**

Al término del trabajo de investigativo se logró modelar el sistema de producción y envasado de gaseosa como un sistema de eventos discretos concurrentes con redes de Petri, donde a partir del modelado se obtuvo reflejar colisiones y conflictos debido a la falta de sincronización entre las etapas del proceso, obteniendo así un modelado del sistema sincronizado donde se cumple la funcionalidad del sistema. El modelado del sistema fue validado por el método de invariantes, el cual comprobó que el sistema cumple con las funciones establecidas y es un sistema libre de bloqueos, esto quiere decir que durante su la ejecución no presenta bloqueos de un proceso a otro proceso. Finalmente, el modelado de redes de Petri permitió la generación de código Ladder para el autómata programable mediante la metodología explicada en la sección 3.4, por estas razones se puede concluir que la hipótesis planteada se cumplió en el presente trabajo de investigación.

#### **4.2.5. Análisis de la solución del problema.**

Este proyecto resalta la ventaja que presenta el utilizar redes de Petri para determinar el comportamiento dinámico de un sistema de eventos discretos, capaz de modelar, analizar, diseñar, validar algoritmos, realizar pruebas y procedimientos de automatización para la resolución de problemas de sincronización e interacción entre las máquinas automatizadas y evitar que produzcan colisiones en el sistema de producción y envasado de gaseosas, presentando una solución a la problemática donde no se pueden modelar sistemas de eventos discretos con el modelamiento matemático clásico, invitando al estudiante a conocer otras herramientas para abordar el estudio de este tipo de sistemas.

#### **4.3. Discusión final.**

Se soluciono el problema planteado, los objetivos permitieron la solución del problema. La red de Petri generada permite modelar satisfactoriamente el sistema. El modelo generado permite detectar problemas de colisiones y sincronismo.

El modelado del sistema de producción y envasado de gaseosas se realizó con éxito, con esto se invita a los estudiantes de la carrera de Ingeniería Electrónica en

control y automatismo a estudiar este tipo de herramientas útil para modelar, analizar y validar el modelo planteado, permitiendo la generación de código Ladder para autómatas programables, cabe recalcar que las redes de Petri son utilizadas en otras áreas afines con la misma utilidad por lo tanto su interpretación ayuda sistematizar distintos lenguajes de programación con ayuda de otras metodologías.

En la actualidad las redes de Petri son utilizadas para diseñar sistemas supervisorios con detección de fallos entre otras diversidades de sistemas, mediante las extensiones de las redes de Petri se modelan sistemas continuos, híbridos, temporizados, entre otros.

## **CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.**

### **5.1. Conclusiones.**

El autor (Drake, 2008) manifiesta que "El éxito de un método de modelado es consecuencia de su capacidad de modelar y de la capacidad de análisis". Una vez finalizado el trabajo de titulación y cumplido los objetivos, se llega a las siguientes conclusiones:

- Durante la realización del presente trabajo investigativo relacionado con el modelado del sistema de producción y envasado de gaseosas, se pudo comprobar que las redes de Petri permiten el modelado de sistemas de eventos discretos concurrentes y que a través del análisis de la red se puede generar de forma sistemática el lenguaje de programación Ladder destinada al autómata programable.
- El método gráfico que posee las redes de Petri, apoyado por simuladores permitió elaborar el modelo gráfico del sistema de producción y envasado de gaseosas. Estos modelos (son algunos debido a que se trabajó con subsistemas) resultaron eficientes, versátiles y desarrollados en corto tiempo gracias a las interfaces amigables del software. El análisis gráfico del sistema mediante distintos métodos en donde se determina el cumplimiento de varias propiedades fundamentales que formalizan un sistema.
- En el análisis de la red de Petri que se realizó mediante el software Visual Object Net ++ y PIPE se evidenció la funcionalidad y versatilidad de los modelos desarrollados. Estas plataformas virtuales cumplen las propiedades y el rigor matemático de las redes de Petri, por lo que son útiles y sus resultados son válidos, en el análisis de un sistema de eventos discretos.
- El modelado basado en la red de Petri facilita la detección de problemas de sincronismo y colisiones en sistemas discretos, debido a que utiliza representaciones gráficas del sistema, lo que permite visualizar con claridad la dinámica de los eventos que se generan en el sistema, y analizar el

comportamiento del sistema bajo determinadas condiciones, y a partir de ahí generar soluciones a diferentes situaciones.

- El modelado de sistemas de eventos discretos concurrentes, debe ser modelados mediante herramientas con formalismos matemáticos sólidos como las redes de Petri, tal como lo exige la academia y el rigor en la investigación científica. El uso de modelamientos matemáticos clásicos no representa una herramienta adecuada debido a las limitaciones que posee al actuar sobre sistemas de eventos discretos concurrentes.

## **5.2. Recomendaciones**

El desarrollo de este trabajo de investigación y los problemas que han surgido durante su elaboración, dan lugar a que se establezcan las siguientes recomendaciones.

- Es necesario desarrollar adecuadamente el estado del arte según el tema que corresponda, pues esto permite que se disponga de material y bases necesarias para iniciar con el trabajo investigativo.
- Se recomienda el uso de herramientas tales como Visual Object Net ++ y PIPE, que se ajustan a las reglas matemáticas de redes de Petri y permiten la simulación gráfica de los sistemas de eventos discretos concurrentes.
- El modelado gráfico utilizando las redes de Petri, ayudan a determinar colisiones, permiten la sincronización entre varios sistemas, por lo que se recomienda su uso, tanto para sistemas sencillos como aquellos sistemas de mayor complejidad.
- Para realizar el análisis del modelado del sistema propuesto, se recomienda subdividir el sistema en partes más sencillas y abordarlas desde esas instancias.

- Se recomienda la herramienta PIPE, puesto que es un software que permite realizar análisis matemáticos y gráficos, este software cuenta con un gestor de módulos de diferentes tipos de análisis entre ellos análisis invariante, árbol de cobertura, incidencia y marcado entre otros módulos que permiten verificar si la red cumple con ciertas propiedades estructurales y de comportamiento.
- El software visual Object a diferencia del software pipe no consta con módulos gestores de análisis de la red, pero permite observar la dinámica del sistema ayudando observar colisiones y conflictos en el modelado, permite también el diseño de redes continuas y temporizadas.
- Al realizar una estructura de programación para un sistema de eventos discretos concurrentes no solo se deben estructurar condiciones para codificar el sistema, se recomienda estudiar, modelar, caracterizar, el sistema con este tipo de herramientas que ayuden a observar la dinámica del sistema antes de ser implementado, no solo nos ofrece la posibilidad de evitar colisiones y conflictos, nos ayudan a asegurar el sistema frente a fallos inesperados, ayudando a la generación del código a partir del modelado, realizando una programación más estructurada, sintetizada y ordenada.

### **5.3. Trabajo futuro**

Para desarrollar modelos que se acerquen más a la realidad, considerando más aspectos de los establecidos en este trabajo se recomienda modelar esta red mediante otras extensiones de redes de Petri, híbridas, temporizadas, GHENeSys, mediante las cuales se puede conseguir representar la dinámica del modelo de una manera más eficiente.

Se sugiere analizar este tipo de redes por el método de análisis de síntesis y reducción, ya que el tamaño de la red es grande, mediante este método se puede analizar más propiedades de la red de Petri, de esta manera, según dicho análisis puede aumentar o disminuir la confiabilidad de la red.

En el análisis del modelado del sistema de producción y envasado de gaseosa que se realizó, se simuló la falla de una válvula y de una máquina, además se consideró que existe una falta de flujo de agua en el almacenamiento principal, así como la falta de botellas en su respectivo almacenamiento.

La teoría estudiada y el trabajo de investigación realizado, pueden ser utilizados e implementados en las materias de automatismo para los estudiantes de la carrera de Ingeniería electrónica en control y automatismo, de esta manera se reforzará el conocimiento de los estudiantes acerca del modelado de los sistemas de eventos discretos.

