



**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**DISEÑO Y SIMULACIÓN DEL CONTROL AUTOMÁTICO  
PARA EL ESTAMPADO DE MATRÍCULAS AUTOMOTRICES.  
DYSCAEM**

**AUTOR**

**ING. VÍCTOR O. ZAMBRANO G.**

**DIRECTOR**

**ING. LEONARDO RODRÍGUEZ URREGO PhD**

**BOGOTÁ D. C., REPÚBLICA DE COLOMBIA – MAYO DEL AÑO 2019**



*A mi madre Elizabeth que me enseñó el inmenso valor del conocimiento y la firme voluntad para alcanzarlo.*

*Te veré en la eternidad.*

*A mi padre Víctor que me muestra el valor del trabajo y el denodado esfuerzo por el bienestar familiar.*

*Siempre en mi alma.*

*A mi esposa Liliana que con dulzura y una persistencia formidable por el crecimiento personal ilumina mi vida.*

*Siempre en mi amor.*

*A mis hijas Daniela y Victoria que me enseñaron a ser padre, amigo, compañero y guía.*

*Siempre en mi corazón.*

## **AGRADECIMIENTOS**

Abordar con claridad y convicción el proyecto de realizar estudios de maestría en ingeniería, en la etapa de mi vida en que me encuentro, requirió de un impulso inusitado para el inicio, de compañía para la evolución de los estudios y de objetivos claros para la continuidad del ejercicio profesional, ahora enriquecido con un gran legado metódico y cognitivo.

Tomar la decisión de abordar el postgrado que ahora termino, surgió de la inquietud e impulso que hoy agradezco enormemente a mi esposa Liliana, quien permanentemente me acompaña y me aporta en la formulación y logro de objetivos. Gracias, mi amor.

En el trasegar de las diferentes etapas del postgrado tuve la inmensa fortuna de contar con compañeros, profesionales todos y grandes seres humanos, que hoy recuerdo con alegría e inmenso cariño, Lorena, Leonel, Iván, Diego, Camilo y Jovanni. Gracias por todo.

A los profesionales que enriquecieron el programa con sus competencias, experiencias y notables capacidades docentes, que facilitaron la construcción de nuevos modelos de aprendizaje y pensamiento que suman a las competencias y experiencias mías propias, les digo gracias por su esfuerzo.

El apoyo permanente mi familia y su invaluable aliento, son los alicientes con los que he contado y que me han permitido iniciar, avanzar y culminar este gran objetivo. Gracias por siempre.

Al Ing. Leonardo Rodríguez Urrego PhD, director de esta tesis de maestría, que por sus sabias exhortaciones desde las aulas de clase y luego durante la dirección de este proyecto, facilita enormemente la divulgación y apropiación del conocimiento y la construcción de caminos de pensamiento con método y sabiduría.

Finalmente, a todas aquellas personas que de una u otra manera han tenido nexos con este proyecto y que han sido artífices de los logros obtenidos.

## **DISEÑO Y SIMULACIÓN DEL CONTROL AUTOMÁTICO PARA EL ESTAMPADO DE MATRÍCULAS AUTOMOTRICES. DYSCAEM<sup>1</sup>**

### **RESUMEN**

La automatización industrial como disciplina ingenieril es aplicada a procesos industriales de toda índole, con variados enfoques como repetitividad en las tareas, operatividad continuada, incremento sostenido de estándares, reducción de costos operativos, reducción de riesgos y trabajos al ser humano, control total en consumos energéticos y de materiales, balance garantizado de líneas de producción, y la oportunidad en las entregas, entre otras tantas.

Todo proceso es susceptible de ser automatizado, lo cual establece enormes oportunidades a las empresas manufactureras que formulen planes estratégicos en tal sentido, en la búsqueda de mayor productividad y competitividad, pues la tecnología avanza a grandes y seguros pasos.

En la actualidad, los programas de formación profesional en automatización y control son más frecuentes que en el pasado, lo que en general conduce a un pensamiento colectivo que impulsa al país industrialmente con las ventajas aportadas por este tipo de evolución empresarial.

El diseño de un control automatizado para procesos industriales, como el que se aborda en este trabajo, es un claro ejemplo de oportunidades industriales con desarrollo perfectamente viable en el país, con conocimiento y evolución propia.

**Palabras clave.** Simulación, Control, Automatización, Red de Petri, Grafcet, Guía Gemma.

### **ABSTRACT**

*Industrial automation as an engineering discipline is applied to industrial processes of all kinds, with varied approaches such as repetitive tasks, continued operation, sustained increase in standards, reduction of operating costs, reduction of risks and work to human beings, total control in consumption energy and materials, guaranteed balance of production lines, and the opportunity in deliveries, among many others.*

*Every process is susceptible to be automated, which establishes enormous opportunities for manufacturing companies to formulate strategic plans in this regard, in the search for greater productivity and competitiveness, as technology advances to large and safe steps.*

*At present, professional training programs in automation and control are more frequent than in the past, which in general leads to a collective thinking that drives the country industrially with the advantages provided by this type of business evolution.*

*The design of an automated control for industrial processes, such as the one addressed in this paper, is a clear example of industrial opportunities with perfectly viable development in the country, with knowledge and its own evolution.*

**Keywords.** Simulation, Control, Automatization, Petri's net, Grafcet, Gemma guide.

---

<sup>1</sup> Autor Víctor O. Zambrano G., Ingeniero Mecánico de la Universidad Nacional de Colombia, Consultor en Ingeniería de Procesos Industriales.

## CONTENIDO

<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>11</b>
1.1. VIGENCIA TECNOLÓGICA.	12
1.2. FORMULACIÓN DE LA OPORTUNIDAD TECNOLÓGICA.	15
1.3. DEFINICIÓN DE OBJETIVOS.	17
1.3.1. OBJETIVO GENERAL.	17
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.	17
1.4. JUSTIFICACIÓN.	17
1.5. ESTRUCTURA DE LA TESIS.	18
<b>2. PROCESO INDUSTRIAL</b>	<b>19</b>
2.1. PROCESO DE MANUFACTURA.	20
2.1.1. SOLICITUDES SERIADAS.	20
2.1.2. SOLICITUDES DE REPOSICIÓN.	20
2.2. PREPARACIÓN DE MATERIALES.	20
2.3. PROCESO DE ESTAMPADO.	22
2.3.1. MANEJO DEL MATERIAL COLAMINADO.	22
2.3.2. INTERCAMBIO DE DADOS.	22
2.3.3. ESTAMPADO DEL MATERIAL TROQUELADO.	23
<b>3. SISTEMAS PARA AUTOMATIZACIÓN</b>	<b>27</b>
3.1. SISTEMAS MECÁNICOS.	28
3.2. SISTEMA ELÉCTRICO.	31
3.3. SISTEMA NEUMÁTICO.	32
3.3.1. UNIDAD GENERADORA DE AIRE COMPRIMIDO.	32
3.3.2. UNIDAD DE MANEJO DE MATERIALES.	33
3.3.3. ARREGLO GENERADOR DE VACÍO.	34
3.4. SISTEMA HIDRÁULICO.	36
3.4.1. UNIDAD HIDRÁULICA.	36
3.4.2. PRENSA HIDRÁULICA DOBLE CILINDRO.	36
3.4.3. UNIDAD DE ALIMENTACIÓN DE MATRICES.	37
3.4.4. UNIDAD DE ALIMENTACIÓN DE MATERIAL.	37
3.5. SISTEMA DE CONTROL.	39
<b>4. MODELADO &amp; SIMULACIÓN</b>	<b>41</b>
4.1. RED DE PETRI. MODELADO DE PROCESOS CONCURRENTES.	41
4.1.1. ECUACIONES DE ESTADO.	45
4.2. MODELADO & SIMULACIÓN.	46

<b>4.2.1. MODELO ELÉCTRICO.</b>	<b>47</b>
<b>4.2.2. MODELO NEUMÁTICO.</b>	<b>47</b>
<b>4.2.3. MODELO HIDRÁULICO.</b>	<b>47</b>
<b>4.2.4. SISTEMA NEUMÁTICO.</b>	<b>48</b>
<b>4.3. GEMMA. GUÍA PARA DISEÑO ESTRUCTURADO.</b>	<b>50</b>
<b>4.4. GRAFCET. ESPECIFICACIÓN DE MODELADO.</b>	<b>52</b>
<b>4.4.1. DESCRIPCIÓN DEL GRAFCET.</b>	<b>54</b>
<b>4.4.2. MACRO_F1.</b>	<b>55</b>
<b>4.4.3. MACRO_F2.</b>	<b>59</b>
<b>4.4.4. MACRO_F45.</b>	<b>59</b>
<b>4.4.5. MACRO_A6.</b>	<b>62</b>
<b>4.4.6. MACRO_SC01.</b>	<b>62</b>
<b>5. CONCLUSIONES</b>	<b>63</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>65</b>
<b>ANEXO 1. DIAGRAMA DE FUNCIONES CRUZADAS.</b>	<b>68</b>
<b>ANEXO 2. CIRCUITO TRIFÁSICO MOTORES.</b>	<b>69</b>
<b>ANEXO 3. SISTEMA NEUMÁTICO.</b>	<b>70</b>
<b>ANEXO 4. SISTEMA HIDRÁULICO.</b>	<b>71</b>
<b>ANEXO 5. COMPONENTES ELÉCTRICOS TABLERO DE CONTROL.</b>	<b>72</b>
<b>ANEXO 6. DISEÑO TABLERO DE CONTROL.</b>	<b>73</b>

## LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1. RUNT Parque automotor registrado.</i>	11
<b>Tabla 2. Necesidades de producción de PMA.</b>	12
<b>Tabla 3. Medidas &amp; Peso en PMA.</b>	28
<b>Tabla 4. Componentes del sistema trifásico.</b>	31
<b>Tabla 5. Componentes de la unidad de aire comprimido.</b>	33
<b>Tabla 6. Consumo Sistema Neumático.</b>	33
<b>Tabla 7. Componentes de la unidad de manejo de materiales.</b>	34
<b>Tabla 8. Componentes del arreglo generador de vacío.</b>	34
<b>Tabla 9. Componentes unidad hidráulica.</b>	36
<b>Tabla 10. Componentes unidad de estampado.</b>	37
<b>Tabla 11. Componentes unidad de alimentación de matrices.</b>	37
<b>Tabla 12. Componentes unidad de alimentación de material.</b>	38
<b>Tabla 13. Descripción de los elementos de la RdP.</b>	42
<b>Tabla 14. Ecuaciones de estado de la RdP.</b>	45
<b>Tabla 15. Descripción de los elementos del Grafset.</b>	53

## LISTA DE FIGURAS

<b>Ilustración 1.</b> Matriz de operación manual.....	12
<b>Ilustración 2.</b> Bastidor de operación manual.....	13
<b>Ilustración 3.</b> Prensa hidráulica doble cilindro marca UTSCH.....	13
<b>Ilustración 4.</b> Prensa hidráulica moderna marca UTSCH.....	14
<b>Ilustración 5.</b> Datos de estampado UTSCH.....	14
<b>Ilustración 6.</b> Novedoso sistema manual de estampado UTSCH.....	14
<b>Ilustración 7.</b> Máquina completamente automática UTSCH.....	15
<b>Ilustración 8.</b> Intercambio de dados en bastidor.....	16
<b>Ilustración 9.</b> Diagrama de flujo del proceso.....	16
<b>Ilustración 10.</b> Diagrama de funciones cruzadas proceso industrial.....	19
<b>Ilustración 11.</b> Estampado PMA.....	20
<b>Ilustración 12.</b> Colaminado del material compuesto.....	21
<b>Ilustración 13.</b> Segmentos de material colaminado.....	21
<b>Ilustración 14.</b> Puesto de trabajo para el estampado.....	22
<b>Ilustración 15.</b> Datos o matrices para el estampado.....	23
<b>Ilustración 16.</b> Características del estampado en un segmento de aluminio.....	24
<b>Ilustración 17.</b> Acción de estampado en prensa.....	24
<b>Ilustración 18.</b> Estación automatizada para el estampado.....	27
<b>Ilustración 19.</b> Prensa hidráulica de dos cilindros UTSCH.....	28
<b>Ilustración 20.</b> Prensa Hidráulica Modificada.....	29
<b>Ilustración 21.</b> Indexador automatizado proceso externo.....	29
<b>Ilustración 22.</b> Manipulación y transporte neumático.....	30
<b>Ilustración 23.</b> Unidad neumática para el manejo de materiales.....	30
<b>Ilustración 24.</b> Circuito trifásico motores.....	31
<b>Ilustración 25.</b> Diagrama de correlación Presión – Tiempo.....	32
<b>Ilustración 26.</b> Sistema neumático.....	35
<b>Ilustración 27.</b> Sistema hidráulico.....	38
<b>Ilustración 28.</b> DYSCAEM – Modos Operacionales.....	39
<b>Ilustración 29.</b> Componentes eléctricos tablero de control.....	39
<b>Ilustración 30.</b> Control de lazo cerrado.....	41
<b>Ilustración 31.</b> Red de Petri.....	44
<b>Ilustración 32.</b> Automation Studio™.....	46
<b>Ilustración 33.</b> Modelado para la simulación.....	47
<b>Ilustración 34.</b> Diagrama H – Recorrido Vs. Tiempo.....	48
<b>Ilustración 35.</b> Diagrama N – Recorrido Vs Tiempo.....	49
<b>Ilustración 36.</b> Diagrama HN - Recorrido Vs Tiempo.....	49
<b>Ilustración 37.</b> Guía GEMMA.....	51
<b>Ilustración 38.</b> Guía GEMMA del Proyecto DYSCAEM.....	52
<b>Ilustración 39.</b> Macro_F1. Texto estructurado, Producción normal y Modo de pruebas.....	56
<b>Ilustración 40.</b> Macro_F1. Ciclo neumático Macro_F2 y derivación por banderas.....	57
<b>Ilustración 41.</b> Macro_F1. Derivación al ciclo hidráulico.....	57
<b>Ilustración 42.</b> Macro_F1. Derivaciones a ciclos neumático e hidráulico.....	58
<b>Ilustración 43.</b> Macro_F1. Control de ciclo único o automático.....	58
<b>Ilustración 44.</b> Macro_F2. Ciclo neumático manejo de materiales.....	59
<b>Ilustración 45.</b> Macro_F45. Selección del modo de prueba.....	60
<b>Ilustración 46.</b> Macro_F45. Verificación de actuadores en el desorden.....	60
<b>Ilustración 47.</b> Macro_F45. Verificación de los actuadores en el orden.....	61

<b>Ilustración 48.</b> Macro_45. Cierre del grafo. ....	61
<b>Ilustración 49.</b> Macro_A6. Restauración de los sistemas neumático e hidráulico.....	62
<b>Ilustración 50.</b> Macro_SC01. Control de prensado. ....	62

# 1. INTRODUCCIÓN

*El verdadero signo de la inteligencia no es el conocimiento sino la imaginación.*

*Albert Einstein*

El diseño y simulación de controles automáticos para los procesos industriales se basa fundamentalmente en protocolos y modelos ya establecidos y probados, con metodologías seguras para el entendimiento y el desarrollo [1], de tal manera que los resultados en la mayoría de los casos son conformes con la planificación. Sin embargo, el éxito de todo trabajo en automatización se arraiga indudablemente en el conocimiento manifiesto y metódico del proceso de manufactura, en la claridad de su caracterización y en las competencias para la descripción y la operación de los procesos a ser intervenidos [2].

De otra manera, en el entendido de que la automatización industrial reduce o elimina la intervención humana, es justamente la competencia humana en los procesos la que permite establecer diseños, trazar los modelos y planificar las automatizaciones para su propio beneficio.

Metodologías para el diseño y la simulación como Redes de Petri [3], Diagramas GRAFCET [4], Guía GEMMA [5] y programas computacionales que permiten su aplicación como *Sirphyco* y *Automation Studio* [6] [7], aunado todo al perfecto y profundo conocimiento de los procesos de manufactura y sus operaciones individuales, establecen la mejor vía para la automatización industrial.

La automatización del proceso de fabricación de PMA – Placas Matrículas Automotrices, resulta, después de su análisis, perfectamente factible y congruente con las capacidades ingenieriles del país, aunque al tenor del tamaño del mercado las dimensiones industrial y comercial establecen límites para la inversión respecto de las necesidades de producción de unidades.

La revisión estadística del parque automotor registrado en el RUNT – Registro Único Nacional de Tránsito del Ministerio de Transporte (Tabla 1), permite identificar el crecimiento anual proyectado para los años 2019 y 2020 en Colombia.

**Tabla 1.** RUNT Parque automotor registrado.

<b>Año</b>	<b>RUNT</b>	<b>Crecimiento</b>	<b>A producir</b>	<b>Fuente</b>
<b>2012</b>	9 283 337			Estadística
<b>2013</b>	10 186 026	9,72%	902 689	
<b>2014</b>	11 152 653	9,49%	966 627	
<b>2015</b>	12 087 262	8,38%	934 609	
<b>2016</b>	12 910 083	6,81%	822 821	
<b>2017</b>	13 637 592	5,64%	727 509	
<b>2018</b>	14 486 716	6,23%	849 124	
<b>2019</b>	15 160 070	4,65%	673 354	Pronóstico
<b>2020</b>	15 732 077	3,77%	572 008	
<b>Fuente.</b> Elaboración propia. [8]				

A partir de lo anteriormente mencionado, se establece que con dos (2) PMA por vehículo y una (1) PMA por moto y por otros (Tabla 2), y considerando el promedio de unidades a producir

para los años 2018, 2019 y 2020, se tiene un crecimiento probable de 994.000 unidades que deben ser producidas, lo que sienta una base para la capacidad productiva instalada o para las cadencias mensuales como consideración básica para el proceso de automatización.

**Tabla 2.** Necesidades de producción de PMA.

PMA Nuevas Cambio				PMA Nuevas Crecimiento			
Total RUNT	14 684 087	PMA	100%	Total RUNT	700 000	PMA	100%
Motos	8 369 930	1	57%	Motos	399 000	1	57%
Vehículos	6 167 317	2	42%	Vehículos	294 000	2	42%
Otros	146 841	1	1%	Otros	7 000	1	1%
PMA Nuevas por Cambio		20 851 404		PMA Nuevas Crecimiento		994 000	
Producción Mensual		1 737 617		Producción Mensual		82 833	

Fuente. Elaboración propia.

En cuanto a las PMA nuevas para cambio, una información en curso en el Ministerio de Transporte indica la evolución de un proyecto para reposición de todas las PMA en años próximos, para lo cual se calcula un cambio total de veinte (20) millones de unidades.

### 1.1. Vigencia Tecnológica.

En el proceso de fabricación de las PMA - Placas Matrículas Automotrices [10] [11] en la empresa de referencia, SCI- Soluciones Corporativas Integrales S.A.S.[9], se utiliza la tecnología propia de un proceso manual, la cual consiste en dados en duraluminio de intercambio manual (Ilustración 1), bastidores (Ilustración 2) y prensas hidráulicas de doble cilindro (Ilustración 3), que en conjunto con máquinas conexas al proceso como prensa excéntrica para troquelado, línea de colaminado de fleje de aluminio, devanador de rollos de fleje de aluminio y las estaciones adicionales de acabado, embellecimiento y empaque, permiten el desarrollo del proceso fabril.

**Ilustración 1.** Matriz de operación manual.



Fuente. Elaboración propia.

La tecnología vigente esbozada resulta ser en virtud de su mano de obra intensiva, una tecnología de fabricación altamente sensible al error humano, a la confusión en el manejo de las

series de producto y en la posibilidad de fraudes por la falta de control efectivo en el uso de materiales, en el conteo de unidades y en la duplicidad (denominado comúnmente como *gemeleo*) de las PMA.

La simpleza de la tecnología manual es un factor preponderante, cuya percepción redonda en sencillez operativa, de mantenimiento y de reposición, favoreciendo la creación de múltiples empresas de manufactura, aunque de muy reducida productividad y, por ende, competitividad.

**Ilustración 2.** Bastidor de operación manual.



**Fuente.** Elaboración propia.

La tecnología de producción en SCI resulta ser entonces, una tecnología ya sin vigencia en el mundo, en cambio sí con muchas opciones evolucionadas hacia la automatización y control de procesos fabriles con tecnología de punta, aunque accesible en todos los entornos industriales.