## BIBLIOGRAFÍAS.

- [1] Aguilera Martínez, P. (2002, junio). *Programación de PLC'S*. Universidad Autónoma de Nuevo León, San Nicolás de los Garza-México. Recuperado a partir de <http://eprints.uanl.mx/919/1/1020148252.PDF>
- [2] Aguirre Paredes, A. F. (2016). *ESTUDIO, DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA AUTOMATIZADO PARA UNA MÁQUINA TORSIONADORA DE FORJA EN FRÍO*. ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO, RIOBAMBA-ECUADOR. Recuperado a partir de <http://dspace.espoch.edu.ec/bitstream/123456789/6035/1/108T0170.pdf>
- [3] Arias Toapanta, M. V. (2013). *Diseño e implementación de un módulo didáctico en automatización industrial aplicando buses de campo para la empresa Ecuainsetec*. Universidad Politécnica Salesiana Sede Quito, Quito. Recuperado a partir de <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/6548/1/UPS-KT00060.pdf>
- [4] Automación Micromecánica S.A.I.C. (2009). *Controlador Lógico Programable (PLC)*. Recuperado a partir de <http://www.microautomacion.com/capacitacion/Manual061ControladorLgicoProgramablePLC.pdf>
- [5] Basilio, J. C., Carvalho, L. K., & Moreira, M. V. (2010). *DIAGNOSE DE FALHAS EM SISTEMAS A EVENTOS DISCRETOS MODELADOS POR AUTÔMATOS FINITOS*, 21(5), 24.
- [6] Betancourt Safla, L. O. (2015, mayo). *Diseño e Implementación de un Sistema Scada utilizando el Software InTouch con Red de Comunicación Ethernet para la Planta Liofilizado para la Compañía de Elaborados de Cadé «El Café C.A»*.

- Universidad Politécnica Salesiana sede Guayaquil, Guayaquil-Ecuador.  
 Recuperado a partir de  
<http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/10439/1/UPS-GT001534.pdf>
- [7] Bradley, A., & Software, R. (2008). *Texto Estructurado de los Controladores Logix5000*. Recuperado a partir de  
[http://www.infopl.net/files/descargas/rockwell/infopl\\_net\\_1756\\_pm007\\_en\\_p.pdf](http://www.infopl.net/files/descargas/rockwell/infopl_net_1756_pm007_en_p.pdf)
- [8] Cervantes Canales, J. (2005, marzo). *Representación y Aprendizaje de Conocimiento con Redes de Petri Difusa*. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional., México. Recuperado a partir de <http://www.ctrl.cinvestav.mx/~yuw/pdf/MaTesCCJ.pdf>
- [9] Chacón, E., & Indriago, M. (2008). *Modelo y Simulación de Sistemas Híbridos en Procesos Industriales*. Recuperado a partir de  
[https://www.researchgate.net/publication/275151913\\_Modelo\\_y\\_Simulacion\\_de\\_Sistemas\\_Hibridos\\_en\\_Procesos\\_Industriales](https://www.researchgate.net/publication/275151913_Modelo_y_Simulacion_de_Sistemas_Hibridos_en_Procesos_Industriales)
- [10] Chen, M. (2005). VON: Visual Object Net++. Recuperado a partir de  
[https://www.techfak.uni-bielefeld.de/~mchen/BioPNML/Intro/VON.html#6.\\_Visual\\_Object\\_Net\\_](https://www.techfak.uni-bielefeld.de/~mchen/BioPNML/Intro/VON.html#6._Visual_Object_Net_)
- [11] Controlled Discrete Event Systems. (1997). *Journal of Discrete Event Dynamic Systems*, 7.
- [12] DELTA. (2009). *Manual de Operación*. Recuperado a partir de  
[http://www.delta.com.tw/product/em/control/plc/download/manual/DVP-ES2\\_EX2\\_SS2\\_SA2\\_SX2-Program\\_O\\_SP\\_20110630.pdf](http://www.delta.com.tw/product/em/control/plc/download/manual/DVP-ES2_EX2_SS2_SA2_SX2-Program_O_SP_20110630.pdf)
- [13] Desel, J., & Esparza, J. (1995). *Free Choice Petri Nets*. Gran bretaña.

- [14] Drake, J. (2008). Programacion concurrente y distribuida. Recuperado a partir de [https://www.ctr.unican.es/asignaturas/procodis\\_3\\_ii/doc/procodis\\_5\\_02.pdf](https://www.ctr.unican.es/asignaturas/procodis_3_ii/doc/procodis_5_02.pdf)
- [15] DZ Gear Motor. (2012). DZ Gear Motor, Model Description. Recuperado a partir de [http://www.dzgearmotor.com/product/Vertical\\_mounted\\_AC\\_Gear\\_motor.pdf](http://www.dzgearmotor.com/product/Vertical_mounted_AC_Gear_motor.pdf)
- [16] Embonor S.A. (2013). Proceso Productivo. Recuperado a partir de <http://www.embonor.cl/wps/wcm/connect/31b0b46a-e1e1-482a-aefd-2363b95affbf/proceso-produccion.pdf?MOD=AJPERES>
- [17] Endress Hauser. (2016, enero 1). Technical Information Micropilot. Recuperado a partir de [https://cms.esi.info/Media/documents/78160\\_1478261788450.pdf](https://cms.esi.info/Media/documents/78160_1478261788450.pdf)
- [18] Fattori, C. C., Kano, C. H., Junqueira, F., & Miyagi, P. E. (2012, julio 30). *Rede de Petri e o aplicativo Platform Independent Petri net Editor (PIPE)*. Escuela Politécnica de la Universidad de Sao Paulo, Sao Paulo-Brasil. Recuperado a partir de <https://edisciplinas.usp.br/mod/resource/view.php?id=1551385>
- [19] Flores Rodríguez, C. P., & Cerón Aguirre, O. E. (2006). *Análisis de un sistema de eventos discretos mediante redes de petri*. Escuela Politécnica Nacional, Quito. Recuperado a partir de <http://biblioteca.epn.edu.ec/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=7526>
- [20] Foyo Valdés, S. A., Puga Velazquez, E. S., & Hernández Martinez, E. G. (2010). Modelado y Control de una Celda Automatizada de Manufactura Flexible basado en Redes de Petri. *2010*, 6.

- [21] García Moreno, E. (2001). *Automatización de Procesos Industriales*. México: ALFAOMEGA GRUPO EDITOR. Recuperado a partir de [https://gdocu.upv.es/alfresco/service/api/node/content/workspace/SpacesStore/ba85b785-46cb-49e6-a006-a8626d4177e1/TOC\\_4116\\_01\\_01.pdf?guest=true](https://gdocu.upv.es/alfresco/service/api/node/content/workspace/SpacesStore/ba85b785-46cb-49e6-a006-a8626d4177e1/TOC_4116_01_01.pdf?guest=true)
- [22] González, V. (2004, enero). *GRAF CET*. España. Recuperado a partir de [http://isa.uniovi.es/docencia/iea/teoria/grafcet\\_transparencias.pdf](http://isa.uniovi.es/docencia/iea/teoria/grafcet_transparencias.pdf)
- [23] Granda, M. (2012). Redes de Petri: Definición, formalización y ejecución.
- [24] Jiménez, R. (2003). Control Lógico y Controladores Lógicos Programables. Recuperado a partir de <http://materias.fi.uba.ar/7565/U4-Control-logico-y-controladores-logicos-programables.pdf>
- [25] Katz, R., & Kofman, E. (2001). Análisis y control de sistemas de eventos discretos: de redes de Petri temporizadas al álgebra.
- [26] Llorens Agost, L. M. (2003). *Redes reconfigurables. Modelización y verificación*. Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Sistemas informáticos y computación., Valencia.
- [27] LOGITEK S.A. (2007). Introducción InTouch V7.1. Recuperado a partir de [http://www.disinel.com/disinel%20web/Downloads/Manuales/CURSILLO\\_7\\_1.pdf](http://www.disinel.com/disinel%20web/Downloads/Manuales/CURSILLO_7_1.pdf)
- [28] Maza Cabello, A. C. (2009, enero). *Diseño de un Sistema Experto para el Enderezado de Chasis en Frío*. Universidad de las Américas Puebla, Cholula, Puebla, México. Recuperado a partir de [catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/lmt/maza\\_c\\_ac/](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lmt/maza_c_ac/)

- [29] Medina, R. (2008, agosto). Lenguajes de Programación. Recuperado a partir de <http://ramonmedina.name/files/universidad/plc/plc0006.pdf>
- [30] Merino Peña, J., & Moscoso Coello, C. (2007). *Automatización del proceso del líquido en la elaboración de bebidas gaseosas*. ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL, Guayaquil-Ecuador. Recuperado a partir de [https://scholar.google.es/scholar?q=utomatizaci%C3%B3n+del+proceso+del+liquido+en+la+elaboracion+de+bebidas+gaseosas+merino+pe%C3%B1a&btnG=&hl=es&as\\_sdt=0%2C5](https://scholar.google.es/scholar?q=utomatizaci%C3%B3n+del+proceso+del+liquido+en+la+elaboracion+de+bebidas+gaseosas+merino+pe%C3%B1a&btnG=&hl=es&as_sdt=0%2C5)
- [31] Morales Ruíz, C. E., & Gavilánes Carrion, J. J. (2013). *Diseño e Implementación de una HMI para el Control y Supervisión del Módulo Electroneumático Didáctico de la Escuela de Ingeniería Electrónica en Control y Redes Industriales*. Escuela Superior Politécnica del Chimborazo, Riobamba-Ecuador. Recuperado a partir de <dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/2808/1/108T0034.pdf>
- [32] Mosquera Arce, S. J., & Vivas Montoya, J. M. (2007, julio). *Aplicación de las Redes de Petri al Control de un Ascensor Automático*. Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira-Colombia. Recuperado a partir de <https://www.google.com.ec/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwiA7qLU2tfUAhXDZCYKHZizBwEQFggSMAE&url=http%3A%2F%2Frepositorio.utp.edu.co%2Fdspace%2Fbitstream%2F11059%2F1083%2F1%2F6298M912.pdf&usg=AFQjCNFyGurwMAaOBThcnsRjtpVwfaySQ>
- [33] Murata, Tadao. (1989). Petri Nets: Properties, Analysis and Applications., 77(4), 40.