**Ilustración 3.** Prensa hidráulica doble cilindro marca UTSCH.



**Fuente.** Elaboración propia.

La empresa alemana UTSCH<sup>2</sup> líder en el mercado mundial y cuya tecnología se encuentra disponible y es conocida en el país, se toma como referente tecnológico en este trabajo.

**Ilustración 4.** Prensa hidráulica moderna marca UTSCH<sup>3</sup>.



**Fuente.** [10]

La prensa hidráulica ha tenido una interesante evolución tecnológica, en la que se han integrado dispositivos digitales y la tecnología conexas, con posibilidades de redes digitales (Ilustración 4).

Estas prensas ostentan los mayores desempeños posibles, lo que las ha convertido en estándar del mercado, con inmensas posibilidades para la automatización.

**Ilustración 5.** Dados de estampado UTSCH.



**Fuente.** [11]

Los antiguos dados tallados en duraluminio han evolucionado a las matrices poliméricas articuladas y con el diseño especialmente orientado a la utilización en almacenes indexados automáticos (Ilustración 5).

Los bastidores de duraluminio se han reemplazado por bandejas de desplazamiento que permiten alojar las matrices sólo en el momento en que se va a estampar (Ilustración 6).

La mencionada evolución tecnológica permite en la actualidad el fácil rediseño de componentes hacia optimizadas formas que permiten el desarrollo de nuevos automatismos con base en modelos estructurados de control como el que se desarrolla en el presente trabajo.

**Ilustración 6.** Novedoso sistema manual de estampado UTSCH.



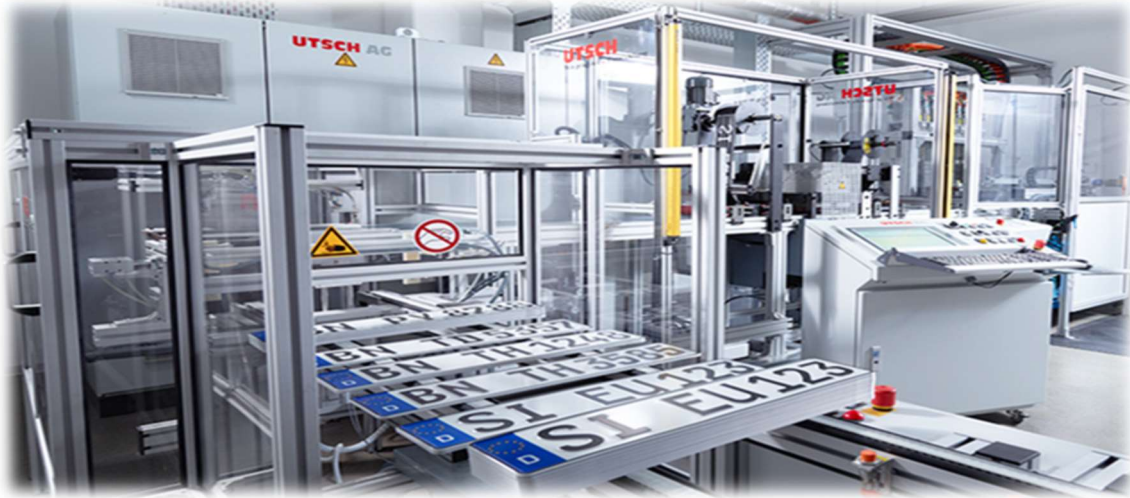
**Fuente.** [12]

<sup>2</sup> Empresa alemana fundada en 1961 por Erich Utsch AG. <https://www.utsch.com/>

<sup>3</sup> Toda imagen e información referente a productos de la marca alemana UTSCH, procede de la página oficial en el link <https://www.utsch.com/>.

Los actuales desarrollos están completamente orientados a sistemas automatizados de grandes cadencias de producción [12], evolucionando de manera constante hacia procesos integrados y automatizados *All in One*, con claros objetivos de mercado global (Ilustración 7).

**Ilustración 7.** Máquina completamente automática UTSCH.



Fuente. [13]

## **1.2. Formulación de la oportunidad tecnológica.**

La fabricación de PMA se lleva a cabo en pymes con procesos manuales de muy bajo desarrollo tecnológico en términos de máquinas, métodos productivos o automatización de éstos, de tal manera que las máquinas y los dispositivos son habitualmente fabricados con calidad técnica reducida, lo que redonda en grandes dificultades para obtener productos de buena calidad; de ahí que los costos estándar son habitualmente imprecendentes, pues la variabilidad de los procesos manuales y las dificultades técnicas de máquinas y equipos, impiden su establecimiento y control.

La demanda de las PMA en el mercado colombiano se tiene en el registro de cerca de 700.000 nuevos vehículos en los próximos dos años y en la reposición por pérdida o deterioro, lo que establece una baja rotación de producto comparativamente con países desarrollados, donde el comercio de las PMA es libre y de enormes volúmenes. De acuerdo con esto, no cabe pensar en inversiones en máquinas automatizadas de gran capacidad de producción que resultan onerosas e inconvenientes para el tamaño del sector productivo en cuestión.

El proceso de estampado de las PMA se lleva a cabo por el prensado, en prensa hidráulica, de bastidores con dados intercambiables alfanuméricos, que se combinan manualmente (Ilustración 8), lo que supone una inmensa y comprobada posibilidad de codificación equívoca, debido a factores humanos como distracción, falta de experticia y entrenamiento o en el peor de los casos por fallas intencionales.

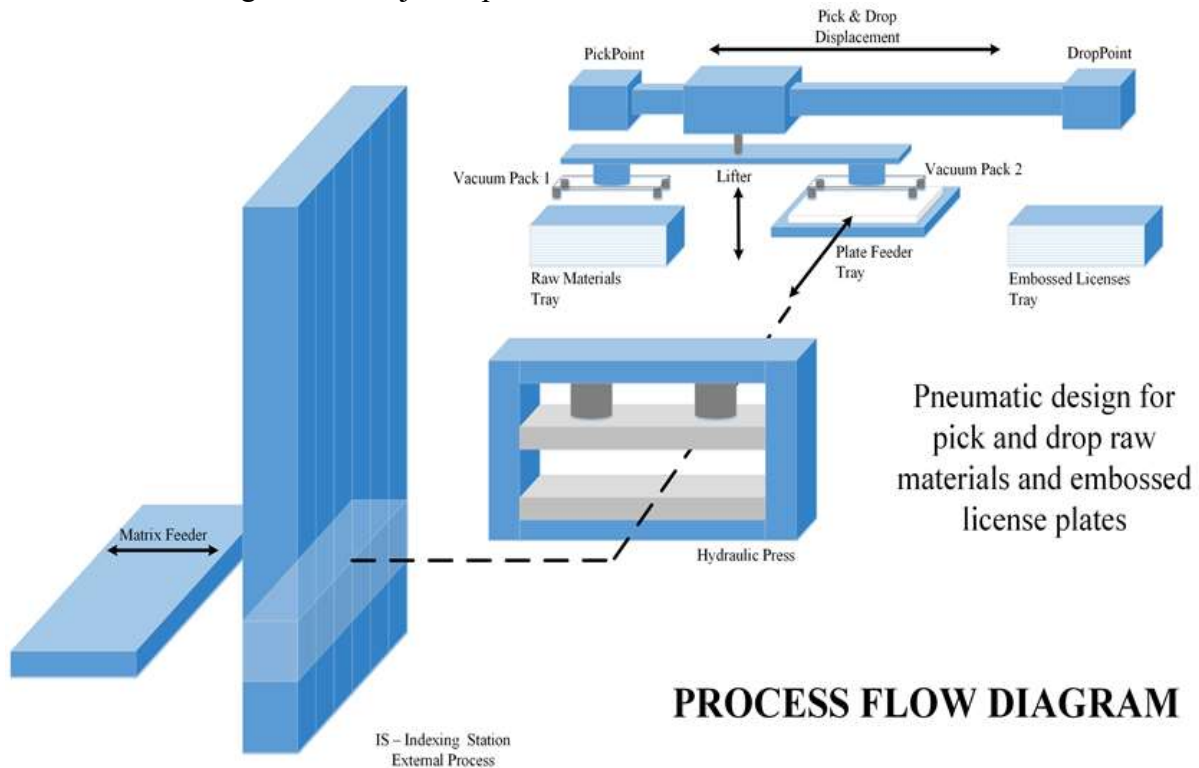
**Ilustración 8.** Intercambio de dados en bastidor.



**Fuente.** Elaboración propia.

En virtud de lo anterior, el problema a resolver corresponde con el núcleo operativo del proceso de estampado de las PMA, mediante la alimentación automatizada de dados alfanuméricos, del material preparado para estampado y de una prensa dispuesta para tal fin, con las respectivas acciones de prensado y retiro del producto semielaborado para continuar el proceso, cuyo modelo conceptual se observa en la Ilustración 9.

**Ilustración 9.** Diagrama de flujo del proceso.



**Fuente.** Elaboración propia.

Abordar la automatización del proceso productivo conceptualizado procede a partir del conocimiento y utilización de nuevas tecnologías, lo que establece la necesidad de competencias

múltiples desde el conocimiento integral del proceso, de los objetivos productivos, de los recursos tecnológicos en las disciplinas mecánica, eléctrica, neumática e hidráulica y de medios de diseño, modelado y simulación de procesos.

### **1.3. Definición de objetivos.**

El presente trabajo de modelado y simulación de procesos se aborda con base en diversas metodologías y tecnologías de desarrollo vigentes, de tal manera se garantiza la idoneidad de los resultados y de las propuestas metodológicas y tecnológicas.

#### **1.3.1. Objetivo general.**

Diseñar, modelar y simular el control automático de una prensa hidráulica y sus equipos auxiliares, para el proceso de estampado de PMA – Placas Matrículas Automotrices.

#### **1.3.2. Objetivos específicos.**

Los objetivos específicos que permiten alcanzar el objetivo general se encuentran planteados alrededor de metodologías de desarrollo a saber:

Conocer y entender el proceso productivo de PMA, sus debilidades y fortalezas como el principal insumo para las estrategias de diseño.

Diseñar, modelar y simular los sistemas eléctrico, neumático e hidráulico requeridos para el proceso de estampado de PMA.

Diseñar y modelar mediante una Red de Petri el proceso como uno de eventos discretos y generar las respectivas ecuaciones de estado.

Diseñar, modelar y simular el gráfico GRAFCET como una solución para la programación del sistema de control.

Aplicar metodológicamente la guía GEMMA en el diseño y desarrollo del control automático del proceso.

### **1.4. Justificación.**

Este trabajo se justifica por la contribución al entendimiento del control automático de procesos con fines productivos y a su relación, sin limitarse a ello, con la calidad y el costo final de las PMA.

En cuanto a la calidad de los productos obtenidos mediante un proceso automatizado, resulta evidente que la calidad de estos no dependerá de la intervención humana, lo cual asegura un alto estándar de repetitividad y reproducibilidad de los eventos productivos y por ende la estabilidad de la calidad del producto.

El costo que habitualmente se modifica en la variabilidad de los tiempos y movimientos y, especialmente se incrementa con los productos no conforme, se verá enormemente reducido al eliminar de manera importante las causas de la intervención humana.

El consumo energético es otro importante factor para considerar pues las demoras en los procesos, la repetición de productos defectuosos y los tiempos de máquina en espera generan consumos de energía cuyo valor se aplica a una menor cantidad de productos, afectando la competitividad global de la operación.

Con este trabajo se establecen útiles conceptos para el desarrollo de competencias requeridas para el diseño de sistemas de control, que estimadas a la luz de la ingeniería concurrente permitirán enriquecer los currículos académicos en aquellas instituciones técnicas que forman la base tecnológica del país.

Académicamente, este estudio resulta ser un conjunto de conocimientos que, si bien están apropiados por la academia para sistemas de control de gran tamaño, son poco densos para pequeños sistemas y para su estructura de calidad y costos. Con este trabajo se aportan bases metodológicas para establecer nuevas y futuras líneas de investigación en sistemas de control automático para procesos industriales en pequeñas empresas.

A nivel personal, se amplía el conocimiento tanto de la fenomenología particular del proceso de manufactura estudiado, como del diseño y estructuración de un proceso de modelado y simulación para controles automáticos.

El nuevo haber intelectual se convierte en una herramienta cognitiva con bajos costos de desarrollo y con una excelente calidad del producto final que aporta a pequeñas empresas, nuevas oportunidades de crecimiento y desarrollo tecnológico para una mayor productividad comparativa, desarrollando sistemas automatizados de control.

### **1.5. Estructura de la tesis.**

El desarrollo del presente trabajo se fundamenta en tres (3) componentes estructurales, el primero de los cuales es referido al *proceso industrial*, que se contextualiza con base en el diagrama de flujo de funciones cruzadas (Ilustración 10).

El segundo componente corresponde al *diseño para la automatización*, el cual ubica el problema directamente en el diseño del proceso de manufactura en el ambiente tecnológico natural de los sistemas eléctrico, neumático e hidráulico y que se conduce en el software *Automation Studio Professional, version 5.0.0.122*.

Aunado a lo anterior, el modelo del proceso desarrollado y del tablero de control, se llevó a cabo en el software *SketchUp 2018* [14], como una representación del pensamiento 3D, lo que establece enormes facilidades para la creación y las variaciones en función del avance lógico del proyecto, con la capacidad de exportar los modelos a sistemas más robustos de diseño paramétrico, para un posterior desarrollo del proyecto industrial.

El tercer componente corresponde al modelado y simulación del control automático, con su respectivo diseño, enmarcado en el uso y aplicación de las tecnologías aplicables para el análisis y el diseño como son las Redes de Petri, el GRAFCET y la guía GEMMA.

## 2. PROCESO INDUSTRIAL

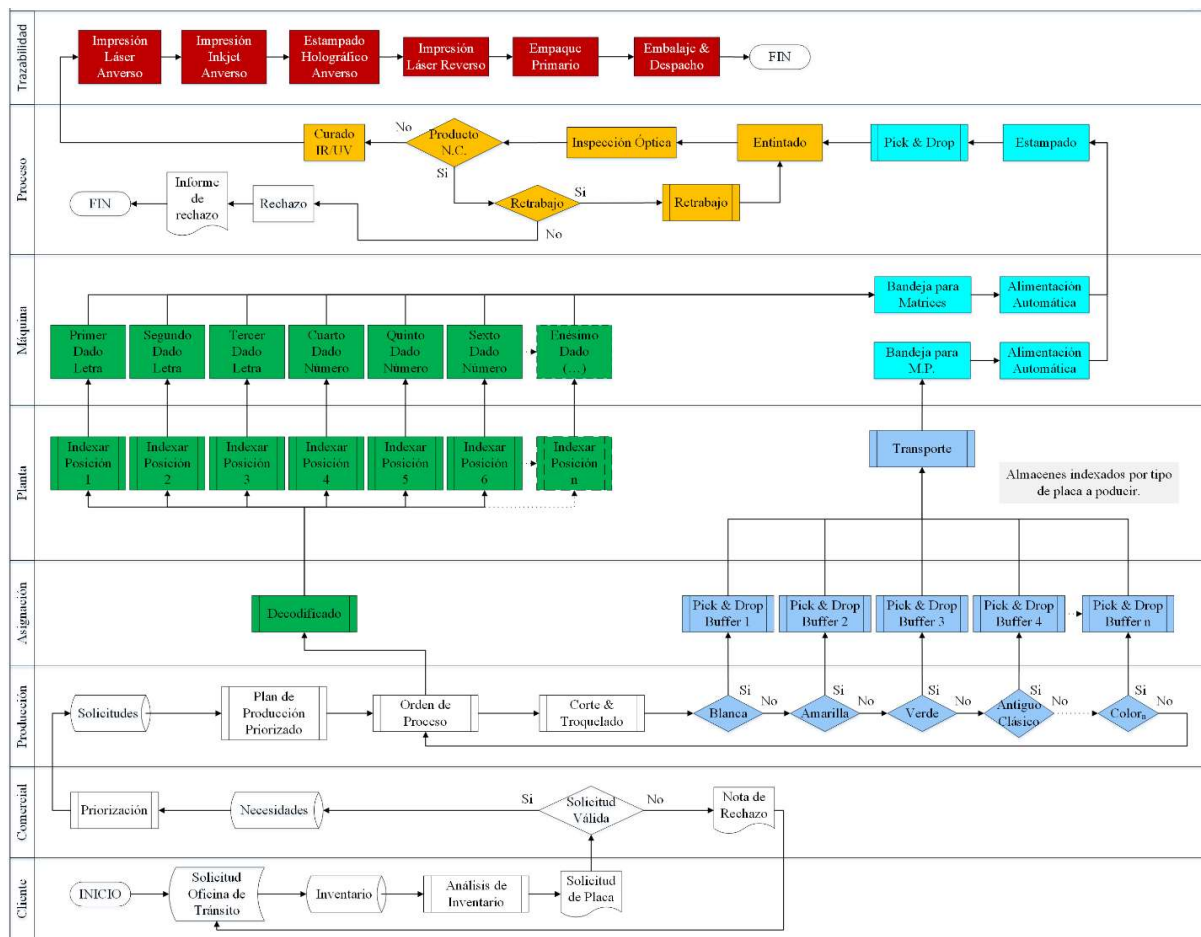
*Si buscas resultados distintos, no hagas siempre lo mismo.*

*Albert Einstein*

El proceso industrial esquematizado (Ilustración 10), corresponde con un modelo completo de la industrialización de PMA, en el cual se observan las funciones cruzadas entre departamentos y las oportunidades (en color) para automatización y control en la planta de producción.

Cinco (5) subprocesos de manufactura diferenciados por color se observan, con las siguientes características:

**Ilustración 10.** Diagrama de funciones cruzadas proceso industrial.

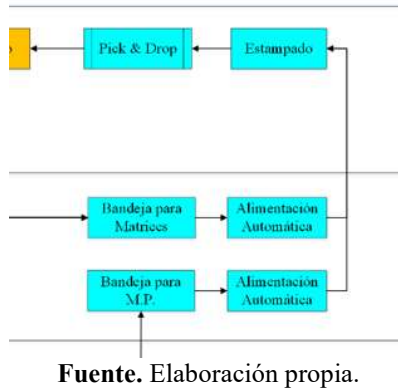


**Fuente.** Elaboración propia. Anexo 1.

El subproceso identificado con color verde corresponde con un almacén de indexado, que a partir de códigos generados en un sistema ERP con base en órdenes de proceso, dispone los datos de letras y números (todos individuales), en el código que debe ser estampado.

El subproceso identificado con color azul corresponde a una estación de selección de materiales pre cortados que, dependiendo de las órdenes de proceso emitidas, deben ser seleccionados para el estampado del código respectivo en el siguiente proceso.

**Ilustración 11.** Estampado PMA.



El subproceso identificado con color cian (Ilustración 11), corresponde al proceso que se desarrolla en este trabajo, en el cual se automatiza el control de la operación desde la disposición de los datos de estampado y la recepción de la materia prima, hasta la entrega de las PMA estampadas para los procesos subsiguientes.

El subproceso identificado con color naranja, siendo el proceso posterior al estampado, corresponde al entintado, verificación de las PMA elaboradas y el respectivo curado IR/UV.

El subproceso identificado con color rojo corresponde al proceso de marcado, trazabilidad, empaque y embalaje en concordancia con el sistema ERP

corporativo.

## 2.1. Proceso de manufactura.

Dado que el proceso de manufactura tiene un alto grado de dificultad y que en virtud de la ausencia de automatización se requiere capacitación y entrenamiento del operario para el desarrollo de las habilidades operativas para alcanzar el estándar de tiempo en fabricación, se realiza el respectivo análisis para el diseño y el desarrollo del control automático del proceso de estampado, en concordancia con las siguientes necesidades.

El proceso de manufactura corresponde con un ambiente típico de producción *MTO – Make to Order* [15], en el que las especificaciones de producto están establecidas en requisitos legales del Ministerio de Transporte, de obligatorio cumplimiento y en el que el *LT – Lead Time* para el cliente es inferior a las veinticuatro (24) horas, casi en la totalidad de los casos de las PMA individuales no seriadas; se tienen entonces dos (2) tipos básicos de solicitud de emisión de las PMA.