- [34] Murillo, L. D. (2008). Redes de Petri: Modelado e implementación de algoritmos para autómatas programables. *4, 21*, 102-125.
- [35] OPTEX FA CO. (2016). D SERIES Laser Sensor type. Recuperado a partir de [www.optex-fa.cn/getfile.aspx?id=543](http://www.optex-fa.cn/getfile.aspx?id=543)
- [36] Ordaz Cassá, J. (2005, junio). *Automatización de Procesos Industriales*. Universidad Pontificia Comillas, Madrid-España. Recuperado a partir de <https://www.iit.comillas.edu/pfc/resumenes/42bbf80238332.pdf>
- [37] Orozco Gutiérrez, Á. Á., Guarnizo Lemus, C., & Holguín Londoño, M. (2008). *Automatismos Industriales*. Pereira-Colombia. Recuperado a partir de [https://www.researchgate.net/profile/Cristian\\_Guarnizo2/publication/266244394\\_Automatismos\\_Industriales/links/54e50e990cf276cec1730b61/Automatismos-Industriales.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Cristian_Guarnizo2/publication/266244394_Automatismos_Industriales/links/54e50e990cf276cec1730b61/Automatismos-Industriales.pdf)
- [38] Páez Logreira, H. D., Zamora Musa, R., & Bohórquez Pérez, J. (2015). Programación de Controladores Lógicos (PLC) mediante Ladder y Lenguaje de Control Estructurado (SCL) en MATLAB., *24(39)*, 11.
- [39] Páez Logreira, H., Zabala Campo, V., & Zamora Musa, R. (2015). Análisis y actualización del programa de la asignatura Automatización Industrial en la formación profesional de ingenieros electrónicos., *7*.
- [40] Palma Pozo, L. F., & Sangopanta Ardila, S. E. (2011). *Diseño de un PLC con Microcontrolador PIC 16F873*. Universidad de Pinar del Río, Latacunga - Ecuador. Recuperado a partir de <http://repositorio.utc.edu.ec/bitstream/27000/1049/1/T-UTC-1272.pdf>
- [41] Pérez Robles, J. E. (2010, mayo). *Síntesis e implementación de supervisores discretos, en el marco de Ramadge- Wonham, en una aplicación industrial y en teoría de juego*. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores

- de Monterrey, Monterrey-México. Recuperado a partir de <https://repositorio.itesm.mx/ortec/handle/11285/570001>
- [42] Pertiga. (2016). Instalaciones Electrotécnicas - Principios Básicos de la Automatización. Recuperado a partir de <http://www.pertiga.es/pdf/ie/ie34.pdf>
- [43] Pina Benitez, I., Sicchar Vilchez, R., Sanz Perez, M., & Tamayo Pacheco, J. (2014). Diseño de Supervisorio Inteligente de Planta de Bloques de Construcción, 8.
- [44] Pinatoja Ilbay, J. L., & Cushquicullma Colcha, C. J. (2013). *Diseño e Implementación de una Estación para la Clasificación de Émbolos*. ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO, Riobamba- Ecuador. Recuperado a partir de <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/2906/1/108T0067.pdf>
- [45] Quezada Quezada, J. C., Flores García, E., Bautista López, J., & Quezada Aguilar, V. (2014). Diseño e implementación de un sistema de control y monitoreo basado en HMI-PLC para un pozo de agua potable. *Marzo 2014*, 15(1), 10.
- [46] R., D., & H., A. (1992). *Petri Nets and Grafcet - Tools for modelling Discrete Event Systems*. New York: Prentice hall.
- [47] Ramírez Cortés, C. (2001, junio). Controladores Lógicos Programables. Recuperado a partir de [http://www.infoplC.net/files/documentacion/automatas/infoPLC\\_net\\_apunte\\_plc.pdf](http://www.infoplC.net/files/documentacion/automatas/infoPLC_net_apunte_plc.pdf)
- [48] Ramírez, M., & Colina, E. (2014). Sistema Supervisor Inteligente para Procesos de Producción de Petróleo, 12.

- [49] Recalde, L., Silva, H., Ezpeleta, J., & Teruel, E. (2004). Petri nets and manufacturing systems: An examples - driver tour. *Lectures on concurrency and Petri Nets Lecture Notes in Computer science*, 3098.
- [50] Rockwell Automation. (2008, julio). MICROLOGIX™. Una familia de controladores Micro para toda aplicación y presupuesto. Recuperado a partir de [http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/br/1761-br006\\_-es-p.pdf](http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/br/1761-br006_-es-p.pdf)
- [51] Rodríguez Flores, P. C. (2006). Análisis de un sistema de eventos discretos mediante redes de petri. Recuperado a partir de <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/493>
- [52] Rojas Lujan, P. E. (2002). *Planeamiento de la Producción de Bebidas Gaseosas mediante la Simulación*. Universidad Nacional Mayor San Marcos, Lima-Perú. Recuperado a partir de [http://cybertesis.unmsm.edu.pe/bitstream/cybertesis/842/1/Rojas\\_lp.pdf](http://cybertesis.unmsm.edu.pe/bitstream/cybertesis/842/1/Rojas_lp.pdf)
- [53] Sanz, M. (2013, junio). *Las Redes de Petri como herramienta formal en el diseño de sistemas de automatización integrada*. Área: Automática Santiago de Cuba.
- [54] Solís Quisíyupanqui, L. H., & Carpera Del Pozo, M. J. (2010). PROTOTIPO DE UN SELECTOR AUTOMÁTICO DE MATERIALES Y COLORES. *2010*, 7.
- [55] TECNOVIN SRL. (2008). Bomba Bicilíndrica Beta. Recuperado 15 de agosto de 2017, a partir de <http://www.tecnovin.com.ar/bombas.html>
- [56] Torres, F., & Jara, C. (2011). *Autómatas Programables I*. España. Recuperado a partir de

[https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/18436/1/Tema%206\\_%20Automatas%20I.pdf](https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/18436/1/Tema%206_%20Automatas%20I.pdf)

- [57] Torres, L., & Hernández, P. (2003, noviembre). Tutorial de Wonderware Orientado al Laboratorio de Control de Procesos. Recuperado a partir de [https://uvirtual.unet.edu.ve/file.php/500/INTOUCH/TUTORIAL\\_INTOUCH\\_D.pdf](https://uvirtual.unet.edu.ve/file.php/500/INTOUCH/TUTORIAL_INTOUCH_D.pdf)
- [58] Torres Zambrano, J. K. (2005). PLC - Controladores Lógicos Programables. Recuperado a partir de <http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/3124/5/TorresZambranoJennyKatherine2016Anexo.3.pdf>
- [59] Trigos Martínez, M. A. (2016, enero). *Las Redes de Petri Interpretadas en el Diagnóstico de Fallos de Sistemas Híbridos. Aplicación a un Helicóptero no Tripulado*. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, ESPAÑA. Recuperado a partir de [http://oa.upm.es/39632/1/MIGUEL\\_ANGEL\\_TRIGOS\\_MARTINEZ.pdf](http://oa.upm.es/39632/1/MIGUEL_ANGEL_TRIGOS_MARTINEZ.pdf)
- [60] UNED. (2011). Controladores Industriales Inteligentes. Recuperado a partir de [http://www.ieec.uned.es/investigacion/Dipseil/PAC/archivos/Informacion\\_de\\_referencia\\_ISE6\\_1\\_2.pdf](http://www.ieec.uned.es/investigacion/Dipseil/PAC/archivos/Informacion_de_referencia_ISE6_1_2.pdf)
- [61] UNED. (2011). Controladores Industriales Inteligentes. Controladores Lógicos Programables (PLC). Recuperado a partir de [http://www.ieec.uned.es/investigacion/Dipseil/PAC/archivos/Informacion\\_de\\_referencia\\_ISE6\\_1\\_1.pdf](http://www.ieec.uned.es/investigacion/Dipseil/PAC/archivos/Informacion_de_referencia_ISE6_1_1.pdf)

- [62] Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires. (2008, junio 24). Descripción de Lenguajes, Lista y de Contactos. Recuperado a partir de <http://www.exa.unicen.edu.ar/catedras/tldcaut/Software%20Lenguajes%20LD%20y%20IL.pdf>
- [63] Vallejo D, H. (2005). PLC. Los Controladores Lógicos Programables. *166*, 6(7), 11.
- [64] Vásquez Salazar, R. D., Sarmiento Maldonado, H. O., & Muñoz Muñoz, D. S. (2016). Propuesta de implementación de plantas virtuales para la enseñanza de control lógico., 6.
- [65] Velasco Delgado, O., Perez Sandoval, M., & Flores Marulanda, J. (2014). Diseño y construcción de una estación de clasificación automática con visión de máquina., *17*(32), 13.
- [66] Vergara Diaz, I. A. (2014). *Modelado de sistemas físicos a través de redes de petri para evaluar propiedades en diagnóstico de fallas*. Universidad Austral de Chile, Valdivia.
- [67] Wonderware. (2010). InTouch 10.0 HMI de Wonderware. Recuperado a partir de <http://www.meditecna.com/pdfs/Wonderware%20InTouch%2010.pdf>

## ANEXOS

**Anexo A:** Tabla de nomenclatura de los elementos del sistema de producción y envasado de gaseosas.

NOMENCLATURA	ELEMENTO
Almacenamientos	
AB	Almacenamiento de botellas
APT	Almacenamiento de producto terminado
Bombas	
B1	Bomba del tanque de almacenamiento de agua principal
B2	Bomba del tanque de almacenamiento de agua tratada 1
B3	Bomba del tanque de almacenamiento de agua tratada 2
B4	Bomba del tanque de almacenamiento de jarabe simple
B5	Bomba del tanque de almacenamiento de jarabe terminado
B6	Bomba del tanque de almacenamiento de bebida terminada
Dispensadoras de materia prima	
DA	Dispensador de azúcar
DC	Dispensador de concentrado
DG	Dispensador de gas carbónico
Filtros	
F1	Banco de filtros para tratamiento de agua
F2	Filtro para tratamiento de jarabe simple
Máquinas utilizadas en las diferentes etapas del sistema	
CA	Carbonatador utilizado para la realizar la bebida terminada
MI1	Máquina de inspección de botellas lavadas
MI2	Máquina de inspección de botellas llenadas y tapadas
ML	Máquina de lavado de botellas
MLL	Máquina llenadora de botellas
MT	Máquina tapadora de botellas
M1	Mezcladora 1 utilizada para realizar el jarabe simple
M2	Mezcladora 2 utilizada para realizar el jarabe terminado
Sensores de nivel	
LSH1	Sensor de nivel alto 1 ubicado en el TA1
LSH2	Sensor de nivel alto 2 ubicado en el TA2
LSH3	Sensor de nivel alto 3 ubicado en el TA3
LSH4	Sensor de nivel alto 4 ubicado en el TA4
LSH5	Sensor de nivel alto 5 ubicado en el CA
LSH6	Sensor de nivel alto 6 ubicado en el TA5
LSM1	Sensor de nivel medio 1 ubicado la mezcladora 1
LSM2	Sensor de nivel medio 2 ubicado la mezcladora 2
LSM3	Sensor de nivel medio 3 ubicado en el Carbonatador
Sensores de presencia	
SP1	Sensor de presencia ubicado en la ML

SP2	Sensor de presencia ubicado en la MI1
SP3	Sensor de presencia ubicado en la MLL
SP4	Sensor de presencia ubicado en la MT
SP5	Sensor de presencia ubicado en la MI2
Tanques de Almacenamientos	
TA1	Tanque de almacenamiento de agua tratada 1
TA2	Tanque de almacenamiento de agua tratada 2
TA3	Tanque de almacenamiento de jarabe simple
TA4	Tanque de almacenamiento de jarabe terminado
TA5	Tanque de almacenamiento de bebida terminada
Válvulas	
V1	Válvula de salida del tanque de almacenamiento principal
V2	Válvula de salida del banco del filtro hacia la ML
V3	Válvula de salida del banco del filtro hacia el TA1
V4	Válvula de salida del banco del filtro hacia el TA2
V5	Válvula de salida del TA1
V6	Válvula de salida del TA2
V7	Válvula ubicada en la dispensadora de azúcar
V8	Válvula de salida en la mezcladora 1
V9	Válvula de salida del TA3
V10	Válvula ubicada en la dispensadora de concentrado
V11	Válvula de salida en la mezcladora 2
V12	Válvula de salida del TA4
V13	Válvula ubicada en la dispensadora gas carbónico
V14	Válvula de salida en el carbonatador
V15	Válvula de salida del TA5

Fuente: Autores

## Anexo B: Software PIPE.

Según (Fattori, Kano, Junquera, & Miyagi, 2012) en su trabajo titulado “Rede de Petri e o aplicativo Platform Independent Petri net Editor (PIPE)” el software Editor de Plataforma Independiente de Redes de Petri, mejor conocido como PIPE (Platform Independent Petri net Editor) por sus siglas en inglés, es una herramienta cuya creación se dio en el año 2003 como parte de un proyecto, manejado por un grupo de alumnos, James Bloom, Clare Clark, Camilla Clifford, Alex Duncan, Haroun Khan y Manos Papantoniou en el Departamento de Informática de la Escuela Imperial de Londres. Su función es la de crear y analizar redes de petri y está basado en la plataforma Java. A pesar que en esa época ya existían herramientas disponibles para cumplir los objetivos que cumple el software PIPE, la diferencia clave con este último software fue la facilidad que brindaba al momento de usarlo, la independencia de plataforma y contaba con la capacidad de agregar nuevos módulos a su código.

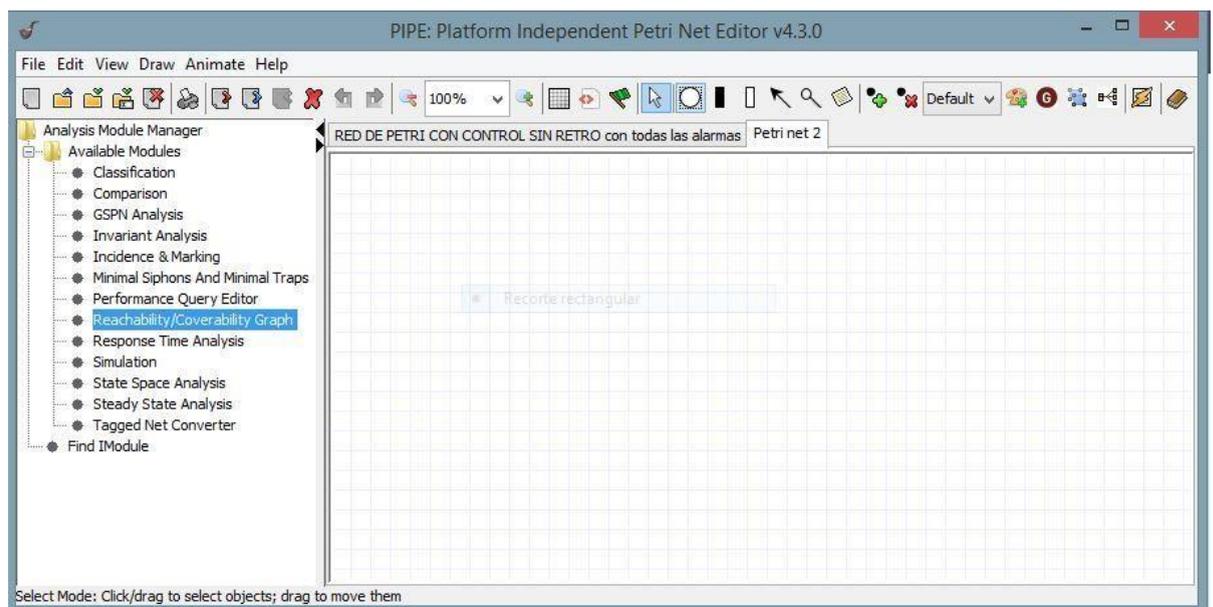


Figura B.1. - Ventana principal del software PIPE2  
Elaborada por: Autores.