### 2.1.1. Solicitudes seriadas.

Este tipo de solicitudes se reciben en series autorizadas por el Ministerio de Transporte, habitualmente en paquetes de mil (1000) códigos, es decir, de dos mil (2000) PMA – dos por vehículo en el caso de los automóviles, y de mil (1000) PMA – una por vehículo en el caso de las motocicletas. El *LT – Lead Time* para el cliente queda sujeto a las condiciones contratadas.

Se presenta una gran incertidumbre en la generación de producto no conforme, debido a la monotonía de largas series y tiempos de proceso, que facilitan el error humano.

### 2.1.2. Solicitudes de reposición.

Estas solicitudes se reciben de manera individual, lo cual no obedece a paquetes seriados, introduciendo en el proceso gran incertidumbre en la generación de producto no conforme por la variabilidad de los códigos y los destinos, que se deben imprimir de uno en uno con algún orden específico. El *LT – Lead Time* para el cliente es usualmente exigido por éste en un tiempo no superior a veinticuatro (24) horas.

## 2.2. Preparación de materiales.

La preparación inicial de los materiales para la fabricación se realiza en la denominada línea de materiales en la que, a partir de una banda de aluminio en rollo y de una cinta reflectante adhesiva,

también en rollo, se colamina en línea como un material compuesto (Ilustración 12), que en el mismo proceso se corta en segmentos con la longitud adecuada a cada tipo de PMA requerida.

Este proceso surte un almacén de producto semielaborado en proceso, dado que después del colaminado debe tener un reposo no inferior a 48 horas, tiempo que es exigido por el fabricante de la cinta reflectante, pues la activación y curado del adhesivo corresponde a un proceso anaeróbico.

El material compuesto o colaminado, debe cumplir con unos estándares del Ministerio de Transporte, por lo que ensayos pertinentes deben ser realizados en este proceso y en su puesta a punto, para entregar un producto semielaborado en óptimas condiciones para el estampado.

**Ilustración 12.** Colaminado del material compuesto.



**Fuente.** Elaboración propia.

El material cortado se conserva clasificado y etiquetado, quedando dispuesto para su uso en lotes con la debida trazabilidad (Ilustración 13).

**Ilustración 13.** Segmentos de material colaminado.



**Fuente.** Elaboración propia.

Una vez cumplido el tiempo de reposo se procede al troquelado del material en el que en una única operación se corta a las dimensiones finales, se abren los orificios de fijación y se estampa el marco que rigidiza las PMA como límite de los textos y referencia para la lectura digital.

### **2.3. Proceso de estampado.**

El proceso de estampado se realiza por prensado en máquinas hidráulicas, cuyos puestos de trabajo se organizan con dos (2) bandejas, en una de las cuales se ubica la materia prima y en la otra se ubica el material ya estampado.

La capacidad normal del proceso entre ajustes y nueva puesta a punto es de un máximo de doscientas (200) unidades, obligando a frecuentes cambios dependiendo de la agilidad del operario, lo que introduce tiempos muertos por inactividad de máquina debido a cambios de material, reposo del operario, surtido de material para nuevo lote, reemplazo de material defectuoso o por producto no conforme, etc.

La secuencia del proceso de estampado se puede evidenciar en las siguientes acciones directas.

#### **2.3.1. Manejo del material colaminado.**

Cada puesto de trabajo es surtido con el material colaminado necesario para producción según órdenes de trabajo, en un almacén lateral a la prensa y en rangos de doscientas (200) unidades, del que se toma cada unidad de manera individual (Ilustración 14).

**Ilustración 14.** Puesto de trabajo para el estampado.



**Fuente.** Elaboración propia.

Dado que el material colaminado es un material polimérico en una de sus caras, en tanto que la otra cara es metálica, no resulta procedente arrastrar el material al tomar cada unidad, pues la película polimérica es muy sensible al rayado lo que dificulta el proceso manual y genera producto no conforme, causando demoras operativas importantes.

De lo anterior se puede entender que el material debe ser tomado uno por uno e izado verticalmente para no rayar el material en espera. Los operarios requieren de una especial capacitación en la tarea, pues las dificultades enunciadas afectan directamente la eficiencia de la operación.

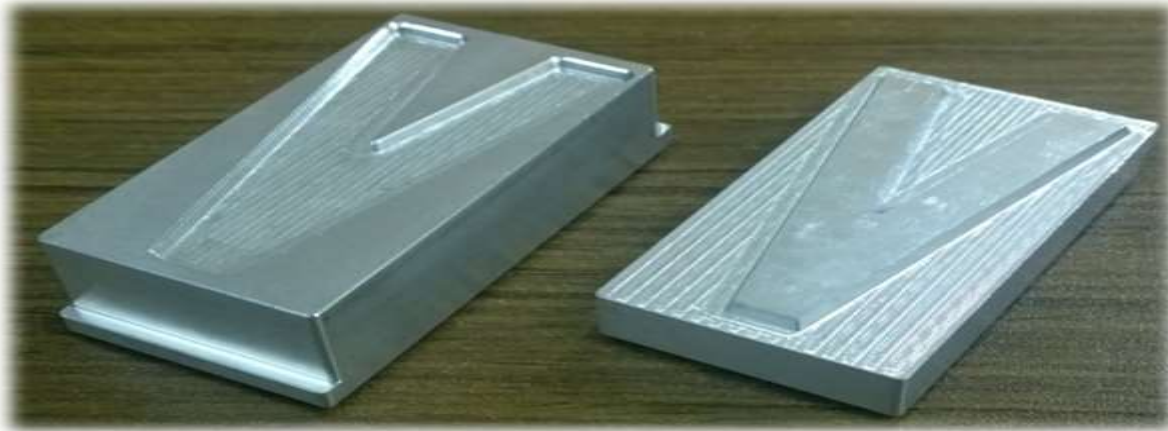
#### **2.3.2. Intercambio de dados.**

Los dados o matrices son piezas prismáticas en duraluminio, mecanizadas por arranque de viruta (Ilustración 15), constituidas por un dado con grabado en alto relieve (macho) que se ubica en la

parte inferior del bastidor y un dado con grabado en bajo relieve (hembra) que se ubica en la parte superior del bastidor.

Estos dados se intercambian manualmente en el bastidor (Ilustración 8), uno por uno en atención a la secuencia establecida por la respectiva orden de producción teniendo como atenuante, que las órdenes de producción pueden especificar la fabricación de una serie ordenada de PMA o pueden especificar grupos de PMA individuales no relacionadas en una secuencia ordenada.

**Ilustración 15.** Dados o matrices para el estampado.



**Fuente.** Elaboración propia.

Lo anterior determina dos modos de operación en máquina, siendo el primero el más favorable, en el sentido de reemplazar los dados correspondientes a los dígitos que siguen la numeración decimal creciente o decreciente o a la conocida secuencia del alfabeto. Este modo de operación en máquina no reviste mayor dificultad que la de atender las secuencias alfanuméricas con un alto grado concentración.

El segundo modo de operación en máquina que es el menos favorable conlleva a reemplazar la totalidad de los dados después de cada PMA realizada, siguiendo un código completamente diferente en seis dígitos (caso de Colombia), exigiendo una mayor atención del operario.

**2.3.3. Estampado del material troquelado.**

El medio productivo para repujado (Ilustración 2), constituido por dos (2) PMA de duraluminio articuladas en quijada (bastidor) y su conjunto de matrices alfanuméricas (dados), se ubican y retiran manualmente de la prensa hidráulica.

Dado que el conjunto indicado tiene un peso aproximado de 15 kilogramos y aunque las superficies sobre las que se desliza el bastidor son metálicas, resulta que después de varios cientos de veces de realizar el trabajo manualmente, el cansancio del operario es evidente y la imprecisión en la ubicación en la prensa comienza a ser relevante en el proceso. Lo anterior determina que la automatización es requerida, en pro de la productividad y la competitividad empresariales.

La Ilustración 16 permite observar en detalle un estampado en el material de PMA, y la perfecta alineación entre macho y matriz, lo que determina un producto conforme.

**Ilustración 16.** Características del estampado en un segmento de aluminio.



**Fuente.** Elaboración propia.

Varias consideraciones se han de tener en cuenta para el proceso de estampado, a saber, alineación de las matrices (hembra y macho), alineación de las matrices con el marco de referencia de la palca, alineación de la matriz correspondiente a la oficina de matrícula, la altura de los diferentes dados, el desgaste por aplastamiento cruzado (cerrar dados hembra o macho de diferentes caracteres), ubicación del bastidor cerrado en la mesa de la prensa, etc.

**Ilustración 17.** Acción de estampado en prensa.



**Fuente.** Elaboración propia.

Visto lo anterior, queda establecido que el posicionamiento relativo entre dados, material y bastidor son los factores más importantes para controlar, resultando de especial importancia el relevar o por lo menos reducir la intervención humana.

Después de haber colocado los dados y el material colaminado y troquelado entre las guías dispuestas para tal fin en el bastidor, todo el conjunto como medio productivo se ubica dentro de

la prensa de repujado; entonces, se ejecuta el prensado y se procede a retirar el bastidor de la prensa, siempre manualmente.

Dadas las características de la máquina y del estado o ausencia de los sistemas de seguridad, se determina para el operario una exposición a riesgo por aplastamiento, lo que genera incertidumbre, falta de confianza, estrés y en muchos casos accidentes de trabajo.

Finalmente, y en virtud de lo ya expuesto resulta claro el siguiente colofón, sin limitarse a este:

- La exposición a los riesgos asociados a los procesos manuales es permanente, intimidante y ralentizador incuestionable de los procesos productivos.
- La intervención humana requiere de entrenamiento y experticia que deben desarrollarse en largos periodos de tiempo.
- Los reemplazos de personal son costos en desarrollo de habilidades, conocimiento del proceso y reentrenamientos.
- Los yerros en proceso son habituales dadas las condiciones de mano de obra intensiva y su obvia subjetividad.
- El establecimiento de costos estándar resulta improcedente en procesos no normalizados y erráticos.
- La generación de producto no conforme es incontrolable y costosa, lo que afecta tiempos de entrega y la utilidad operativa, con los obvios costos en la repetición.
- La productividad humana, que es dependiente de la estandarización de procesos, es reducida e inestable afectando directamente la competitividad empresarial.



### 3. SISTEMAS PARA AUTOMATIZACIÓN

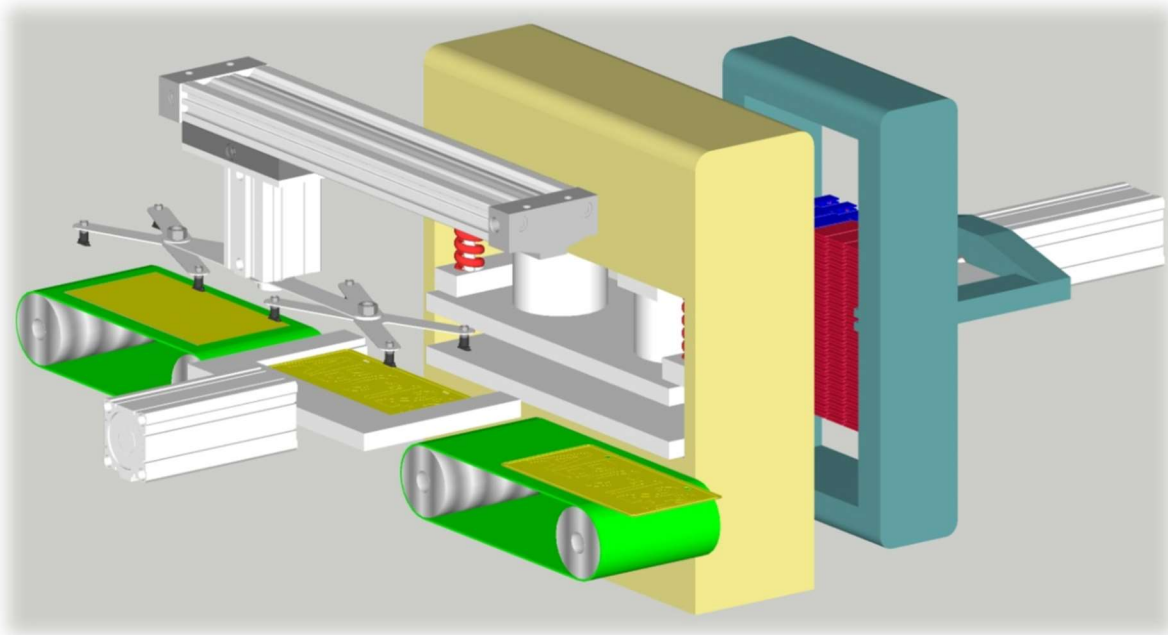
*La mente que se abre a una nueva idea jamás volverá a su tamaño original.*

*Albert Einstein*

Todo proceso de automatización debe tener como base una particular configuración de bastidores, actuadores y sensores (Ilustración 18), en un indispensable concepto multidisciplinario, pues en última instancia, el control automático se materializa en el accionamiento físico de sistemas mecánicos que han de ser congruentes con las funciones y capacidades esperadas, diseñadas y obtenidas.

Los sistemas mecánicos en cada proceso de manufactura deben ser debidamente estudiados en su cinemática y en su dinámica, de tal manera que no solo se presuma su operatividad, sino que permita la adecuada selección de actuadores y sensores, lo que una vez realizado permite dimensionar las necesidades de los equipos de control.

**Ilustración 18.** Estación automatizada para el estampado.



**Fuente.** Elaboración propia.

El presente trabajo de diseño de un control automático para el estampado de PMA, tiene como base de automatización una prensa hidráulica (*HP – Hydraulic Press*), de dos (2) cilindros, típica de este proceso (Ilustración 19), con las intervenciones y nuevos diseños que se plantean y que permitirán su adecuada configuración como una estación automatizada de estampado.

El diseño del proceso se seguirá para un producto típico, como segmentos fabricados en Aluminio 1100, 1200 ó 3003, temple  $\geq$  H12, en la perspectiva de las dos (2) necesidades recurrentes, a saber:

- Fabricación en línea de una (1) unidad, lo cual aplica para vehículos que requieren una sola PMA como remolques, motocarros y vehículos en licencia transitoria, entre otros.

- Fabricación en línea de dos (2) unidades idénticas, lo cual aplica para vehículos que requieren de dos (2) PMA como vehículos particulares, públicos y diplomáticos.

**Ilustración 19.** Prensa hidráulica de dos cilindros UTSCH.



Fuente. Elaboración propia.

De acuerdo con la Tabla 3, se establece la mayor dimensión y el mayor peso en PMA para autos, lo cual permite determinar las dimensiones y capacidades de los elementos actuadores y los dispositivos.

**Tabla 3.** Medidas & Peso en PMA.

Variable	PMA Motos	PMA Autos
Espesor base	0,9 mm	0,9 mm
Ancho	105,0 mm	160,0 mm
Largo	235,0 mm	330,0 mm
Volumen	22,2 cm <sup>3</sup>	47,5 cm <sup>3</sup>
Densidad	2,7 g/cm <sup>3</sup>	2,7 g/cm <sup>3</sup>
Peso base	60,4 g	129,3 g

Fuente. Elaboración propia [16]

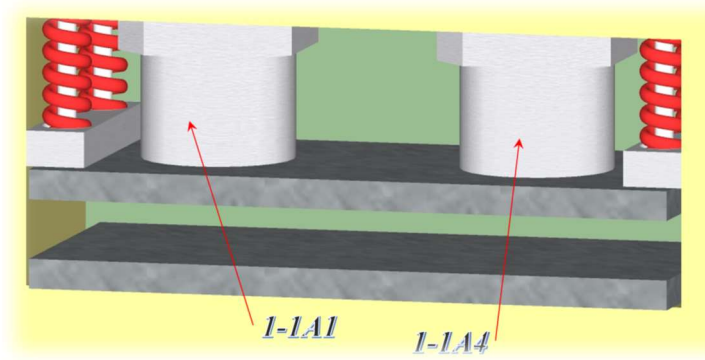
De lo anterior se establece que a partir de la dimensión física del producto en proceso y con un factor de seguridad de dos (2), el peso mínimo por segmento a ser manejado por los actuadores neumáticos y las ventosas de vacío es de 260 g.

Aunque el diseño y cálculo de los actuadores no son del alcance de este trabajo, algunos cálculos básicos y necesarios se indican para verificar las capacidades con la dimensión física del producto en proceso.

### 3.1. Sistemas mecánicos.

Dado que el diseño de la prensa actual es con plato inferior ascendente, se deberá invertir el concepto a una con placa inferior fija para dar nivel único de referencia al accionamiento de las bandejas alimentadoras de matrices (*MF – Matrix Feeder*), y de materiales (*PF – Plate Feeder*), dejando la placa superior móvil para el estampado (Ilustración 20).

**Ilustración 20.** Prensa Hidráulica Modificada.



Fuente. Elaboración propia.

Las dimensiones de los cilindros hidráulicos *I-1A1* y *I-1A4*, con diámetro de émbolo de 100 mm y recorrido 100 mm, no serán modificadas pues éstas son de comprobada funcionalidad, de la misma manera que el sistema hidráulico básico.

Los resortes de compensación, que trabajan a compresión, tienen como función balancear mecánicamente el plato móvil, dado que éste se desplaza por el accionamiento de dos (2)

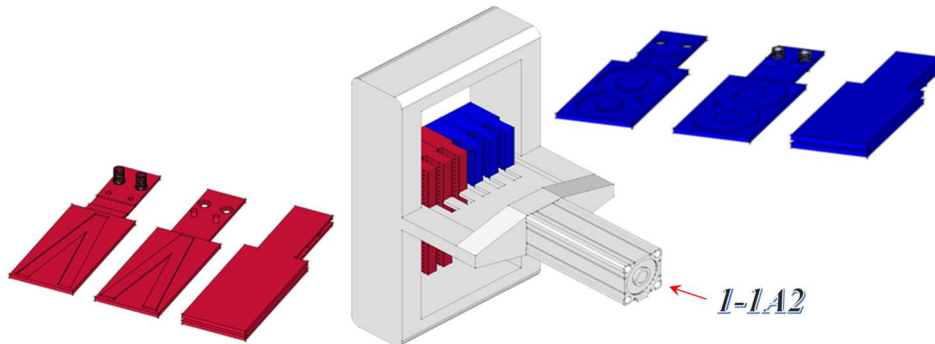
cilindros hidráulicos independientes, lo que introduce incertidumbre en el paralelismo del plato móvil con respecto al plato fijo; sin embargo, el sistema hidráulico ha sido diseñado incluyendo el componente *I-1V26 Divisor de caudal compensado en presión y temperatura, diámetro 5,6 mm*.

En cuanto al bastidor para la alimentación de matrices, entregadas en orden desde un indexador externo, con su respectiva bandeja accionada hidráulicamente, éste deberá ser diseñado y fabricado en conjunto con el indexador mismo en proyectos ulteriores.

Visto lo anterior, se considerará únicamente la actuación del cilindro hidráulico *I-1A2* sobre una bandeja desplazable, para la ubicación de las matrices entre los platos de la prensa, con sus respectivos sensores de posición (Ilustración 21).

**Nota.** Otros componentes como bastidores, muebles y líneas eléctricas, neumáticas e hidráulicas deben ser consideradas y estudiadas en ulteriores etapas de construcción en planta.