Al año siguiente, un nuevo grupo conformado por Tom Barnwell, Michael Camacho, Matthew Cook, Maxim Gready, Peter Kyme y Michael Tsouchlaris, realizaron cambios importantes en el software, cambiándole el nombre a PIPE2, corrigiendo errores en la fijación de módulos de análisis y mejorando la interfaz de usuario. Actualmente la plataforma cuenta con funciones como File, Edit, View, Draw,

Animate, y Help (archivo, editar, ver, dibujar, animar y ayuda) las cuales pueden ser accionadas de manera simple.

Dentro de las opciones que encierran a la función File (archivo) se tiene:

- New (Ctrl+N): Crea un documento nuevo.
- Open (Ctrl+O): Abre algún documento previamente guardado.
- Close (Ctrl+W): Cierra el archivo que se está elaborando.
- Import: Importa un documento de TimeNET.
- Save (Ctrl+S): Guardar un documento.
- Save as (Ctrl+Shift+S): Guardar un documento con la opción de elegir el lugar en donde se desee guardar el archivo.
- Export: Exportar un documento con extensión PNG, PostScript y TimeNET.
- Print (Ctrl+P): Imprimir.
- Exit (Ctrl+Q): Cerrar la aplicación PIPE2.

Dentro de las opciones que encierran a la función Edit (Editar) se tiene:

- Undo (Ctrl+Z): Deshacer una acción.
- Redo (Ctrl+Y): Rehacer una acción.
- Cut (Ctrl+X): Recortar un elemento gráfico.
- Copy (Ctrl+C): Copiar un elemento gráfico.
- Paste (Ctrl+V): Pegar un elemento gráfico.
- Delete (Delete): Borrar un elemento gráfico.

Dentro de las opciones que encierran a la función View (Ver) se tiene:

- Zoom out (Ctrl+Minus): Disminuye la visualización del documento.
- Zoom in (Ctrl+Plus): Aumenta la visualización del documento.
- Zoom: Opciones de visualización (40 % al 300%).
- Circle grid (G): Configura el fondo cuadriculado de pantalla.
- Drag (D): Arrastra un documento para lograr su visualización.

Dentro de las opciones que encierran a la función Draw (Dibujar) se tiene:

- Select (S): Seleccionar un elemento gráfico.
- Place (P): Adicionar un lugar.
- Immediate transition (I): Agregar una transición no temporizada, una vez que sea habilitada, dispara en el tiempo cero.
- Timed transition (T): Agregar una transición temporizada, una vez que sea habilitada, dispara después de un tiempo determinado.

- Arc (A): Agregar un arco con orientación normal.
- Inhibidor Arc (H): Agregar un arco inhibidor.
- Anotacion (N): Agregar un cuadro de texto con comentario.
- Add token (NumPad+): Agregar marcas de un lugar.
- Delete token (NumPad-): Borrar marcas de un lugar.
- Rate Parameter (R): Configuración de etiqueta.

Las opciones que brinda la función Animate (Animar) es la de realizar la simulación de la red de petri que se haya realizado. Una vez accionada esta opción el documento dejara de ser editable. Existen varias modalidades de visualizar la simulación, para realizarla paso a paso observando el proceso de las transiciones y el uso de las marcas resultantes, se da clic en la opción Random, para realizar la simulación de manera automática en donde se visualiza la secuencia completa del sistema, se da clic en Animate. Otra de las opciones que brinda esta función son:

- Back: Volver al estado anterior al disparo de la transición durante la simulación.
- Forward: Rehacer el disparo de la transición en la simulación.

## Anexo C: Software Visual Object Net++

El documento publicado por (Chen, 2005) describe al software visual object net ++ como una herramienta de ingeniería visual ideal para lograr el modelamiento de las redes de petri. Fue desarrollado por el Dr. Reiner Drath junto a su equipo del Departamento de Control Automático de la Universidad de Tecnología, en Illelnau – Alemania. Este software es capaz de soportar redes de petri de eventos tanto continuos como discretos, por ejemplo, el funcionamiento de un semáforo se lo puede analizar como un sistema de eventos discreto debido a que solo tiene tres estados, los colores rojo, amarillo y verde. Este tipo de evento no se da en los sistemas de eventos continuos, aquí la velocidad del evento de la red de petri se la da como una función. Además, soporta redes híbridas y temporizadas. A continuación, se describirán los datos técnicos necesarios para poder utilizar el software visual object net++:

- Sistema operativo: Windows 95/Windows NT
- Hardware requerido: Plataforma Win95/WinNT
- Características: Posee funciones de animación que brindan al usuario mayor facilidad de observación acerca del comportamiento dinámico de las redes de petri. La interfaz desarrollada permitirá diseñar, simular, visualizar y documentar de una manera sencilla.

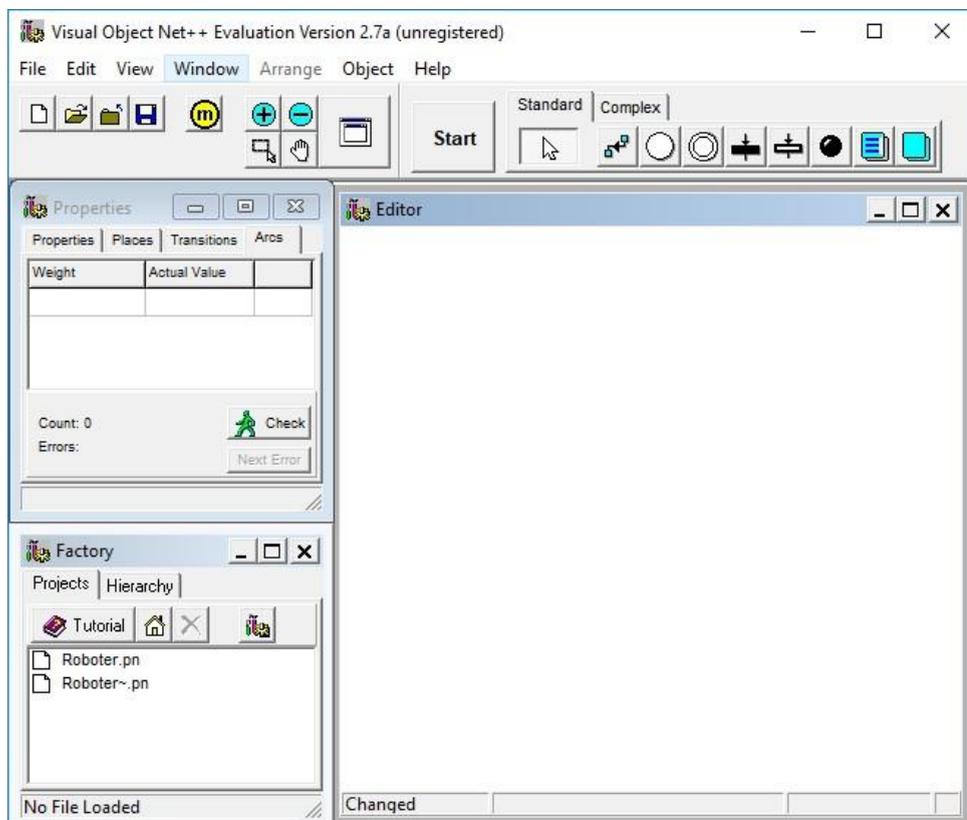


Figura C.1. - Ventana principal del software Visual Object Net++  
Elaborada por: Autores.

De la misma manera, este software posee funciones y ventanas explicadas a continuación:

- Ventana de edición: al momento de ejecutar el software Visual Object Net+, inmediatamente aparece la ventana que se puede observar en la figura denominada Editor. Esta ventana permite al usuario dibujar la red de petri.

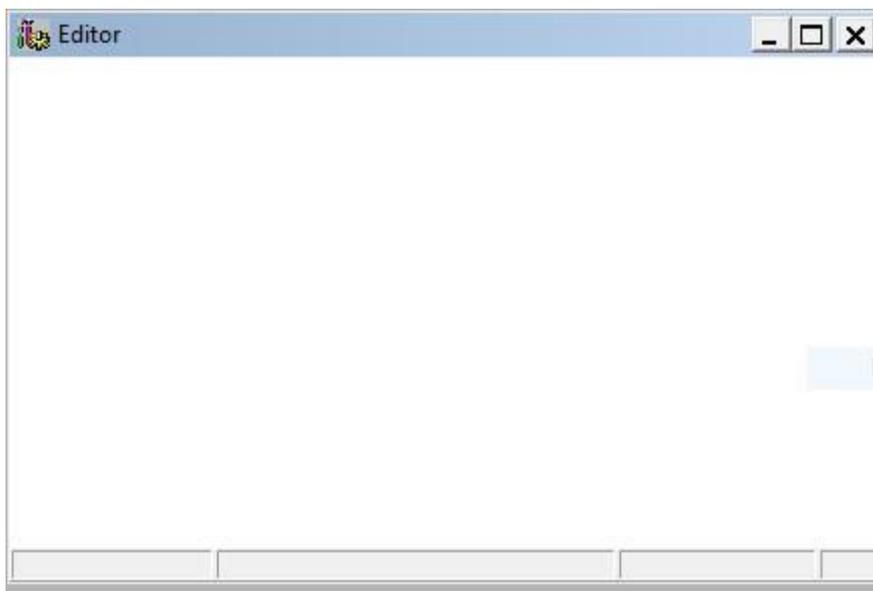


Figura C.2. - Ventana de edición del software Visual Object Net++  
Elaborada por: Autores.