**Ilustración 21.** Indexador automatizado proceso externo.

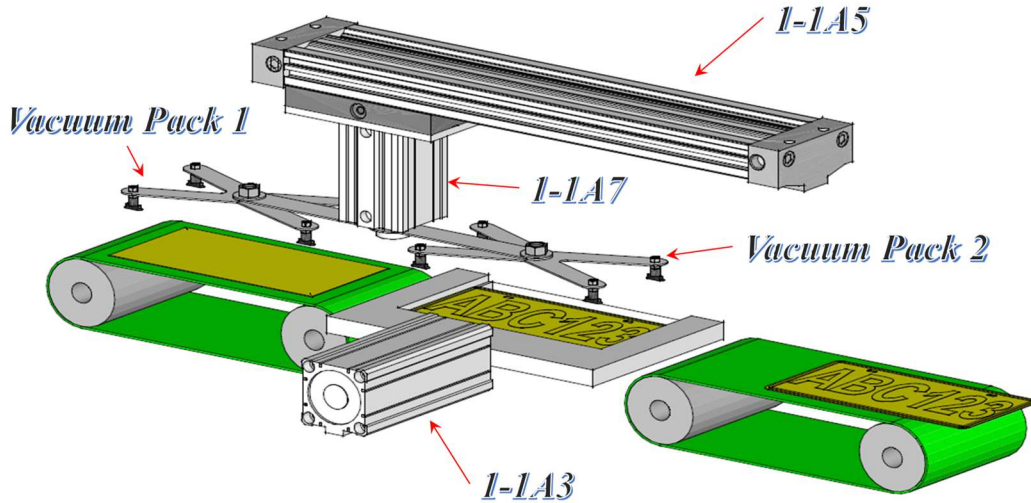


Fuente. Elaboración propia.

En cuanto al sistema neumático para el manejo del material para estampado, se tiene un montaje básico en un actuador neumático sin vástago *I-1A5*, cuya estructura es soporte para un segundo actuador neumático *I-1A7* y el sistema de ventosas *Vacuum Pack 1&2* para el vacío (véase Ilustración 22).

El componente identificado como *1-1A3*, corresponde a un actuador hidráulico, que desplazará el bastidor con el material a ser introducido entre los platos de la prensa y, por ende, retirará el mismo material ya estampado de la prensa.

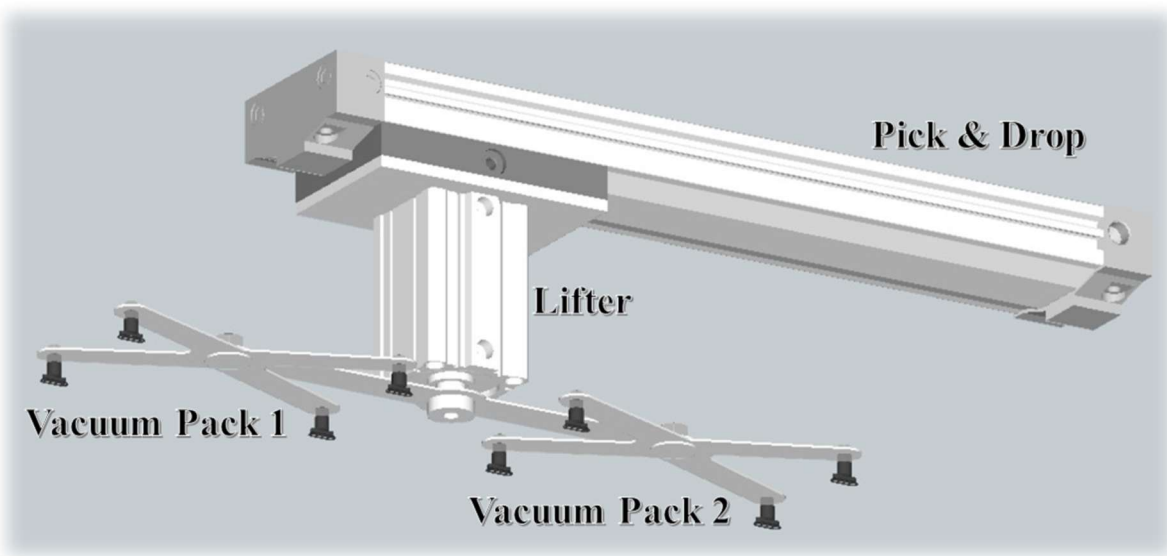
**Ilustración 22.** Manipulación y transporte neumático.



Fuente. Elaboración propia.

En la Ilustración 22 se observan dos (2) bandas transportadoras, las cuales no requieren de automatización y control, lo cual es reemplazado por un sencillo control externo de velocidad, y cuya sincronía se ajusta con el accionar de la prensa hidráulica; este equipo no se incluye en el control al igual que un contador digital externo que acumula pasadas con cada accionar de la prensa.

**Ilustración 23.** Unidad neumática para el manejo de materiales.



Fuente. Elaboración propia.

### 3.2. Sistema eléctrico.

El sistema eléctrico trifásico (Ilustración 24), corresponde a una alimentación trifásica de 220V, 60 Hz, de uso típico industrial, cuya instalación debe ser realizada según las regulaciones técnicas y de seguridad pertinentes y se diagrama con los dos (2) motores y sus respectivos guarda motores.

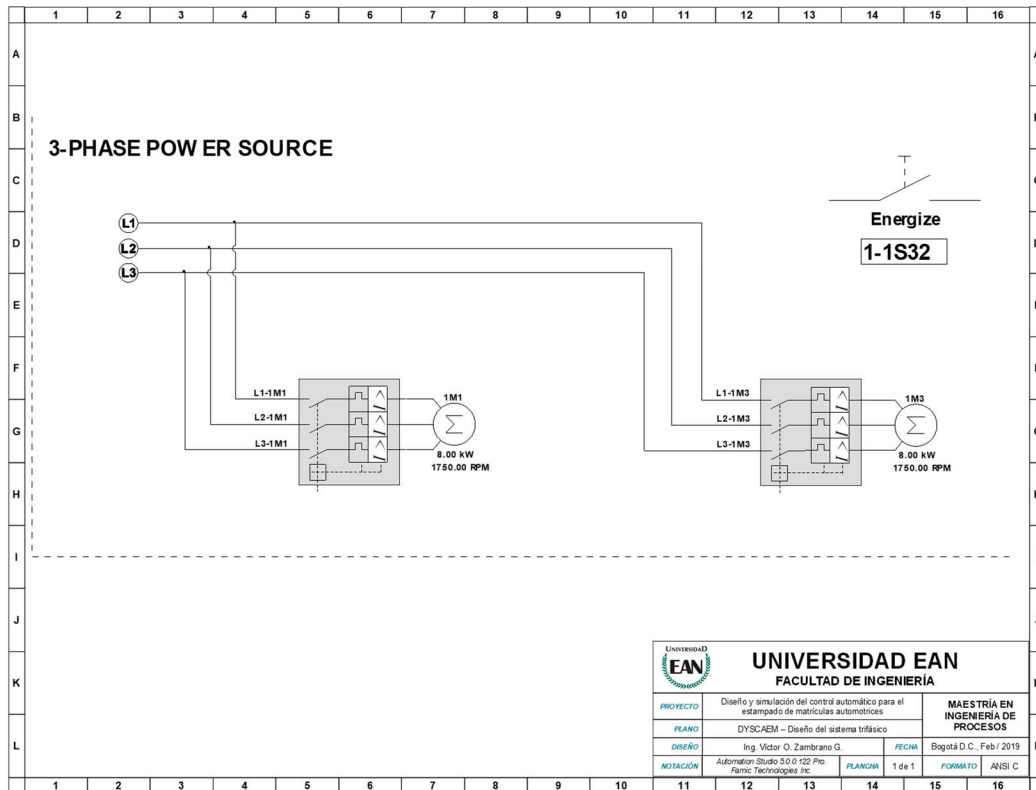
Los motores eléctricos son máquinas que, en virtud de su diseño tecnológico, están capacitadas para funcionar entre el 50% y el 100% de la carga nominal, con una eficiencia máxima cercana al 75% de la carga nominal; lo anterior establece al motor eléctrico como la mejor opción para la potencia mecánica de las bombas del proyecto (Tabla 4).

**Tabla 4.** Componentes del sistema trifásico.

Código	Descripción
<b>1M1</b>	Motor eléctrico de 8 kW, 1750 rpm, con el respectivo guarda motor.
<b>1M3</b>	Motor eléctrico de 8 kW, 1750 rpm, con el respectivo guarda motor.

Fuente. Elaboración propia.

**Ilustración 24.** Circuito trifásico motores.



Fuente. Elaboración propia. Anexo 2.

Todo sistema de potencia debe considerar en su diseño un *Braker* general en el tablero de barras y un interruptor para el energizado, el cual se considera en el diseño del tablero de control en piso.

**Nota.** Otros componentes como bastidores, barrajes y líneas eléctricas deben ser consideradas y estudiadas en ulteriores etapas de construcción en planta.

### 3.3. Sistema neumático.

Los sistemas de aire comprimido o neumáticos proporcionan movimientos controlados mediante el uso de cilindros y motores neumáticos, lo que aunado a bajos costos de estos componentes, a la facilidad en el diseño y montaje de proyectos, y particularmente a las bajas fuerzas que se pueden obtener y controlar a bajas presiones, típicamente 0,80 MPa (8 bar), los convierte en sistemas con condiciones altamente deseables de seguridad y costo [17].

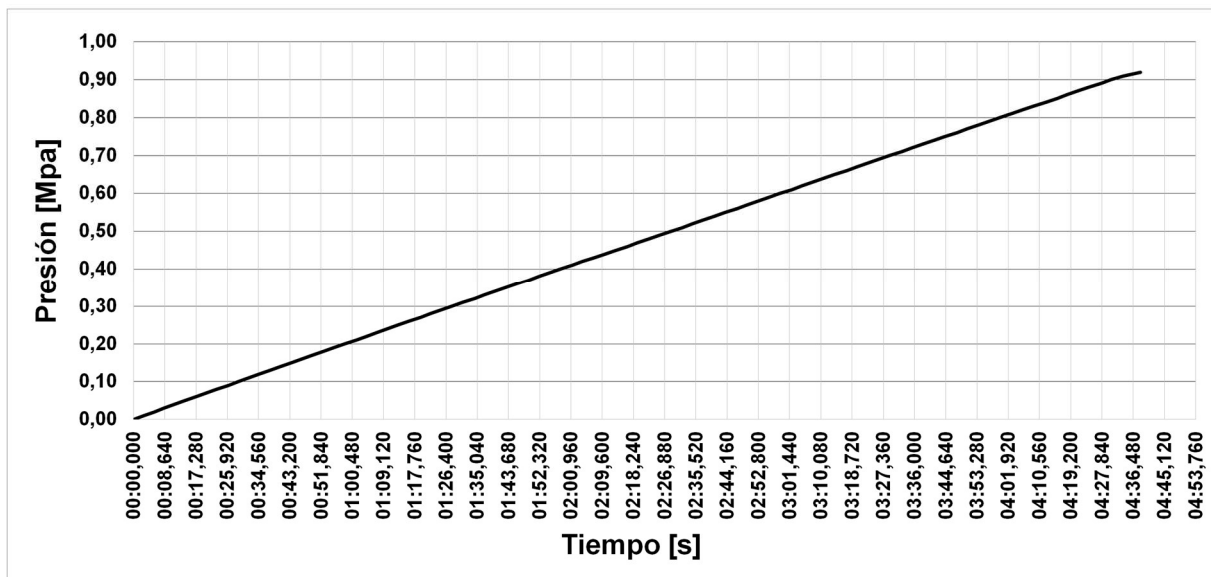
La velocidad inestable debida a la compresibilidad del aire y las fugas como pérdida de energía son dos (2) grandes desventajas de estos sistemas que, en virtud de los cortos recorridos para el manejo de materiales, son condiciones que se presumen inocuas para la operación.

El sistema neumático (Ilustración 26), se conforma por tres (3) subsistemas a saber:

#### 3.3.1. Unidad generadora de aire comprimido.

La unidad generadora de aire comprimido para este trabajo, con acumulador de un metro cúbico (1m<sup>3</sup>) a una presión de trabajo de 0,8 MPa (8 bar), ha sido especificada con componentes individuales con base en la oferta del software de desarrollo, aunque se debe tener en cuenta que la oferta comercial es innumerable en referencias y opciones, incluso para equipos totalmente auto contenidos v. gr., estaciones generadoras de aire comprimido con compresor de tornillo.

**Ilustración 25.** Diagrama de correlación Presión – Tiempo.



Fuente. Elaboración propia.

Una vez iniciada la operación de la unidad de aire comprimido (Ilustración 26), el acumulador elevará la presión de acuerdo con el comportamiento observado en la Ilustración 25, lo que corresponde a un tiempo estimado de cinco (5) minutos para habilitar la disponibilidad de presión suficiente para la puesta a punto inicial. Debido a la cantidad de puntos incluidos en la ilustración, la gráfica se observa lineal y constante, lo cual no corresponde a la realidad; en una gráfica con muchos menos puntos se observarían las variaciones de presión sin atenuación.

La unidad de aire comprimido se encuentra conformada por los siguientes componentes:

**Tabla 5.** Componentes de la unidad de aire comprimido.

Código	Descripción
1-11	Compresor con árbol izquierdo, 1800 rpm, 350 cm <sup>3</sup> /rev, Flujo 630 l/min.
1-1L75	Silenciador.
1-1C3	Secador.
1-1C4	Filtro con drenaje automático.
1-1S15	Válvula de seguridad ajustable, presión apertura 0,8 MPa.
1-1V14	Regulador de presión, presión ajuste 0,80 MPa.
1-1C5	Lubricador.
1-1P5	Acumulador hidroneumático con separador, diámetro 500 mm, volumen 0,10 m <sup>3</sup> , precarga 0,20 MPa.
1-1M2	Manómetro.
1-1S15	Sensor de presión.

Fuente. Elaboración propia.

El sensor de presión *1-1S15* tiene la función de producir una señal después de haberse sobrepasado una presión tal que se permita la operación continuada.

### 3.3.2. Unidad de manejo de materiales.

En la unidad de manejo de materiales se da uso a un actuador neumático sin vástago *1-1A5* para el desplazamiento de los materiales *Pick & Drop* dado que es un actuador de reducidas dimensiones y requiere poco espacio para sus desplazamientos.

Adicionalmente, este actuador tiene la estructura adecuada para el montaje completo de la unidad con el actuador para el izado *lifter 1-1A7* y los dos (2) paquetes con cuatro (4) generadores de vacío y cuatro (4) ventosas cada uno, *Vacuum Pack 1&2* (Ilustración 23).

Esta unidad maneja los materiales del proceso levantando simultáneamente por acción del vacío, un segmento de material a ser estampado y el material ya estampado (semielaborado), ubicándoles la primera en la bandeja para estampado y la segunda en una banda transportadora para el proceso subsiguiente.

Los consumos esperados por hora, para ciclos de quince (15) segundos (Ilustración 36), se exponen en la siguiente Tabla 6, para un consumo total de 0,8577 m<sup>3</sup>/hr.

**Tabla 6.** Consumo Sistema Neumático.

	Actuador 1-1A5		Actuador 1-1A7			
Diámetro émbolo [cm]	6	Área [cm <sup>2</sup> ]	28,27	5	Área [cm <sup>2</sup> ]	19,63
Diámetro vástago [cm]	-	Área [cm <sup>2</sup> ]	-	2	Área [cm <sup>2</sup> ]	3,14
Recorrido émbolo [cm]	60			5		
Volumen avance [cm <sup>3</sup> ]	1 696,46					98,17
Volumen retroceso [cm <sup>3</sup> ]	1 696,46					82,47
Volumen total ciclo [cm <sup>3</sup> ]	3 392,92	[m <sup>3</sup> ]	0,00339292			180,64
Ciclos por hora	240					240
Consumo aire comp. [m <sup>3</sup> /hr]	0,8143					0,0434

Fuente. Elaboración propia.

A continuación, se indican los componentes de la unidad de manejo de materiales, con base en la oferta del software de diseño, teniendo en cuenta que comercialmente se dispone de una oferta más amplia, especializada y evolucionada.

**Tabla 7.** Componentes de la unidad de manejo de materiales.

<b>Código</b>	<b>Descripción</b>
<b>1-1A5</b>	Cilindro neumático sin vástago, diámetro del émbolo 60 mm, recorrido 600 mm, fuerza máxima 100 kN.
<b>1-1A7</b>	Cilindro neumático, diámetro de émbolo 50 mm, diámetro de vástago 20 mm, recorrido 50 mm, fuerza máxima 100 kN.
<b>1-1V19</b>	Válvula de cierre normalmente abierta (NA) dos (2) vías.
<b>1-1V3</b>	Válvula 5/3 NC - Doble control eléctrico.
<b>1-1V20</b>	Válvula de cierre normalmente abierta (NA) dos (2) vías.
<b>1-1V5</b>	Válvula 5/3 NC - Doble control eléctrico.
<b>1-1V21</b>	Válvula de cierre normalmente abierta (NA) dos (2) vías.
<b>1-1V6</b>	Válvula 3/2 NC - Control eléctrico, con muelle de recuperación.
<b>PD11</b>	Sensor de proximidad.
<b>PD12</b>	Sensor de proximidad.
<b>PD21</b>	Sensor de proximidad.
<b>PD22</b>	Sensor de proximidad.

Fuente. Elaboración propia.

### 3.3.3. Arreglo generador de vacío.

Los dos (2) arreglos de cuatro (4) generadores de vacío con sus respectivas ventosas por cada posición de material (Ilustración 23), tiene la capacidad de generar una fuerza teórica de aspiración de hasta 8N (815 g-f) en cada una de las ventosas. De acuerdo con esto, cuatro ventosas actuando sobre un segmento de material, tendrían la capacidad de levantar hasta 3,26 kg, lo que garantiza la segura manipulación en transporte de las PMA.

A continuación, se indican los componentes de las dos (2) unidades de vacío, con base en la oferta del software de diseño, teniendo en cuenta que comercialmente se dispone de una oferta más amplia, especializada y evolucionada.

**Tabla 8.** Componentes del arreglo generador de vacío.

<b>Código</b>	<b>Descripción</b>
<b><i>Vacuum Pack 1</i></b>	
<b>1-1P3</b>	Generador de vacío, Caudal máximo 0,5 m <sup>3</sup> /s.
<b>1-1P4</b>	Generador de vacío, Caudal máximo 0,5 m <sup>3</sup> /s.
<b>1-1P6</b>	Generador de vacío, Caudal máximo 0,5 m <sup>3</sup> /s.
<b>1-1P7</b>	Generador de vacío, Caudal máximo 0,5 m <sup>3</sup> /s.
<b>1-1A6</b>	Ventosa ovalada, material silicona, acople roscado.
<b>1-1A8</b>	Ventosa ovalada, material silicona, acople roscado.
<b>1-1A9</b>	Ventosa ovalada, material silicona, acople roscado.
<b>1-1A10</b>	Ventosa ovalada, material silicona, acople roscado.
<b><i>Vacuum Pack 2</i></b>	
<b>1-1P12</b>	Generador de vacío, Caudal máximo 0,5 m <sup>3</sup> /s.

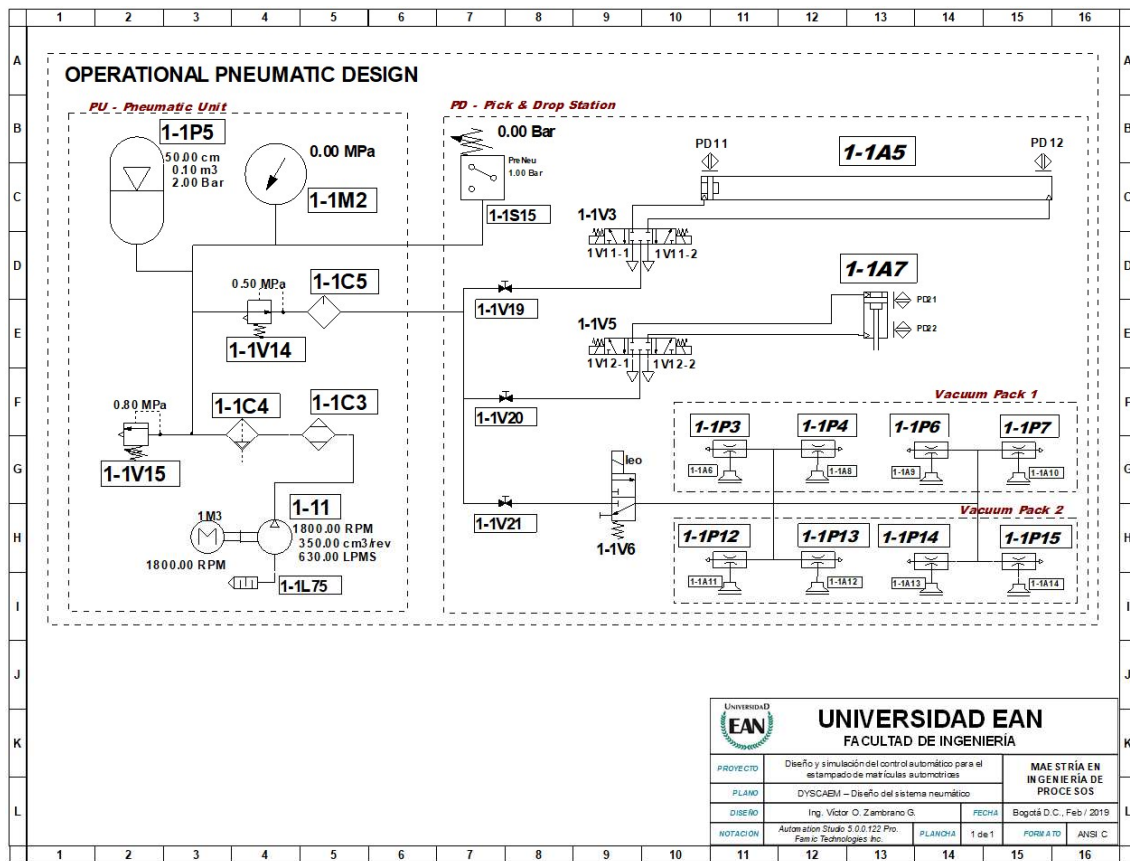
**Tabla 8.** Componentes del arreglo generador de vacío.