- Ventana de propiedades: al momento de inicializar el programa por primera vez, esta venta no muestra nada, pero si se dibuja algún elemento o red, o se abre algún archivo que ya haya sido desarrollado con anterioridad, esta ventada muestra todas las propiedades del elemento elegido como se puede observar en la figura, donde se muestra el nombre, la variable, tipo de red, ya sea discreta o continua, el toquen, si se desea mostrar la etiqueta del elemento, la forma del elemento y la capacidad del mismo.

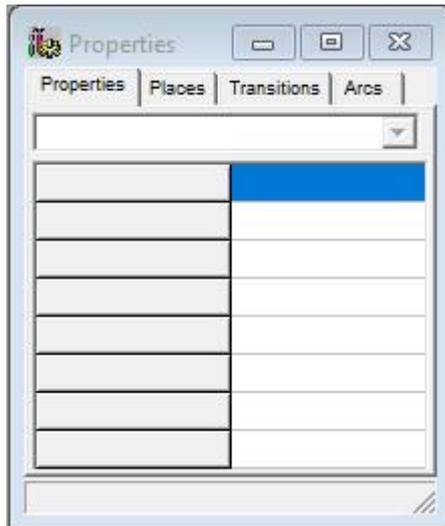


Figura C.3. - Ventana de propiedades del software Visual Object Net++  
Elaborada por: Autores.

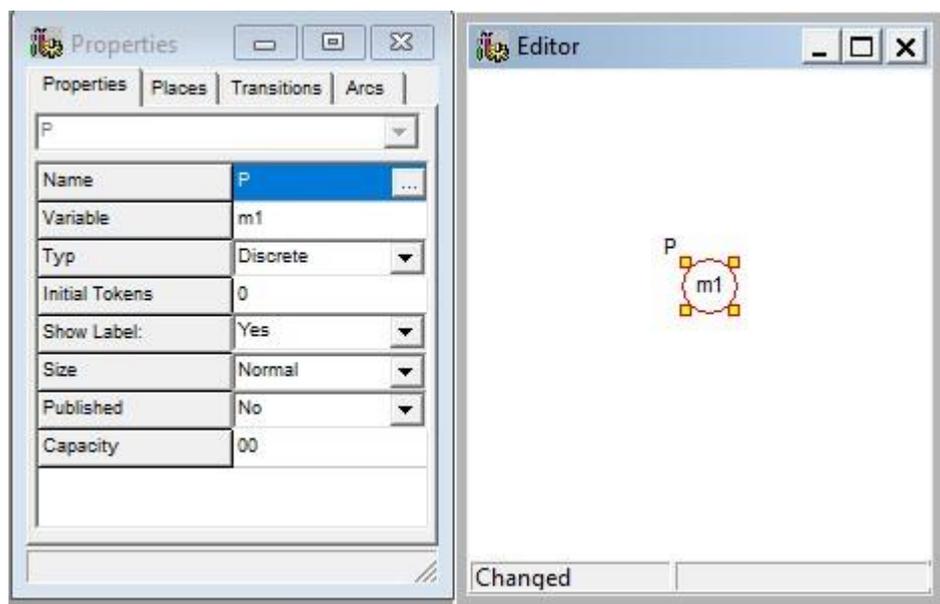


Figura C.4. - Ventana de propiedades del software Visual Object Net++ cuando se colocan elementos  
Elaborada por: Autores.

- Ventana de fábrica: el software Visual Object Net++ posee su propio gestor de archivos llamado Fabrica, el mismo que permite al usuario realizar varias acciones como abrir un archivo existente, fusionar archivos, cerrar archivos.

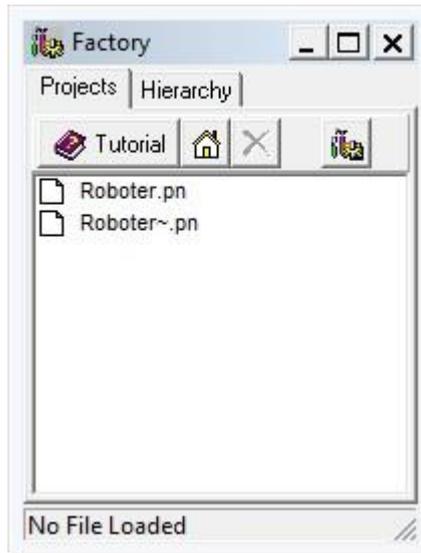


Figura C.5. - Ventana de fábrica del software Visual Object Net++  
Elaborada por: Autores.

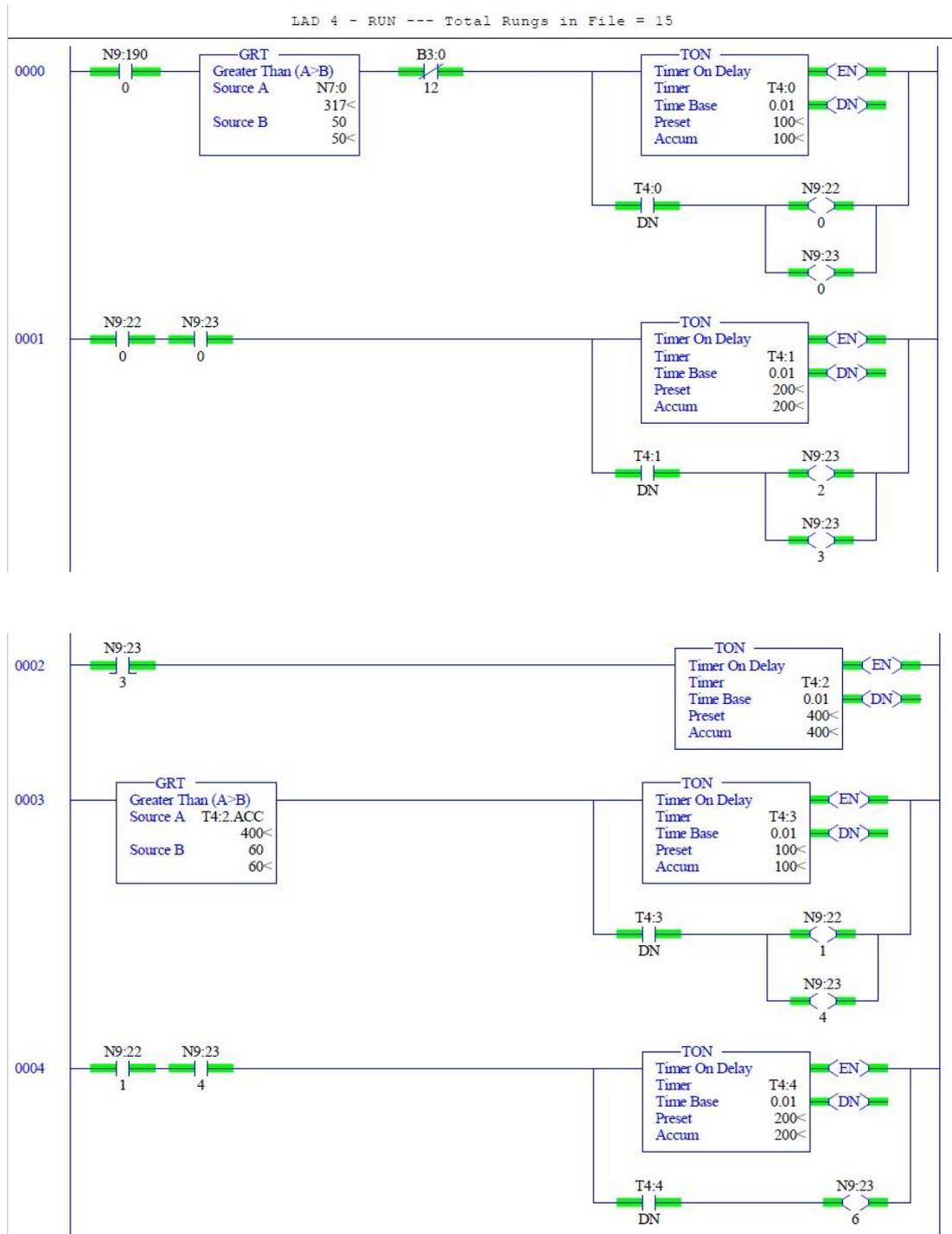
Existen otras funciones que son constantemente utilizadas al momento de desarrollar redes de petri utilizando el software Visual Object Net++:

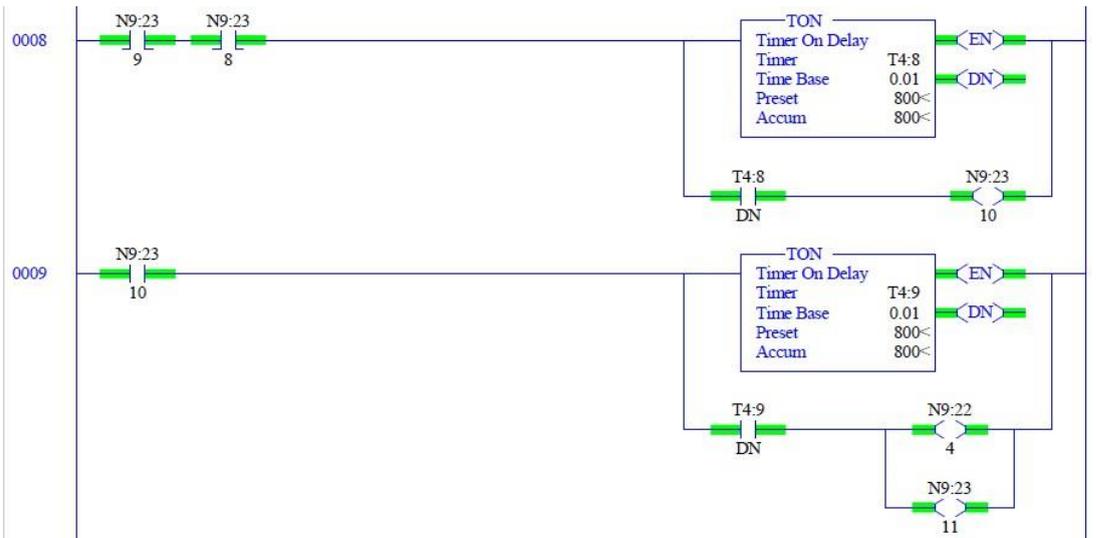
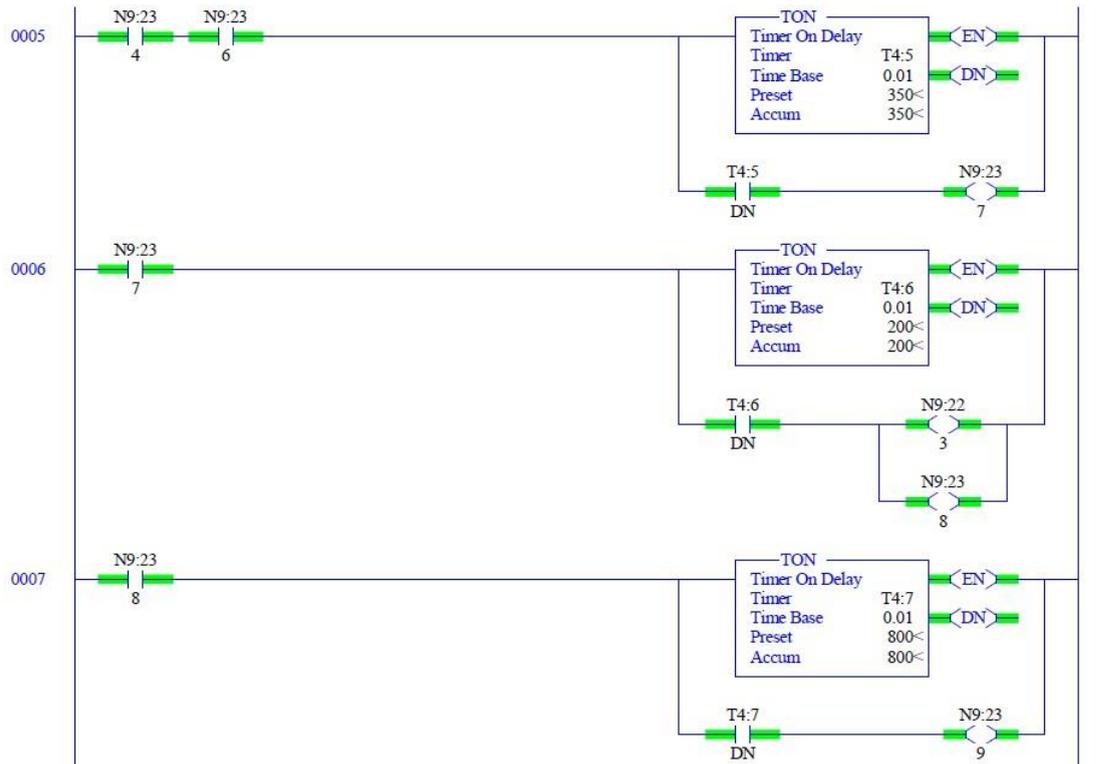
- Select object: Al momento de dar clic sobre esta función, permite seleccionar cualquier elemento, para posteriormente cambiarle los valores, nombre, características.
- Arcs: Al darle clic, este botón permite al usuario dibujar un arco entre dos lugares y transiciones o viceversa.
- Discrete place: Al dar clic sobre este botón, el usuario puede dibujar un lugar discreto.
- Continuous place: Al dar clic sobre este botón, el usuario puede dibujar un lugar continuo.
- Discrete transition: Al dar clic sobre este botón, el usuario puede dibujar una transición discreta.
- Continuous transition: Al dar clic sobre este botón, el usuario puede dibujar una transición continua.
- Whole token: Al dar clic sobre este botón, el usuario puede dibujar un token completo.
- Label: Al dar clic sobre este botón, el usuario puede dibujar una etiqueta sobre algún elemento.
- Graphical object: Al dar clic sobre este botón, el usuario puede dibujar un objeto gráfico.



Figura C.6. – Funciones básicas del software Visual Object Net++  
Elaborada por: Autores.

**Anexo D:** Código en lenguaje Ladder del autómat programable realizado en el software RSLogix500.





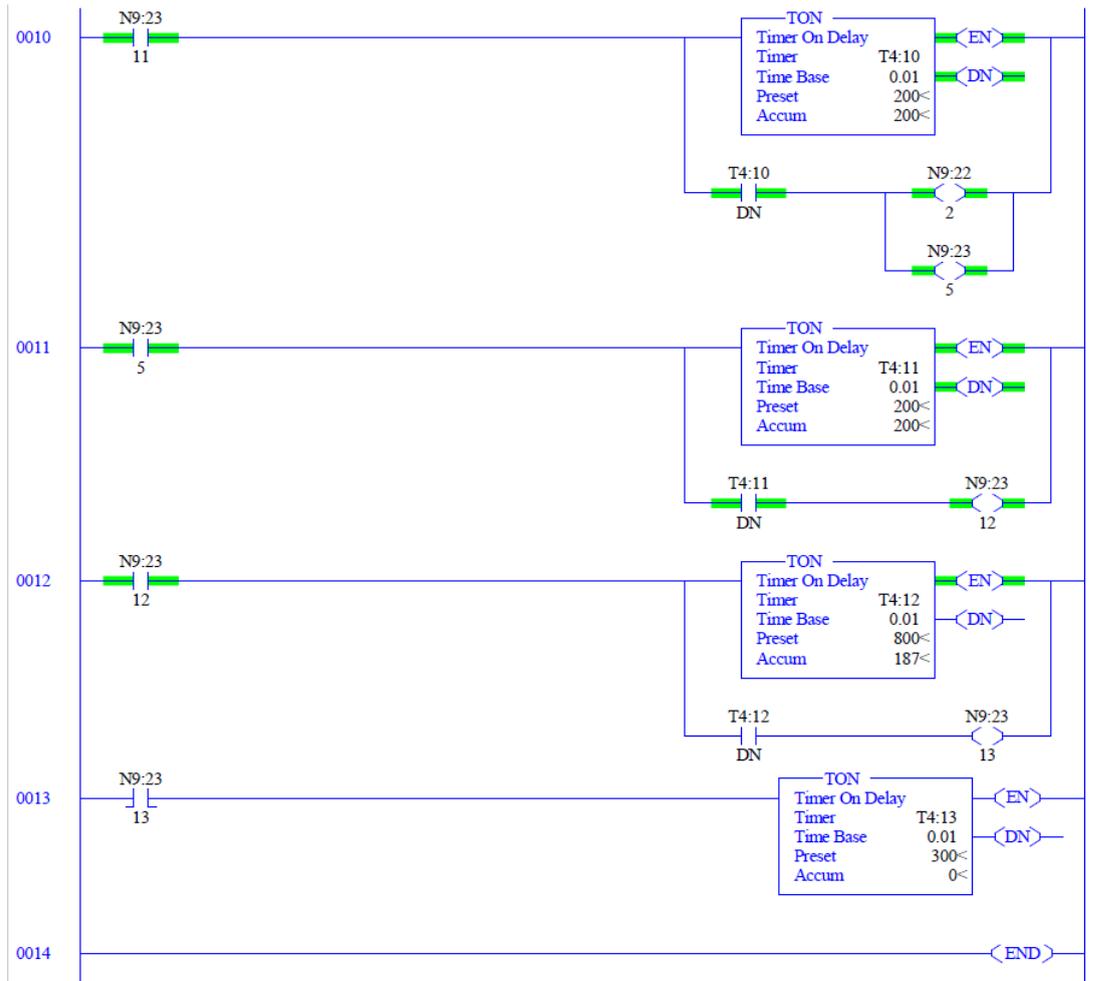


Figura D.1.- Código en lenguaje Ladder del autómata programable  
Elaborado por: Autores.