<b>1-1P13</b>	Generador de vacío, Caudal máximo 0,5 m <sup>3</sup> /s.
<b>1-1P14</b>	Generador de vacío, Caudal máximo 0,5 m <sup>3</sup> /s.
<b>1-1P15</b>	Generador de vacío, Caudal máximo 0,5 m <sup>3</sup> /s.
<b>1-1A11</b>	Ventosa ovalada, material silicona, acople roscado.
<b>1-1A12</b>	Ventosa ovalada, material silicona, acople roscado.
<b>1-1A13</b>	Ventosa ovalada, material silicona, acople roscado.
<b>1-1A14</b>	Ventosa ovalada, material silicona, acople roscado.

Fuente. Elaboración propia.

El arreglo generador de vacío para el izado de los materiales requiere además de los componentes mencionados, elementos de montaje y fijación lo cual, debido al proceso de automatización requieren tener características especiales como bajo peso, rigidez, diseño de partes para movimiento, vibración reducida, resistencia al medio ambiente, entre otros.

**Ilustración 26.** Sistema neumático.



Fuente. Elaboración propia. Anexo 3.

### 3.4. Sistema hidráulico.

Los sistemas hidráulicos proporcionan gran potencia con posicionamientos precisos, arranque con cargas pesadas y movimientos lineales independientes de la carga, lo que los convierte en sistemas con condiciones altamente deseables para el acondicionamiento de dispositivos, equipos y máquinas, de tal manera que los bastidores, bandejas y la prensa misma sean actuados con seguridad y precisión [18].

El sistema hidráulico (Ilustración 27), se encuentra conformado por los siguientes subsistemas y componentes:

#### 3.4.1. Unidad hidráulica.

La unidad hidráulica consiste básicamente en un circuito conformado por una bomba, un tanque acumulador hidráulico y la red de tuberías para la alimentación de los actuadores hidráulicos y otros componentes propios del sistema.

A continuación, se indican los componentes de la unidad hidráulica, con base en la oferta del software de diseño, teniendo en cuenta que comercialmente se dispone de una oferta más amplia, especializada y evolucionada.

**Tabla 9.** Componentes unidad hidráulica.

<b>Código</b>	<b>Descripción</b>
<b>1-1C6</b>	Depósito atmosférico ajustable
<b>1-1C2</b>	Enfriador
<b>1-1C1</b>	Filtro
<b>1-1M6</b>	Manómetro
<b>1-1P1</b>	Bomba unidireccional de cilindrada fija con un (1) eje, 1750 rpm, 350 cm <sup>3</sup> /rev., 612,5 l/min (0,6125 m <sup>3</sup> /min).
<b>1-1V7</b>	Válvula antirretorno con resorte
<b>1-1V9</b>	Válvula de Cierre Normalmente Abierta (2 vías)
<b>1-1V1</b>	Válvula de secuencia ajustable, con presión de apertura a 8 MPa.
<b>1-1M5</b>	Termómetro
<b>1-1M4</b>	Manómetro
<b>1-1P11</b>	Acumulador hidroneumático con separador

Fuente. Elaboración propia.

#### 3.4.2. Prensa hidráulica doble cilindro.

La prensa hidráulica (Ilustración 20), es una máquina hidráulica que como su nombre lo indica, está dotada de un sistema generador de presión hidráulica para realizar los movimientos de potencia en prensado y de retorno o posicionado de acuerdo con el estado del proceso.

Cada cilindro está dotado de dos sensores de final de recorrido, a partir de los cuales se conoce la posición. En el recorrido de potencia de los cilindros de la prensa, en la activación de los sensores se toma tal señal para el conteo de unidades a discreción del operador, mediante el contador en el tablero de control (Ilustración 29).

A continuación, se indican los componentes de la unidad de estampado, con base en la oferta del software de diseño, teniendo en cuenta que comercialmente se dispone de una oferta más amplia, especializada y evolucionada.

**Tabla 10.** Componentes unidad de estampado.

<b>Código</b>	<b>Descripción</b>
<b>1-1V16</b>	Válvula de cierre normalmente abierta (NA) dos (2) vías.
<b>1-1V22</b>	Válvula antirretorno con resorte, presión de apertura 0,1 MPa.
<b>1-1V2</b>	Válvula 4/3 NC - Doble control eléctrico.
<b>1-1V26</b>	Divisor de caudal compensado en presión y temperatura, diámetro 5,6 mm.
<b>1-1A1</b>	Cilindro hidráulico, diámetro de émbolo 50 mm y vástago de 20 mm, recorrido 50 mm, fuerza 100 kN (máx.).
<b>1-1A4</b>	Cilindro hidráulico, diámetro de émbolo 50 mm y vástago de 20 mm, recorrido 50 mm, fuerza 100 kN (máx.).
<b>HP11</b>	Sensor de proximidad.
<b>HP12</b>	Sensor de proximidad.
<b>HP21</b>	Sensor de proximidad.
<b>HP22</b>	Sensor de proximidad.

Fuente. Elaboración propia.

### 3.4.3. Unidad de alimentación de matrices.

En esta unidad (Ilustración 21), se controla el actuador *I-1A2*, el cual introduce y retira el bastidor que contiene las matrices indexadas en el código que se va a estampar. La tarea de indexación es llevada a cabo por una estación de indexado externa cuyo diseño no es abordado en este proyecto.

A continuación, se indican los componentes de la unidad de alimentación de matrices, con base en la oferta del software de diseño, teniendo en cuenta que comercialmente se dispone de una oferta más amplia, especializada y evolucionada.

**Tabla 11.** Componentes unidad de alimentación de matrices.

<b>Código</b>	<b>Descripción</b>
<b>1-1V17</b>	Válvula de cierre normalmente abierta (NA) dos (2) vías.
<b>1-1V23</b>	Válvula antirretorno con resorte, presión de apertura 0,1 MPa.
<b>1-1V4</b>	Válvula 4/3 NC - Doble control eléctrico.
<b>1-1A2</b>	Cilindro hidráulico, diámetro de émbolo 50 mm y vástago 20 mm, recorrido 500 mm, fuerza 100 kN (máx.).
<b>MF01</b>	Sensor de proximidad.
<b>MF02</b>	Sensor de proximidad.

Fuente. Elaboración propia.

### 3.4.4. Unidad de alimentación de material.

En esta unidad (Ilustración 21), se controla el actuador *I-1A3*, el cual introduce y retira el bastidor que contiene el material que se va a estampar.

A continuación, se indican los componentes de la unidad de alimentación de matrices, con base en la oferta del software de diseño, teniendo en cuenta que comercialmente se dispone de una oferta más amplia, especializada y evolucionada.

**Tabla 12.** Componentes unidad de alimentación de material.

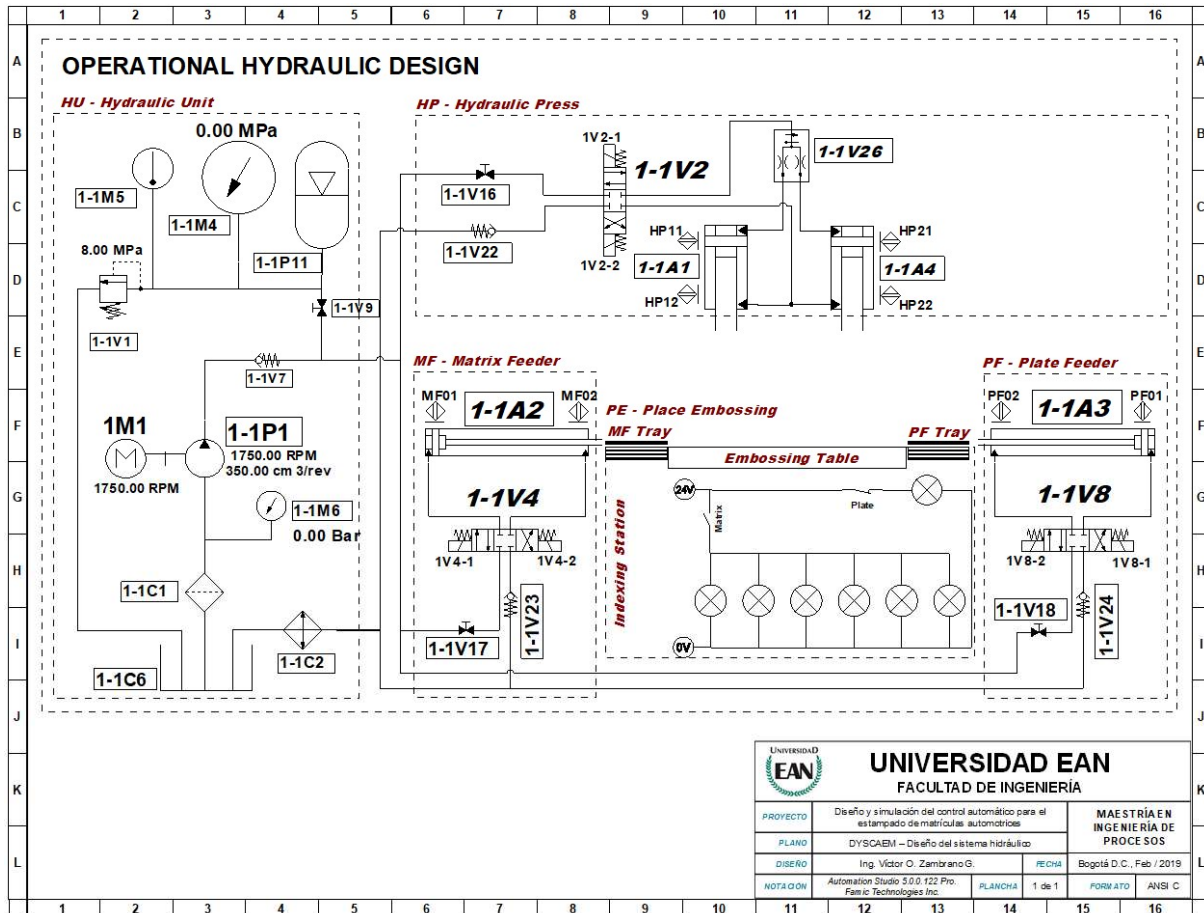
Código	Descripción
1-1V18	Válvula de cierre normalmente abierta (NA) dos (2) vías.
1-1V24	Válvula antirretorno con resorte, presión de apertura 1 Bar.
1-1V8	Válvula 4/3 NC - Doble control eléctrico.
1-1A3	Cilindro hidráulico, diámetro de émbolo 50 mm y vástago 20 mm, recorrido 600 mm, fuerza 100 kN (máx.).
PF01	Sensor de proximidad.
PF02	Sensor de proximidad.

Fuente. Elaboración propia.

Obsérvese que la estación de indexado corresponde a un proceso externo desde el que se ubica en la bandeja de *MF-Tray*, las matrices ya indexadas.

La prensa hidráulica debe corresponder, en el montaje industrial, a la prensa de acción vertical descendente como se muestra en la Ilustración 20.

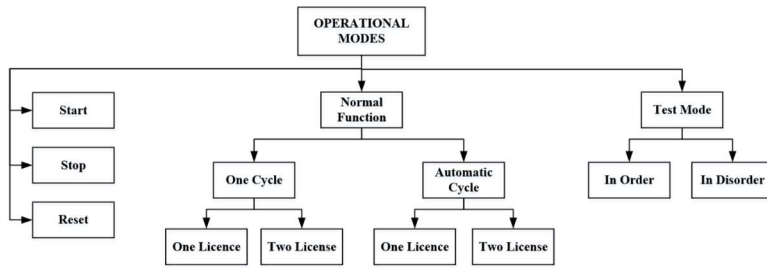
**Ilustración 27.** Sistema hidráulico.



Fuente. Elaboración propia. Anexo 4.

### 3.5. Sistema de Control.

**Ilustración 28.** DYSCAEM – Modos Operacionales



Fuente. Elaboración propia.

El sistema de control para los sistemas planteados se basa en los modos operacionales (Ilustración 28) que, en concordancia con las necesidades productivas del proceso tradicional, son la guía primaria para el desarrollo.

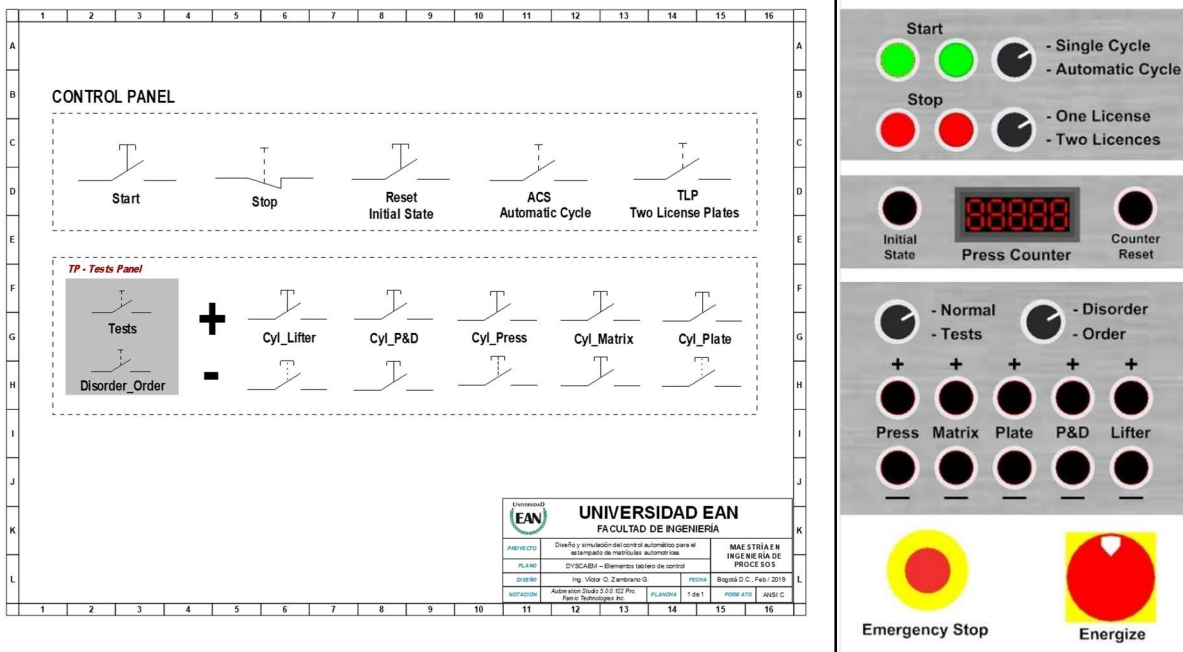
El panel de control implementado como un esquema de eléctrico (Ilustración 29), tiene en su conjunto las funciones que se han esquematizado en la Ilustración 32, que permiten llevar a cabo toda la interacción del operario con las funciones del control.

Dos secciones componen el panel, siendo la primera la de acción directa sobre el proceso y la segunda los modos de prueba.

El tablero de control se ha diseñado a partir del esquema eléctrico, con las funciones de energizado, parada de emergencia, inicio y parada, ciclo único y ciclado automático, prensado de una o dos PMA, ir a estado inicial y contador de acciones de estampado con su puesta en ceros.

Los componentes del tablero de control son componentes comunes para el propósito de diseño del control de los sistemas eléctrico, neumático e hidráulico.

**Ilustración 29.** Componentes eléctricos tablero de control.



Fuente. Elaboración propia. Anexos 5 y 6.



## 4. MODELADO & SIMULACIÓN

*El genio se hace con 1% de talento y otro 99% de esfuerzo.*

*Albert Einstein*

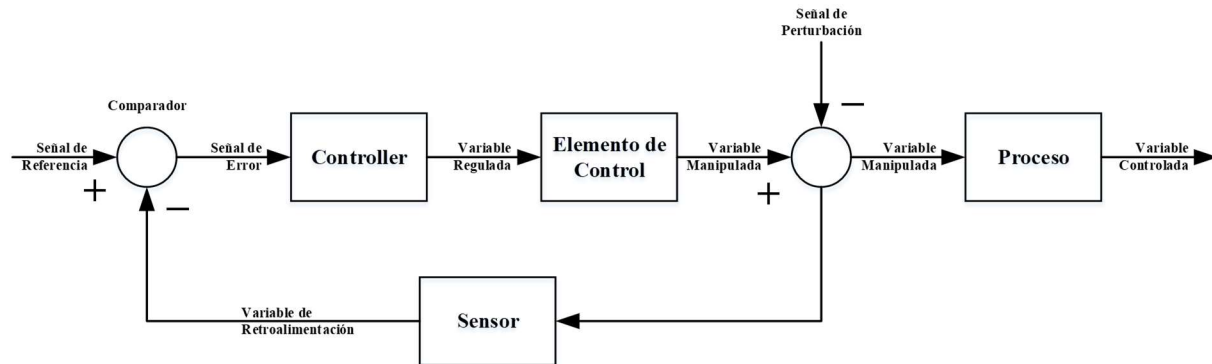
Una vez conocido y entendido el proceso de producción, se procede al análisis para el control, diseñando la estrategia relacionada con la distribución las máquinas y los equipos bajo los cuales se opera o específicamente sobre el proceso, y cuya aplicación más usual es el control por realimentación o el denominado control de lazo cerrado (Ilustración 30).

El sistema de control de lazo cerrado es aquel en el cual la acción de control depende de la respuesta real de salida, la cual se verifica mediante algún sensor y entonces se compara con una referencia de entrada [1].

Los sensores ubicados como final de carrera en todos los actuadores tienen como función retroalimentar al sistema con la posición real de los actuadores, de tal manera que las acciones consecuenciales se realicen a partir de la comparación con el estado esperado para tales acciones.

Un punto particular de retroalimentación en el concepto de lazo cerrado es el componente *I-1S15 – Válvula de seguridad ajustable con presión apertura en 0,8 MPa*, la cual emite una señal eléctrica al llegar al valor de presión mínimo de operación, permitiendo el inicio del proceso.

**Ilustración 30.** Control de lazo cerrado.






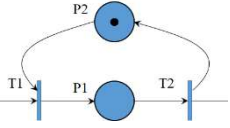
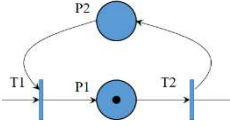
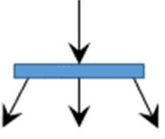
**Fuente.** Introducción a los Sistemas de Control. R. Hernández G., Ed. 1. (2010).

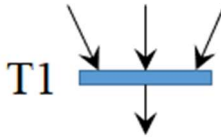
### 4.1. RED DE PETRI. Modelado de procesos concurrentes.

Las RdP – Redes de Petri, diseñadas en su forma básica por Carl Adam Petri matemático contemporáneo alemán, que en la década de los años 60 definió en su tesis doctoral *Kommunikation mit Automaten*, un modelo matemático de propósito general, para la descripción de las relaciones existentes entre condiciones y eventos como una poderosa herramienta para el modelado, la representación y el análisis de los procesos concurrentes [2].

La representación gráfica de los sistemas completos mediante las RdP facilita el análisis operativo de éstos a tal punto que de la claridad operativa pueden surgir propuestas de intervención para la modificación de estructuras operativas, adición o eliminación de pasos y secuencias, o definitivamente redefinición del sistema completo [19] [20].

El uso de las RdP en la representación de sistemas completos permite apropiarse del conocimiento del sistema completo y formular las ecuaciones de estado, a partir de lo cual se derivan los diagramas de contactos para la programación subsecuente de los PLC.

<b>Tabla 13.</b> Descripción de los elementos de la <i>RdP</i> .	
<p>P1 </p> <p><b>Plaza</b></p>	<p>Se representa por medio de un círculo coloreado identificado con una identificación lateral.</p> <p>Corresponde a operaciones individuales del proceso.</p>
<p>P1 </p> <p><b>Plaza marcada</b></p>	<p>Se representa por medio de una plaza con un punto centrado en el interior denominado <i>Token</i>, el cual permite ver la evolución durante la simulación.</p> <p>Corresponde a una plaza activa en términos del proceso.</p>
<p>T1 </p> <p><b>Transición</b></p>	<p>Se representa por medio de un rectángulo oblongo coloreado con una identificación lateral.</p> <p>Corresponde a la validación de las condiciones de estado de los sensores dispuestos en el proceso.</p>
<p></p> <p><b>Máquina libre</b></p>	<p>Representa la disposición típica para una máquina que se encuentra en espera de ser ocupada de acuerdo con la evolución del grafo.</p>
<p></p> <p><b>Máquina ocupada</b></p>	<p>Máquina en ejecución de su función dentro del proceso.</p>
<p>T1 </p> <p><b>Nudo Y distribución</b></p>	<p>Una transición que tiene varios arcos de entrada y/o salida se denomina nudo Y (And).</p> <p>Un arco de entrada y varios de salida en una transición corresponde a un nodo de distribución.</p>

 <p><b>T1</b></p> <p><b>Nudo Y conjunción</b></p>	<p>Una transición que tiene varios arcos de entrada y/o salida se denomina nudo Y (And). Varios arcos de entrada y uno de salida en una transición corresponde a un nodo de conjunción.</p>
<p align="center"><b>Fuente.</b> Elaboración propia.</p>	

La red de Petri (Ilustración 31), diseñada en el software *Sirphyco*, corresponde al modelo operativo establecido para el proceso de fabricación de PMA, en el que el código de colores identifica el grupo de acciones relativas, lo que facilita su completo entendimiento.

Se puede observar en la rama izquierda del diagrama, la representación del subproceso **SP1** de alimentación del material a ser estampado en la prensa, lo cual corresponde al inicio del proceso. En los pasos subsiguientes cada uno de los movimientos, y de forma simultánea, se coloca el material nuevo para el estampado y se retira el material ya estampado; esto debido al montaje realizado con doble estación de ventosas en un mismo cilindro sin vástago.

En la rama derecha del diagrama, se representan dos (2) procesos secuenciales entre sí, el primero de los cuales es el subproceso externo **SP2**, en el que se indexan las matrices de estampado y se ubican en la bandeja alimentadora, procediendo a ubicar las matrices y el material en la prensa para el inmediato estampado. Nótese la simultaneidad de los subprocesos **SP1** y **SP2**.

El segundo subproceso **SP3**, corresponde al estampado propiamente dicho y al retiro del material estampado, para la colocación de uno nuevo. Nótese la secuencialidad de los subprocesos **SP2** y **SP3**.

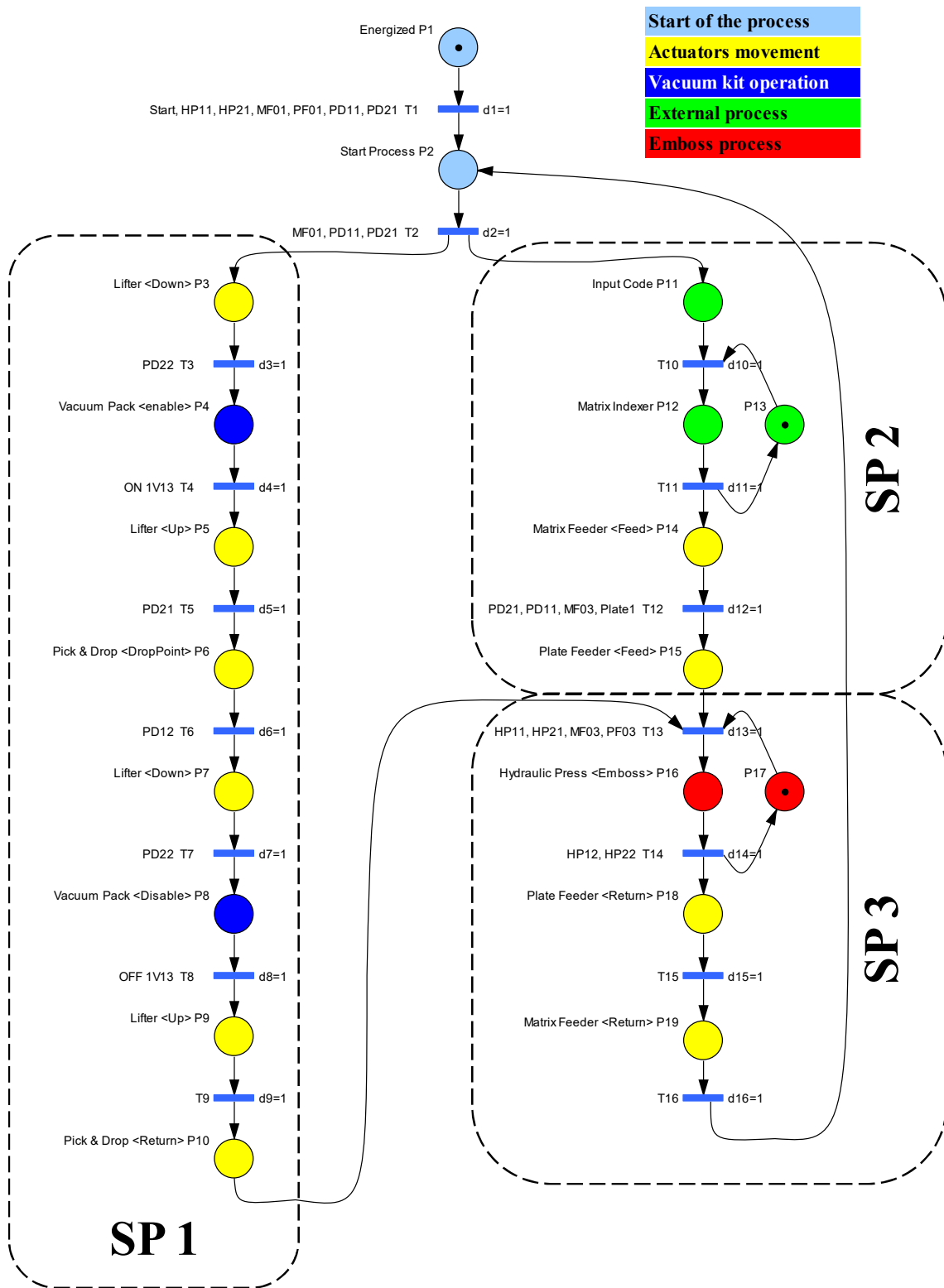
Una RdP se elabora por un grafo con dos tipos de nodos *v.gr.* lugares y transiciones que representan las variables que definen el estado del sistema y sus transformadores, respectivamente.

Los lugares se representan por círculos, las transiciones por barras y el marcado se representa por una marca como un punto en el interior del círculo que define el lugar que lo contiene. Los lugares y transiciones se conectan por arcos dirigidos. Un arco dirigido de un lugar  $P_i$  a una transición  $T_j$  define un lugar de entrada de la transición. Múltiples entradas a una transición son indicadas por múltiples arcos desde el lugar de entrada a la transición. Un lugar de salida es indicado por un arco desde la transición al lugar. Análogamente, múltiples salidas son representadas por múltiples arcos.

Visto lo anterior, se puede observar cómo a los lugares  $P_i$  (*Places*) se asocian acciones que en el sistema corresponden a eventos como energizado o la acción de algún actuador; de la misma manera a las transiciones  $T_j$  (*Transitions*) se asocian las diferentes señales de los sensores, como una retroalimentación de los estados del sistema para la toma de acciones de tipo externo cuando es requerido o de tipo secuencial en la evolución lógica del grafo establecido [21].

Resulta conveniente establecer un código de colores para su aplicación dentro del grafo, lo que definitivamente facilita el entendimiento y seguimiento del proceso bajo análisis.

**Ilustración 31.** Red de Petri.



Fuente. Elaboración propia.

#### 4.1.1. Ecuaciones de estado.

Las ecuaciones de estado de la RdP se establecen como la interrelación de las acciones y su respectiva secuenciación, lo cual se logra bajo el siguiente modelo:

$$P_i = P_{i-1} \cdot T_{i-1} + \overline{P_{i+1}} \cdot P_i$$

Con las ecuaciones establecidas, se puede proceder a realizar el diagrama de conexiones o alguna programación, lo cual permitirá llevar el diseño a autómatas programables y computadoras operativas en proceso.

**Tabla 14.** Ecuaciones de estado de la RdP.

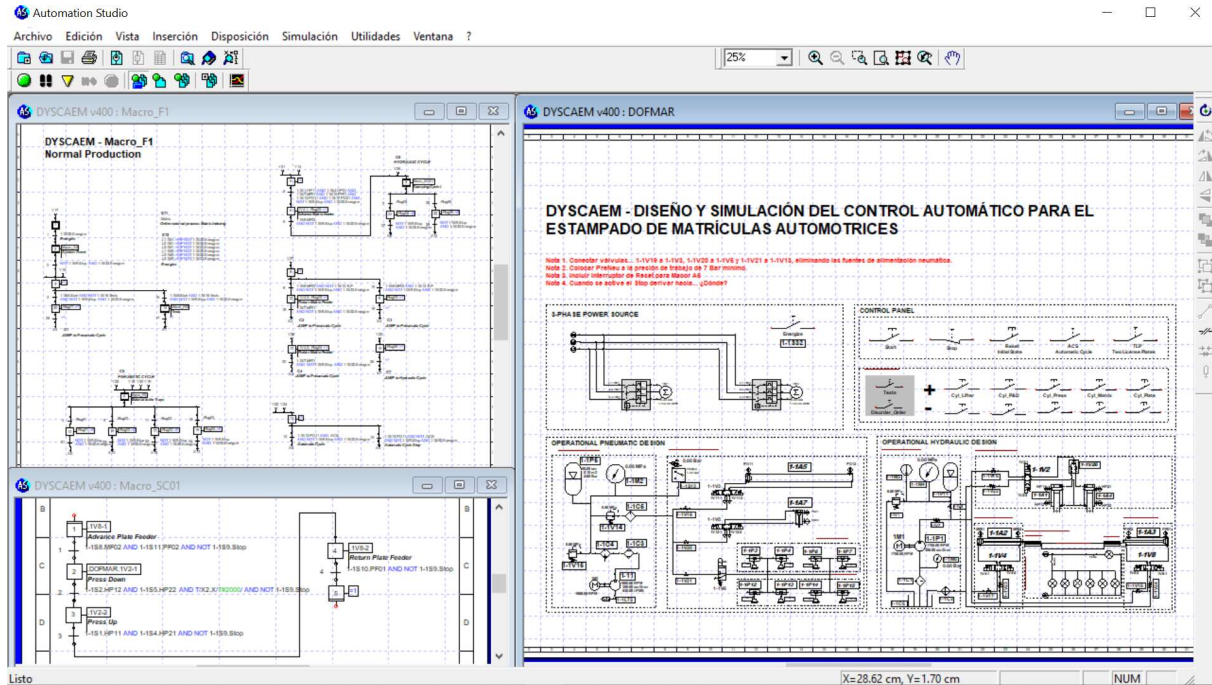
Ecuación de estado	Etapa
$P_1 = \overline{P_2} \cdot P_1$	<i>Energized</i>
$P_2 = P_1 \cdot T_1 + P_{19} \cdot T_{16} + \overline{P_3} \cdot P_1 + \overline{P_{11}} \cdot P_1$	<i>Start Process</i>
$P_3 = P_2 \cdot T_2 + \overline{P_4} \cdot P_3$	<i>Lifter Down</i>
$P_4 = P_3 \cdot T_3 + \overline{P_5} \cdot P_4$	<i>Vacuum Pack 1&amp;2 Enable</i>
$P_5 = P_4 \cdot T_4 + \overline{P_6} \cdot P_5$	<i>Lifter Up</i>
$P_6 = P_5 \cdot T_5 + \overline{P_7} \cdot P_6$	<i>Pick&amp;Drop DropPoint</i>
$P_7 = P_6 \cdot T_6 + \overline{P_8} \cdot P_7$	<i>Lifter Down</i>
$P_8 = P_7 \cdot T_7 + \overline{P_9} \cdot P_8$	<i>Vacuum Pack Disable</i>
$P_9 = P_8 \cdot T_8 + \overline{P_{10}} \cdot P_9$	<i>Lifter Up</i>
$P_{10} = P_9 \cdot T_9 + \overline{P_{16}} \cdot P_{10}$	<i>Pick&amp;Drop Return</i>
$P_{11} = P_2 \cdot T_2 + \overline{P_{12}} \cdot P_{11}$	<i>Input Code</i>
$P_{12} = (P_{11} \cdot P_{13}) \cdot T_{10} + \overline{P_{14}} \cdot P_{12} + \overline{P_{13}} \cdot P_{12}$	<i>Matrix Indexed</i>
$P_{13} = P_{12} \cdot T_{11} + \overline{P_{12}} \cdot P_{13}$	<i>Indexed online</i>
$P_{14} = P_{12} \cdot T_{11} + \overline{P_{15}} \cdot P_{14}$	<i>Matrix Feeder Feed</i>
$P_{15} = P_{14} \cdot T_{12} + \overline{P_{16}} \cdot P_{15}$	<i>Plate Feeder Feed</i>
$P_{16} = (P_{10} \cdot P_{15} \cdot P_{17}) \cdot T_{13} + \overline{P_{18}} \cdot P_{16} + \overline{P_{17}} \cdot P_{16}$	<i>Hydraulic Press Emboss</i>
$P_{17} = P_{16} \cdot T_{14} + \overline{P_{16}} \cdot P_{17}$	<i>Hydraulic pressing</i>
$P_{18} = P_{16} \cdot T_{14} + \overline{P_{19}} \cdot P_{18}$	<i>Plate Feeder Return</i>
$P_{19} = P_{18} \cdot T_{15} + \overline{P_2} \cdot P_{19}$	<i>Matrix Feeder Return</i>

**Fuente.** Elaboración propia.

## 4.2. MODELADO & SIMULACIÓN.

Para el desarrollo de este proyecto se ha establecido el uso del *software Automation Studio* que es un programa de concepción, animación y simulación, creado para responder a las necesidades de ingeniería, formación y concepción en el campo de la automatización [05].

### Ilustración 32. Automation Studio™.



Fuente. Elaboración propia.

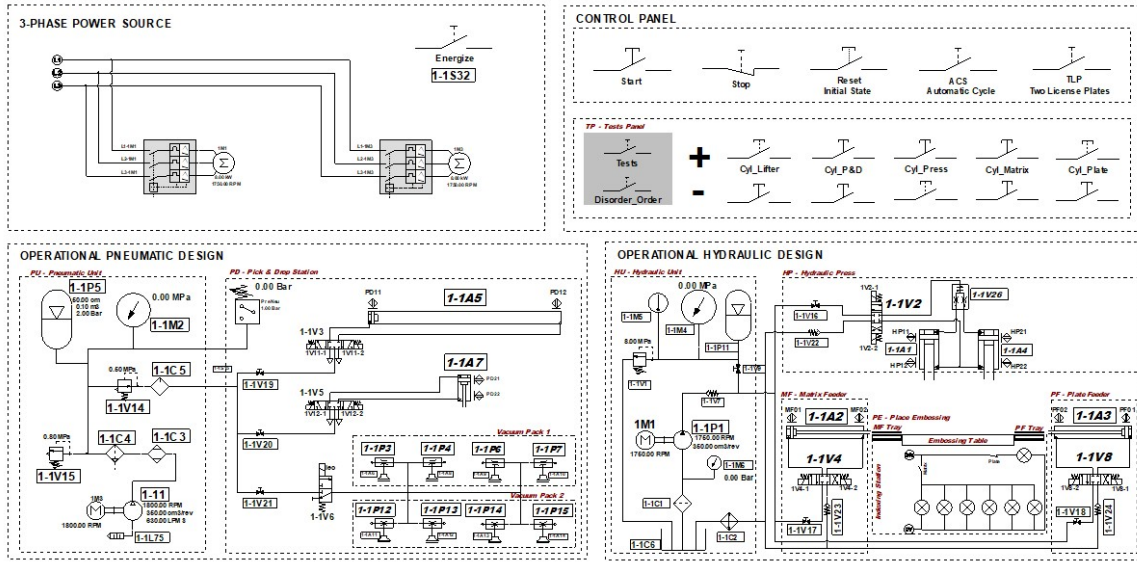
El mercado actual del *software* para diseño y desarrollo de proyectos al mismo tenor del presente ofrece una variedad de paquetes tecnológicos de los cuales se enuncian los siguientes:

- **FluidSIM® 5.** <https://fluidsim.programas-gratis.net/>
- **MiCRO automación.** <http://www.microautomacion.com/>
- **autoSIM-200.** <https://www.smctraining.com/es/webpage/indexpage/108>
- **SimulationX.** <https://www.simulationx.com/>

El modelado total del presente proyecto se ilustra a continuación (Ilustración 33), correspondiendo a un único modelo de los aspectos eléctricos, neumáticos e hidráulicos, solucionados en su funcionalidad e interrelación, que en su conjunto determinan la guía de trabajos ulteriores de construcción y puesta en marcha del proyecto industrial.

Nótense las cuatro (4) secciones de modelado y por ende funcionales, *v.gr. 3-Phase Power Source, Control Panel, Operational Pneumatic Design* y *Operational Hydraulic Design*, que corresponden con los focos de desarrollo del proyecto.

**Ilustración 33.** Modelado para la simulación.



Fuente. Elaboración propia.

**4.2.1. Modelo Eléctrico.**

El modelo eléctrico se limita a indicar la alimentación trifásica de dos (2) motores *IM1* y *IM3*, que se acoplan a las bombas neumática e hidráulica correspondientemente.

Se ha dispuesto también un interruptor normal abierto para el energizado general del modelo que, a partir de su activación, permite el energizado de los dos (2) guarda motor y por ende de los motores, entregando potencia mecánica a las bombas.

**4.2.2. Modelo Neumático.**

Este modelo consta de una sección para la generación de aire comprimido, la cual limita el inicio de la operación general a la presión mínima de trabajo mediante el componente *1-1S15* *Válvula de seguridad ajustable, presión apertura 0,8 MPa*.

Una vez alcanzada la presión indicada, al ser activado el pulsador identificado con *Start* en *Control Panel* (Ilustración 29), se puede dar inicio al ciclo productivo.

El modelo DYSCAEM inicia la operación desde las condiciones iniciales de cilindros neumáticos con vástagos no extendidos, es decir, con los sensores activos PD11, PD21, PF01, MF01, HP11, HP21.