**Anexo E:** Fotografía de la maqueta simplificada del sistema de producción y envasado de gaseosa.



Figura E.1.- Maqueta simplificada del sistema de producción y envasado de gaseosas.

Elaborado por: Autores.

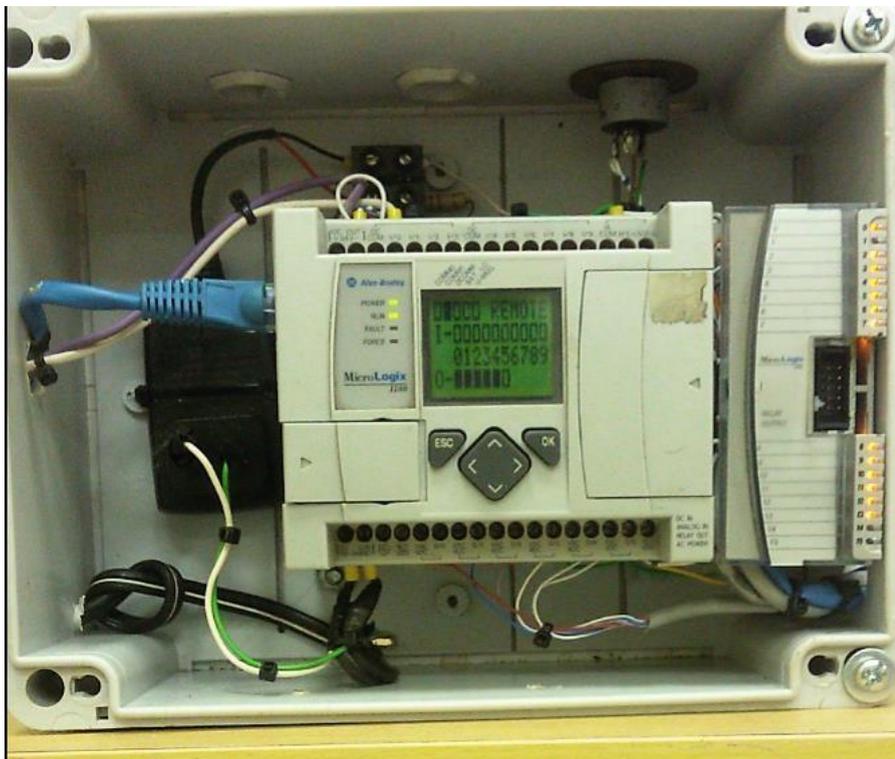


Figura E.2.- Autómata programable Allen Bradley 1100 utilizado en la maqueta simplificada.

Elaborado por: Autores.



Figura E.3.- Vista superior de la maqueta simplificada.  
Elaborado por: Autores.



**Presidencia  
de la República  
del Ecuador**



**Plan Nacional  
de Ciencia, Tecnología,  
Innovación y Saberes**



**SENESCYT**

Secretaría Nacional de Educación Superior,  
Ciencia, Tecnología e Innovación

## DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Nosotros, **Domínguez Cruz, Vanessa Maritza**, con C.C: 0923491278 y **Marín Gavilánez, Jordy Rafael**, con C.C: 1205495714, autores del trabajo de titulación: Modelado de un sistema de producción y envasado de gaseosas con redes de Petri, para la implementación en autómatas programables, utilizando una maqueta simplificada del proceso, previo a la obtención del título de Ingeniero electrónico en control y automatismo en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

1.- Declaramos tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las instituciones de educación superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de titulación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.

2.- Autorizamos a la SENESCYT a tener una copia del referido trabajo de titulación, con el propósito de generar un repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Guayaquil, 13 de septiembre del 2017.

f. \_\_\_\_\_

**Domínguez Cruz, Vanessa Maritza.**

C.C: 0923491278

f. \_\_\_\_\_

**Marín Gavilánez, Jordy Rafael**

C.C: 1205495714

## REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA

### FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN

<b>TÍTULO Y SUBTÍTULO:</b>	Modelado de un sistema de producción y envasado de gaseosas con redes de Petri, para la implementación en autómatas programables, utilizando una maqueta simplificada del proceso		
<b>AUTORES</b>	Domínguez Cruz, Vanessa Maritza. Marín Gavilánez, Jordy Rafael.		
<b>REVISOR(ES)/TUTOR(ES)</b>	Mendoza Merchán, Eduardo Vicente (Tutor). Córdova Rivadeneira, Luis Silvio (Revisor).		
<b>INSTITUCIÓN:</b>	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
<b>FACULTAD:</b>	Facultad de educación técnica para el desarrollo		
<b>CARRERA:</b>	Carrera de ingeniería electrónica en control y automatismo		
<b>TÍTULO OBTENIDO:</b>	Ingeniero electrónico en control y automatización		
<b>FECHA DE PUBLICACIÓN:</b>	13 de septiembre del 2017	<b>No. DE PÁGINAS:</b>	140
<b>ÁREAS TEMÁTICAS:</b>	Automatismo, Electrónica, Industria.		
<b>PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:</b>	Autómatas programables, Redes de Petri, eventos discretos, envasado de gaseosa, SCADA, lenguaje Ladder		
<b>RESUMEN/ABSTRACT (150-250 palabras):</b>			
<p>En el presente trabajo de titulación se realiza la explicación del modelado de un sistema de producción y envasado de gaseosas realizado a través del formalismo matemático de las redes de Petri y representado mediante una maqueta simplificada, la cual, es realizada con elementos de electrónica convencional y un controlador lógico programable. Actualmente debido a los grandes avances que se han producido en el ámbito industrial, nacen los sistemas de eventos discretos concurrentes, cuyo modelamiento y análisis matemático se los realiza a través de herramientas con bases matemáticas sólidas, una de ellas son las redes de Petri. Para el desarrollo de la investigación se ha utilizado una metodología bibliográfica y analítica, que permitirá analizar de que manera contribuyen las redes de Petri en aplicaciones de automatización industrial para lograr el modelado de sistemas de eventos discretos (SED) y algoritmos de control, que permita la simulación, validación y generación de código para autómatas programables en un sistema de producción y envasado de gaseosas. Gracias al análisis del modelamiento del sistema de producción y envasado de gaseosas se pudo comprobar que las redes de Petri son de mucha utilidad al momento de modelar sistemas de eventos discretos y que gracias al análisis de la red se pudo realizar de una manera sencilla y ordenada el lenguaje de programación Ladder destinada al autómata programable.</p>			
<b>ADJUNTO PDF:</b>	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO	
<b>CONTACTO CON AUTOR/ES:</b>	<b>Teléfono:</b> +593-9-96680085 +593-9-60504589	<b>E-mail:</b> <a href="mailto:vanemdc@outlook.com">vanemdc@outlook.com</a> <a href="mailto:jordymarin_94@hotmail.com">jordymarin_94@hotmail.com</a>	
<b>CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN (COORDINADOR DEL PROCESO UTE):</b>	<b>Nombre:</b> Mendoza Merchán Eduardo Vicente. <b>Teléfono:</b> +593-9-85086815 <b>E-mail:</b> <a href="mailto:eduardo.mendoza@cu.ucsg.edu.ec">eduardo.mendoza@cu.ucsg.edu.ec</a>		
<b>SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA</b>			
<b>Nº. DE REGISTRO (en base a datos):</b>			
<b>Nº. DE CLASIFICACIÓN:</b>			
<b>DIRECCIÓN URL (tesis en la web):</b>			