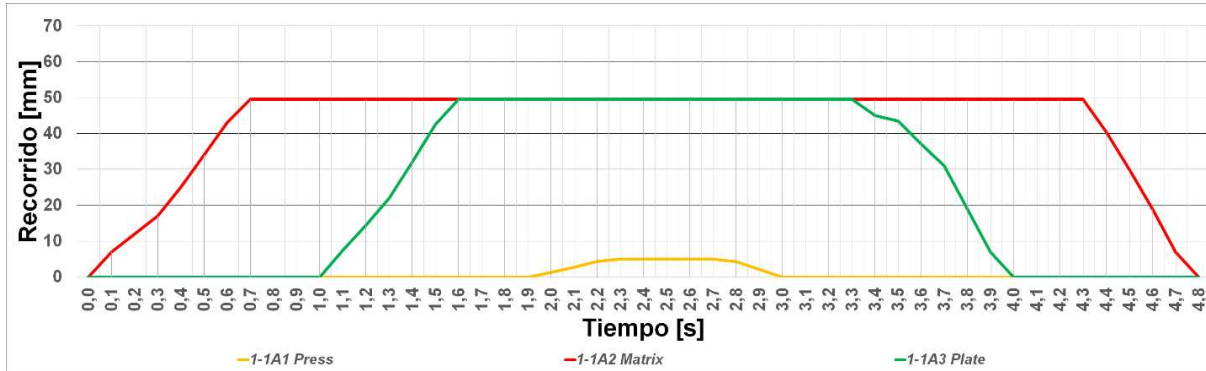
El proceso inicia con el indexado de matrices mediante la activación de la unidad de operación externa en la que, en un carrusel de matrices para el estampado éstas se indexan de tal manera que se atiende el código digital indicado para la PMA a ser estampada y se produce la evolución al sistema de hidráulico.

**4.2.3. Modelo Hidráulico.**

La evolución secuencial de un (1) ciclo productivo del sistema hidráulico se especifica a continuación (Ilustración 34).

En la ilustración se puede observar la evolución de la extensión de los vástagos de los actuadores en el tiempo, lo que establece el ciclo productivo.

**Ilustración 34.** Diagrama H – Recorrido Vs. Tiempo.



**Fuente.** Elaboración propia.

La evolución del ciclo se describe a continuación.

**Actuador 1-1A2.** Se extiende el vástago con la bandeja de matrices indexadas hasta el centro geométrico de las planchas de la prensa, en la posición sensor MF02 activo.

**Actuador 1-1A3.** Se extiende el vástago con la bandeja de material para estampado hasta el centro geométrico de las planchas de la prensa, en la posición sensor PF02 activo.

**Actuadores 1-1A1, 1-1A4.** Extienden el vástago de manera simultánea y coordinada por el divisor de caudal compensado en presión y temperatura denominado 1-1V26, hasta la posición de sensores HP12 y HP22 activos, con una temporización ajustable de sostenimiento de presión mínima para un correcto estampado de la PMA.

**Actuadores 1-1A1, 1-1A4.** Retornan los vástagos hasta la posición inicial con sensores HP11 y HP21 activos.

**Actuador 1-1A3.** Retorna el vástago con la bandeja de material estampado hasta la posición inicial con sensor PF02 activo.

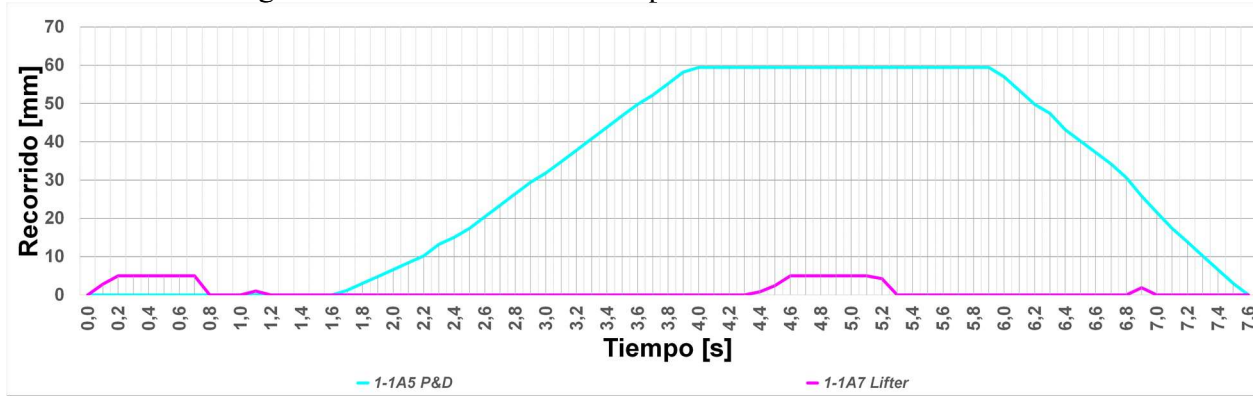
**Actuador 1-1A2.** Retorna el vástago con la bandeja de matrices indexadas hasta la posición inicial con sensor MF02 activo.

**Caso especial.** El mismo ciclo aplica al estampado de dos PMA gemelas, con una repetición del ciclo sin retroceso del **Actuador 1-1A2**. El desarrollo del *Grafset* incluirá esta condición.

#### 4.2.4. Sistema neumático.

La evolución secuencial de un (1) ciclo productivo del sistema neumático se especifica a continuación (Ilustración 35).

**Ilustración 35.** Diagrama N – Recorrido Vs Tiempo.



Fuente. Elaboración propia.

La evolución del ciclo se describe a continuación.

**Actuador 1-1A7.** Se extiende el vástago *lifter* con el soporte de los arreglos de vacío *Vacuum Pack1* y *Vacuum Pack2*, que son activados al activarse el sensor PD22 de fin de recorrido.

**Actuador 1-1A7.** Se retrae el vástago *lifter* levantando la materia prima para estampado (*Vacuum Pack1*) y, después del primer ciclo, levantando la PMA estampada (*Vacuum Pack2*), hasta posición sensor activo PD21.

**Actuador 1-1A5 (sin vástago).** Desde la posición inicial en *Pick Point*, sensor PD11 activo, el bloque soporte se desplaza hasta la posición *Drop Point*, sensor PD12 activo.

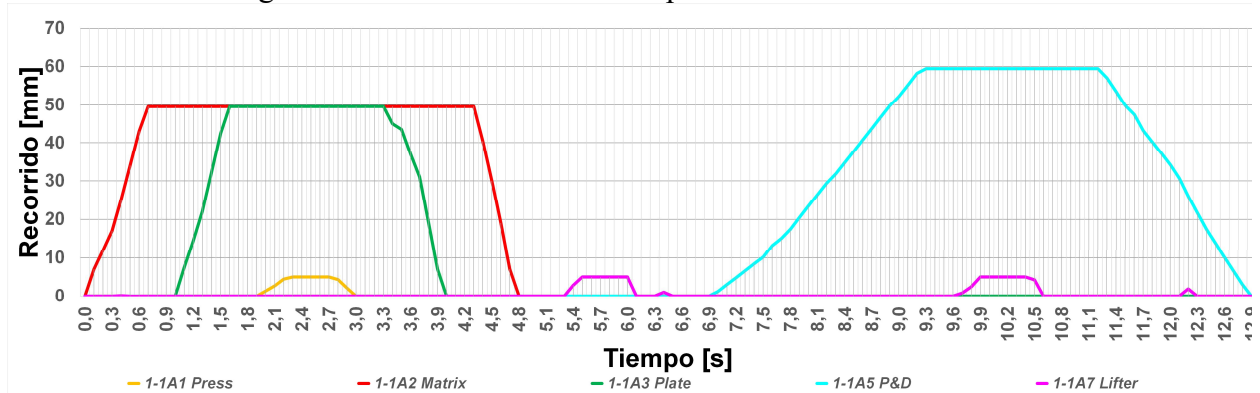
**Actuador 1-1A7.** Se extiende el vástago *lifter* con el soporte de los arreglos de vacío *Vacuum Pack1* y *Vacuum Pack2* activados, hasta activar el sensor PD22 de final de carrera, desactivando el vacío para colocar el material en las bandejas.

**Actuador 1-1A7.** Se retrae el vástago *lifter* sin el material de trabajo, hasta posición sensor activo PD21.

**Actuador 1-1A5 (sin vástago).** Desde la posición *Drop point*, sensor PD12 activo, desplaza el bloque soporte hasta la posición inicial *Pick Point*, sensor PD11 activo.

El sistema neumático debe trabajar con una presión mínima de 0,25 MPa.

**Ilustración 36.** Diagrama HN - Recorrido Vs Tiempo.



Fuente. Elaboración propia.

### 4.3. GEMMA. Guía para diseño estructurado.

La automatización de una máquina requiere además de un pensamiento estructurado, de modelos estructurados en los que se consideren todos los posibles estados de la máquina o como mínimo, aquellos estados que se desean analizar particularmente en virtud de las condiciones del proceso, de tal manera que se anticipen respuestas de funcionamiento y, por ende, se anticipen estrategias de control de manera preventiva, eliminando las potenciales causas de fallos durante el proceso.

Un automatismo consta de dos partes fundamentales a saber, el sistema de producción y el control de éste, el cual puede encontrarse en uno de los tres (3) estados, (a) Condiciones de funcionamiento, (b) condiciones de parada y (c) condiciones de fallo.

Los estados posibles de una máquina para su automatización han sido estructurados para el diseño del control en la guía GEMMA (*Guide d'Etudes des Modes de Marches et d'Arrêts*), como modos de marcha y parada en procedimientos de parada, procedimientos de funcionamiento, procedimientos de fallo y procedimientos relativos a la parte de control.

Los procedimientos ya indicados se dividen de tal manera que la Guía GEMMA presenta dieciséis (16) estados de funcionamiento posible (Ilustración 37).

#### Grupo F. Procedimientos de funcionamiento

**F1 – Producción normal.** Estado de mayor importancia en el que la máquina realiza todas las funciones de producción para las que fue diseñada y construida.

**F2 – Maniobras de preparación.** Aquellas necesarias para que la máquina entre en producción, como preparación de componentes y accesorios, precalentamiento (si es requerido), ajustes singulares de proceso y de máquina, presurización, estabilización, entre otros posibles.

**F3 – Maniobras de cierre.** Aquellas en las cuales se llevan a cabo las tareas de vaciado y limpieza antes de una parada o de un cambio de producto.

**F4 – Maniobras de verificación en el desorden.** Es el control manual. Aquellas en las que, aleatoriamente o de manera predeterminada, se realiza movimientos de la máquina, para labores de mantenimiento y verificación.

**F5 – Maniobras de verificación en el orden.** Es el control semiautomático. Aquellas en que la máquina realiza el ciclo completo de funcionamiento en orden, al ritmo fijado por el operario, para labores de mantenimiento y verificación, para lo cual, la máquina puede estar en producción.

**F6 – Maniobras de prueba.** Aquellas de ajuste y mantenimiento preventivo, como las de comprobación de tiempos de respuesta en sensores, las curvas de comportamiento de actuadores, la estabilidad de señales, etc.

#### Grupo A. Procedimiento de paradas y puestas en marcha

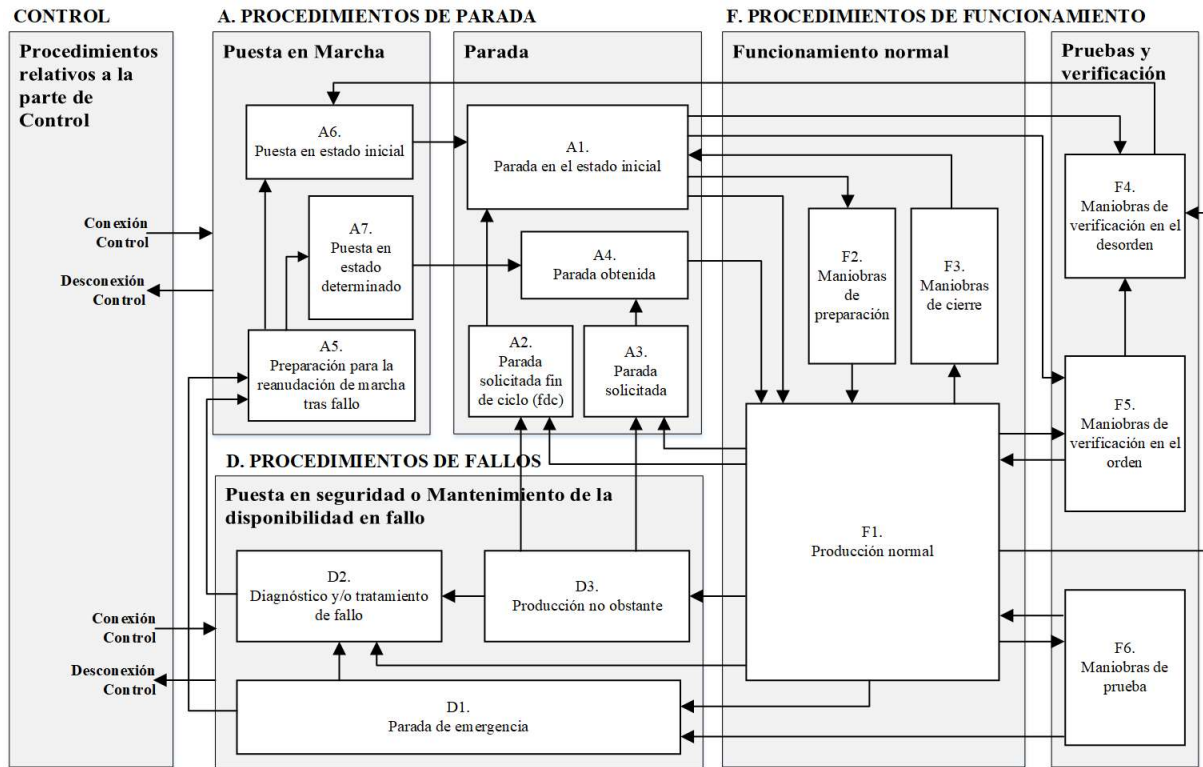
**A1 – Parada en el estado inicial.** Estado de reposo de la máquina, el cual es el comúnmente representado en planos de diseño y esquemas eléctricos.

**A2 – Parada solicitado fin de ciclo (fdc).** Estado transitorio en el que la máquina que se encuentra en producción normal evoluciona al estado A1 una vez finalice el ciclo en curso.

**A3 – Parada solicitada.** Estado en que la máquina se detiene en unas condiciones determinadas que no coinciden con el final de ciclo. Es un estado transitorio de evolución al estado A4.

**A4 – Parada obtenida.** Estado de reposo de la máquina distinto al estado inicial.

**Ilustración 37.** Guía GEMMA.



Fuente. GEMMA. Una Herramienta Universal para la automatización de procesos. L. Rodríguez.

**A5 – Preparación para la reanudación de marcha tras fallo.** Estado donde se procede a las operaciones de vaciado, limpieza, reposición de un determinado producto y otras necesarias para la puesta de nuevo en funcionamiento de la máquina después de un defecto.

**A6 – Puesta del sistema en el estado inicial.** Estado en que se realiza la evolución del sistema al estado inicial A1 (reinicio). El retorno puede ser manual coincidiendo con el estado F4 o automático.

**A7 – Puesta del sistema en un estado determinado.** Evolución del sistema a una posición distinta de la inicial para su puesta en marcha; puede ser también manual o automático.

**Grupo D. Procedimientos de fallo**

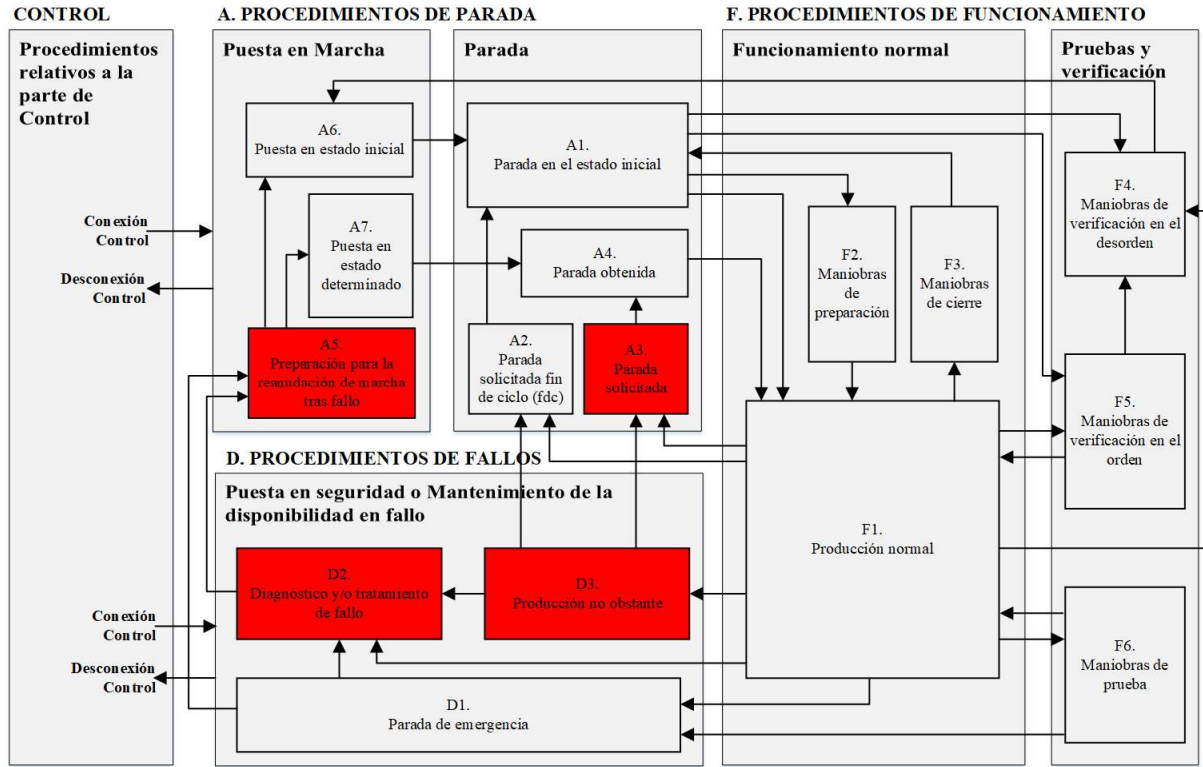
**D1 – Parada de emergencia.** Estado al que se evoluciona después de una parada de emergencia, en el que se consideran tanto las paradas como los procedimientos y las precauciones necesarias para mitigar las consecuencias derivadas de fallos.

**D2 – Diagnóstico y/o tratamiento de fallo.** Estado en que la máquina puede ser examinada después de un fallo e indicar los motivos de éste para su rearme, con o sin ayuda del operador.

**D3 – Producción no obstante.** Estado en el que se puede continuar la producción a pesar de los fallos.

En la Ilustración 38, se presentan los cambios establecidos y la forma final de los modos de marcha y paro para el desarrollo del control de automatización de este proyecto.

**Ilustración 38.** Guía GEMMA del Proyecto DYSCAEM.



**Fuente.** Elaboración propia.

**4.4. GRAFCET. Especificación de modelado.**

En todo proceso de unificación y racionalización de la comunicación, se requiere del diseño y construcción de modelos estructurados, que establezcan reglas y métodos de tipo estándar para evolucionar tecnológicamente, independientemente de criterios personales y subjetivos [02].

Es así como la descripción de sistemas lógicos y en su particularidad del componente secuencial de los mismos, es abordada (Francia en 1977), por la *Association Francaise pour la Cybernétique Economique et Technique AFCET*, creando la comisión formada por varios organismos universitarios, fabricantes y usuarios con el objeto de obtener un método de representación de funcionamiento de sistemas lógicos independiente de la materialización tecnológica de los mismos.

El resultado de los estudios de dicha comisión fue el tipo gráfico denominado *GRAFCET – Graph Fonctionnel de Commande Etape-Transition*, que en español sería grafo funcional de control etapa-transición.

El Grafcet es un método gráfico de modelado de automatismos cuya base fundamental son las Redes de Petri. Una de las ventajas de este método gráfico, es la posibilidad de obtener simulaciones, entendimiento y claridad a la hora de controlar procesos o sistemas a eventos discretos. Dado que un Grafcet se comporta como una Red de Petri viva y binaria, los elementos que le componen se aproximan en gran medida a los de una RdP [11].


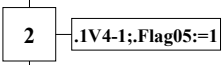
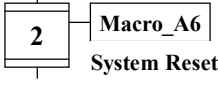
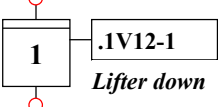
Algunos principios que inspiraron el diseño de la representación estructurada de sistemas lógicos y de su componente secuencial, cuyo resultado fue el GRAFCET, corresponde a aquellos mencionados en la literatura pertinente, a saber.

- Centrar el interés en el funcionamiento del PLC y no en su tecnología constructiva.
- El sistema automático debe constar de dos partes; a) la parte de control que es la automatización del proceso y b) la parte operativa que es la ejecución del proceso.
- Las acciones de transformación denominadas operaciones son los elementos fundamentales del proceso, las que en el *Grafcet* se denominan *Etapas* en correspondencia directa con cada acción del PLC.
- Los procesos deben ser trabajados por macro etapas, cuyas partes constitutivas correspondan a relaciones directas entrada-salida.
- El gráfico de evolución debe indicar la secuencia de las etapas (operaciones) y las condiciones lógicas o transiciones para pasar de una a otra.
- Establecer para cada etapa (operación elemental), las relaciones lógicas entre entradas y salidas.

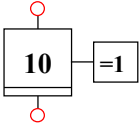
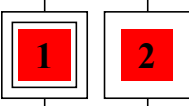

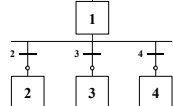
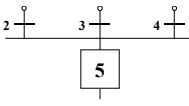
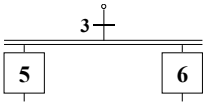
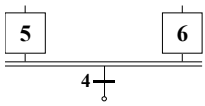
En la elaboración de un Grafcet, como una representación del funcionamiento de un sistema automático, se hace uso de cuatro símbolos o elementos básicos definidos v.gr., *Etapas* inicial, *Etapas* normal, *Arco o línea* y *Transición*; la regla fundamental para el diseño del gráfico es que toda etapa (operación), debe ser precedida y proseguida por una transición, esto es, no hay arcos o líneas entre etapas ni entre transiciones [06].

Los símbolos y los arreglos fundamentales se ilustran en la table a continuación.

**Tabla 15.** Descripción de los elementos del *Grafcet*.

 <p><b>Etapas</b> inicial inactiva</p>	<p>Una etapas inicial se representa por medio de un doble cuadrado identificado con un número.</p> <p>La entrada de la etapas es la parte superior de la etapas.</p> <p>La salida de la etapas es la parte inferior de la etapas.</p>
 <p><b>Etapas</b> normal</p>	<p>Una etapas normal se representa por medio de un cuadrado identificado con un número.</p> <p>Las acciones son relacionadas por medio de un conector al símbolo de la etapas a la cual estas están asociadas.</p>
 <p><b>Macro-Etapas</b></p>	<p>Una macro etapas se representa por medio de un cuadrado identificado con un número y con un rectángulo arriba y abajo.</p> <p>El nombre del gráfico que es activado por la macro etapas aparece a su derecha y puede incluir un texto explicativo.</p>
 <p><b>Etapas</b> de entrada</p>	<p>Una etapas de entrada se representa por medio de un cuadrado identificado con un número y con un rectángulo arriba.</p>

**Tabla 15.** Descripción de los elementos del *Grafcet*.

 <p><b>Etapa de salida</b></p>	<p>Una etapa de salida se representa por medio de un cuadrado identificado con un número y con un rectángulo abajo.</p>
 <p><b>Etapa activa</b></p>	<p>Una etapa activa es identificada con una ficha roja ubicada en el centro del símbolo de la etapa, durante la simulación.</p>
 <p><b>Transición</b></p>	<p>Una transición es representada por medio de una cruz que une dos etapas. Se la identifica con una marca numérica. La receptividad está siempre a la derecha del símbolo de transición.</p>
 <p><b>Divergencia O</b></p>	<p>Cuando hay un enlace entre una etapa fuente y varias transiciones, una <i>Divergencia en O</i> es dibujada por encima del enlace.</p>
 <p><b>Convergencia O</b></p>	<p>Cuando hay un enlace entre varias transiciones fuentes y una etapa, una <i>Convergencia en O</i> es dibujada por encima del enlace.</p>
 <p><b>Divergencia Y</b></p>	<p>Cuando hay un enlace entre una transición fuente y varias etapas, una <i>Divergencia en Y</i> es dibujada por encima del enlace.</p>
 <p><b>Convergencia Y</b></p>	<p>Cuando hay un enlace entre varias etapas fuentes y una transición, una <i>Convergencia en Y</i> es dibujada por encima del enlace.</p>
<p>ST1 .Matrix Online external process: Matrix Indexing</p> <p><b>Texto estructurado</b></p>	<p>Los textos estructurados son acciones no relacionadas con una etapa. Están relacionados con el gráfico.</p>

**Fuente.** Guía del Usuario del taller *Grafcet*. AS5\_GUI\_SF02\_003. FAMIC® Technologies Inc.

#### 4.4.1. Descripción del Grafcet.

El Grafcet realizado, cuya escritura es conforme a la norma internacional CEI 611313 y a las proposiciones de extensión definidas por el grupo GRAFCET de la AFCET y por el proyecto de norma PR NF EN 60848, consta de las cinco partes estructuradas que se indican a continuación:

- Macro\_F1 – Producción normal, en el que se lleva a cabo el control de todas las selecciones de modos de funcionamiento y decisiones de proceso.
- Macro\_F2 – Manejo de materiales, en el que se controla el ciclo completo del manejo de materiales a ser colocados en las bandejas para estampado y de recolección de producto semielaborado.
- Macro\_F45 – Es el módulo de pruebas, en el que se controlan las maniobras de verificación en el orden y en el desorden.
- Macro\_A6 – Reinicio de los sistemas, en el que se controla la puesta en referencia o en estado inicial los actuadores neumáticos e hidráulicos.
- Macro\_SC01 – Ciclo de estampado, en el que se controla la alimentación de material, el estampado y su tiempo de retención.

En la evolución del Grafcet se hace uso de seis (6) banderas para evoluciones particulares como se indica a continuación:

- Flag01 – dirige el Grafcet en la zona de producción normal.
- Flag02 – dirige el Grafcet hacia el control de ciclo único o automático.
- Flag03 – dirige el Grafcet hacia el control de estampado sin avance del alimentador de matrices.
- Flag04 – dirige el Grafcet hacia el control de ciclo único o automático.
- Flag05 – dirige el Grafcet por la zona de prensado con actuación de la bandeja de matrices.
- Flag06 – dirige el Grafcet para el prensado de PMA gemelas.

Visto lo anterior, y con los elementos y sus combinaciones revisadas en la Tabla 15, se presenta el análisis del Grafcet compuesto que se entrega en las ilustraciones subsiguientes.

#### 4.4.2. Macro\_F1.

El Grafcet correspondiente a la Macro\_F1 se ha desarrollado a partir de la modelación y simulación realizadas para el proceso (Ilustración 33), en las ilustraciones numeradas de la 39 a la 43.

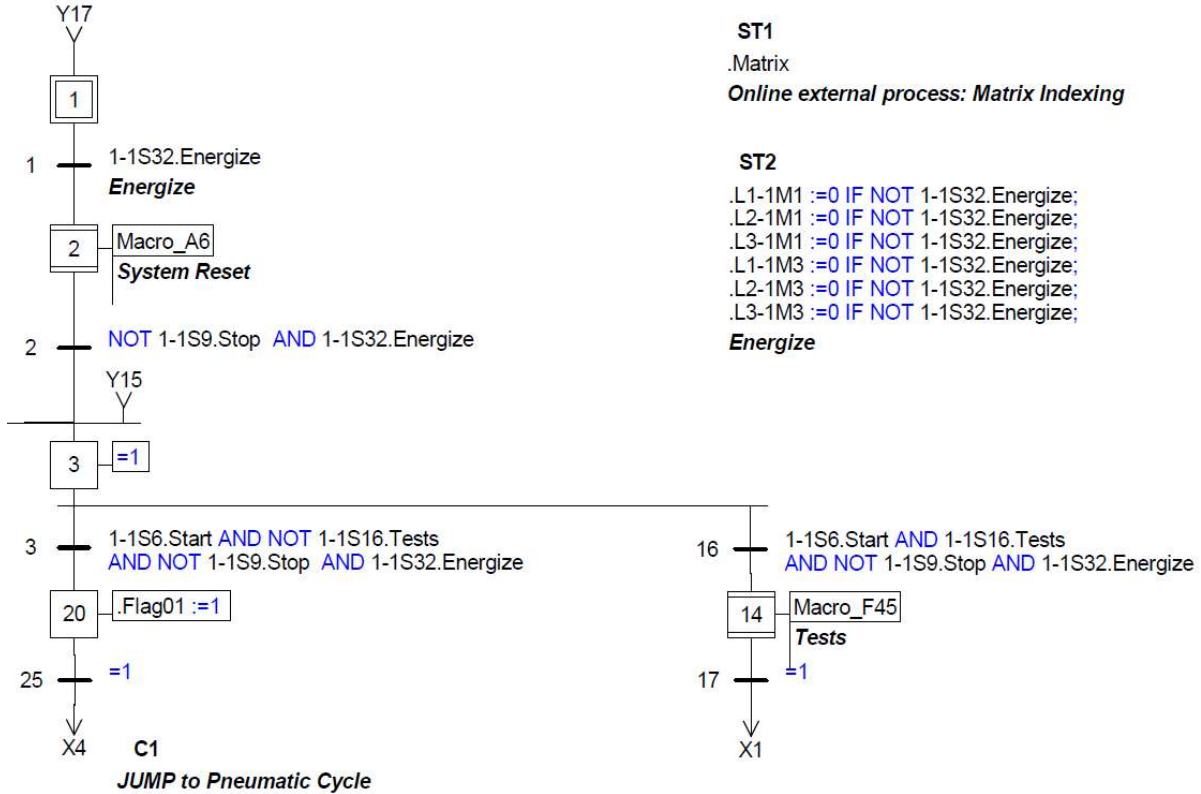
En la Ilustración 39, en el cual se establece la secuencia de inicio, reinicio del sistema y selección del estado de producción normal, se pueden observar los siguientes saltos de salida del Grafcet:

- X4 – Hacia el ciclo neumático de manejo de materiales Etapa 4, correspondiente al desarrollo de la Macro\_F2 o,
- X1 – Hacia la Etapa 1, después del estado de pruebas.

Se observa la bandera *Flag01* la cual marca la salida para el ciclo de estampado.

Los macro textos indicados, corresponden a ST1 – Señal inicial para establecer comunicación con el proceso externo de indexado de matrices de gofrado y ST2 – Estado inicial no energizado de los guardamotors, para efectos de control interno.

**Ilustración 39.** Macro\_F1. Texto estructurado, Producción normal y Modo de pruebas.



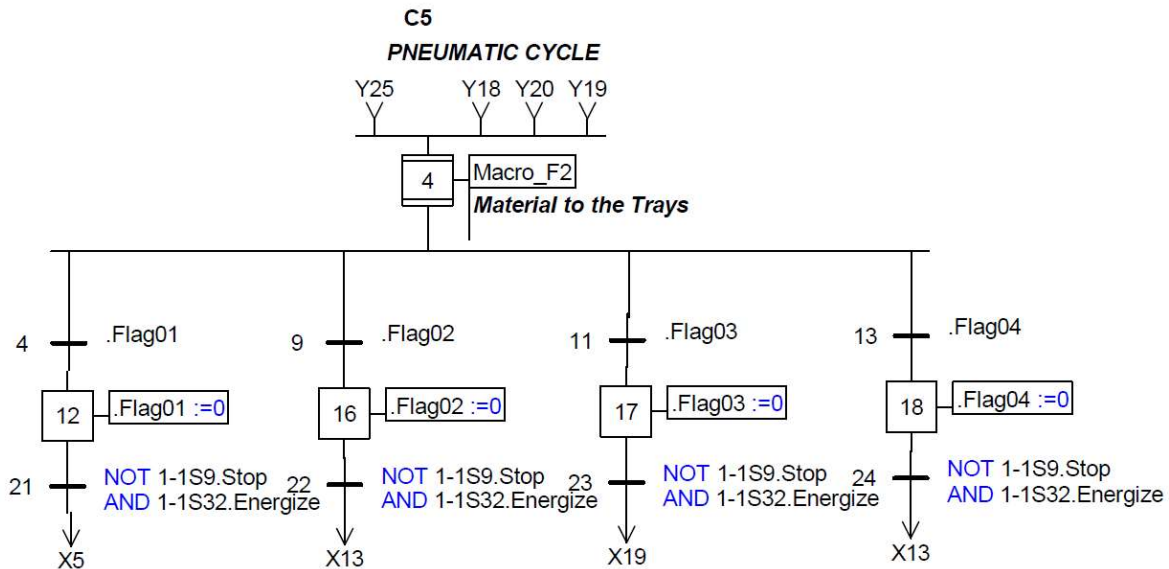
**Fuente.** Elaboración propia

En la Ilustración 40 se observan los tres saltos de salida siguientes:

- X5 – Hacia Etapas 5 y 6, avance del alimentador hidráulico de matrices.
- X13 – Hacia Etapa 13, control de ciclo único o automático.
- X19 – Hacia Etapa 19, activar bandera 6.

Se puede observar una bandera en cada una de las transiciones 4, 9, 11 y 13 que, dependiendo de la evolución del grafo, alguna de ellas tendrá el valor de 1, derivando en el grafo a conveniencia del proceso. Antes de salir del grafo, serán desactivadas asignándoles el valor de cero.

**Ilustración 40.** Macro\_F1. Ciclo neumático Macro\_F2 y derivación por banderas.

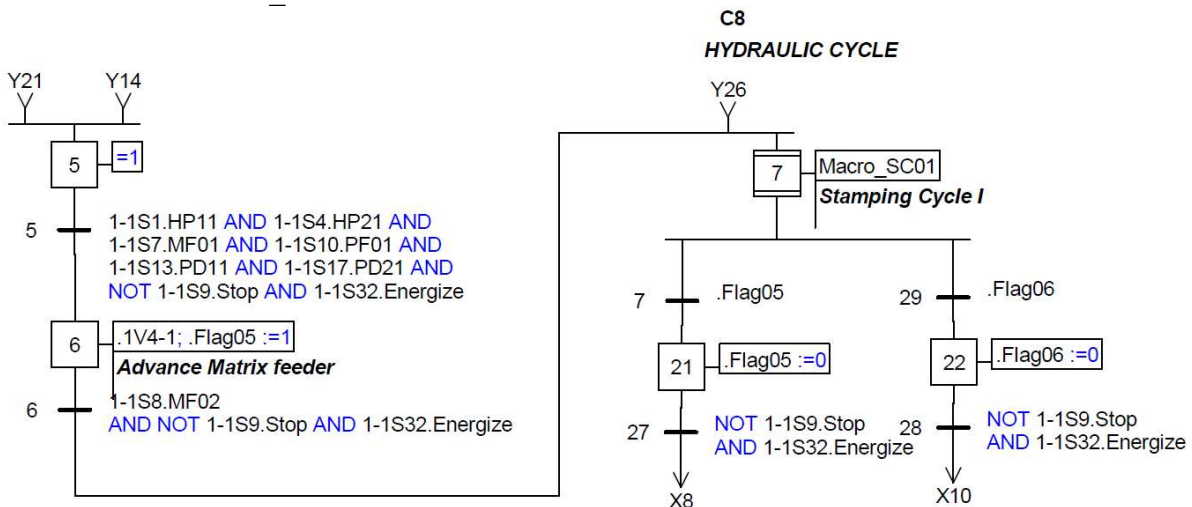


**Fuente.** Elaboración propia

La siguiente Ilustración 41, corresponde a la verificación de los sensores de posición de los actuadores hidráulicos, la validación de la *Flag05* y la ejecución de la Macro\_SC01, que es el ciclo de estampado de las PMA. Antes de derivar del grafo, se desactivan las banderas *Flag05* y *Flag06*, asignándoles el valor de cero. Se observan los dos saltos de salida siguientes:

- X8 – Hacia Etapas 8 y 15, retornando el alimentador hidráulico de matrices y asignando *Flag02=1*.
- X10 – Hacia Etapa 10, retornando el alimentador hidráulico de matrices y asignando *Flag04=1*.

**Ilustración 41.** Macro\_F1. Derivación al ciclo hidráulico.

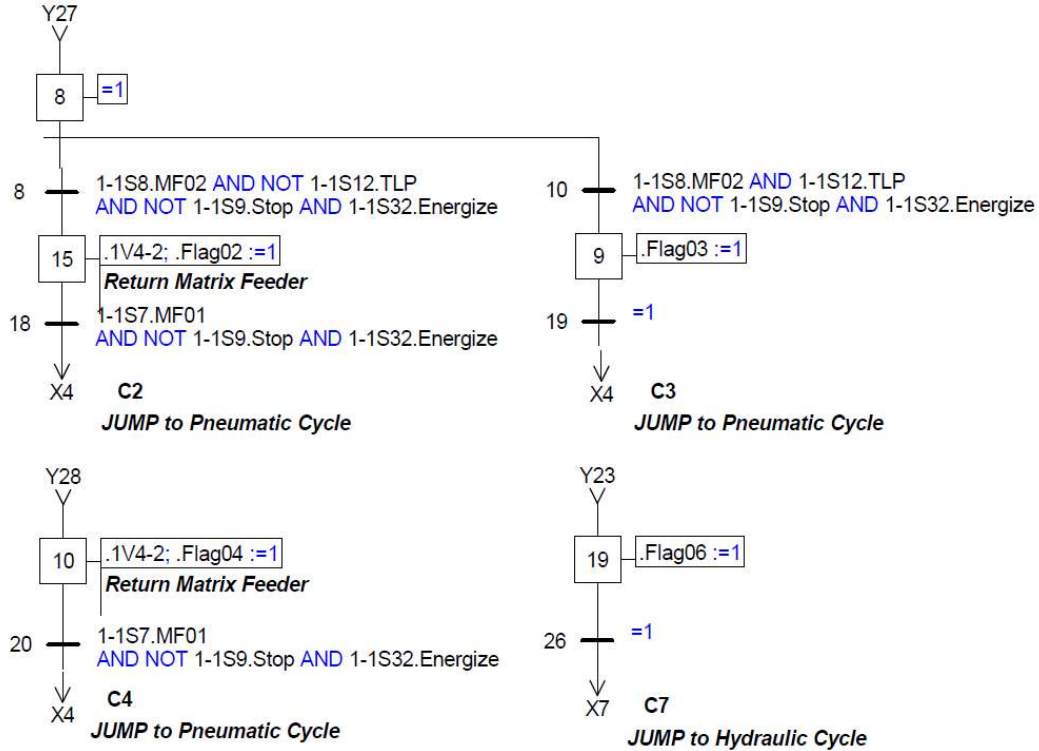


**Fuente.** Elaboración propia

En la Ilustración 42, se pueden observar las salidas del Grafcet que se indican a continuación:

- X4 – Hacia la Etapa 4, control del ciclo neumático de manejo de materiales correspondiente al desarrollo de la Macro\_F2.
- X7 – Hacia Etapa 7, control del ciclo de estampado correspondiente al desarrollo de la Macro\_SC01.

**Ilustración 42.** Macro\_F1. Derivaciones a ciclos neumático e hidráulico.

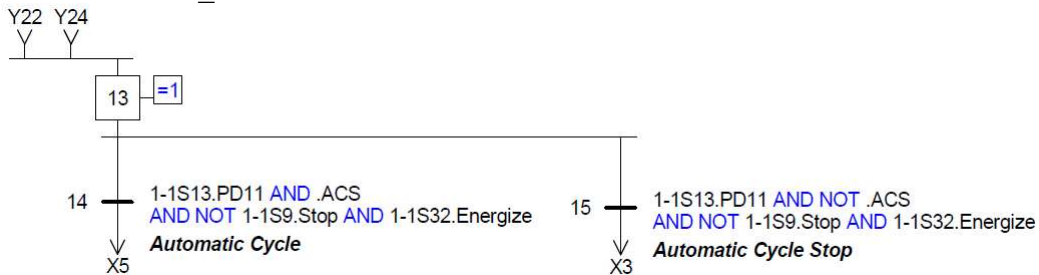


Fuente. Elaboración propia

En la Ilustración 43, se observan los dos saltos de salida del Grafcet siguientes:

- X3 – Hacia Etapa 3, inicio de ciclo sin reseteo del sistema.
- X5 – Hacia Etapas 5 y 6, avance del alimentador hidráulico de matrices.

**Ilustración 43.** Macro\_F1. Control de ciclo único o automático.



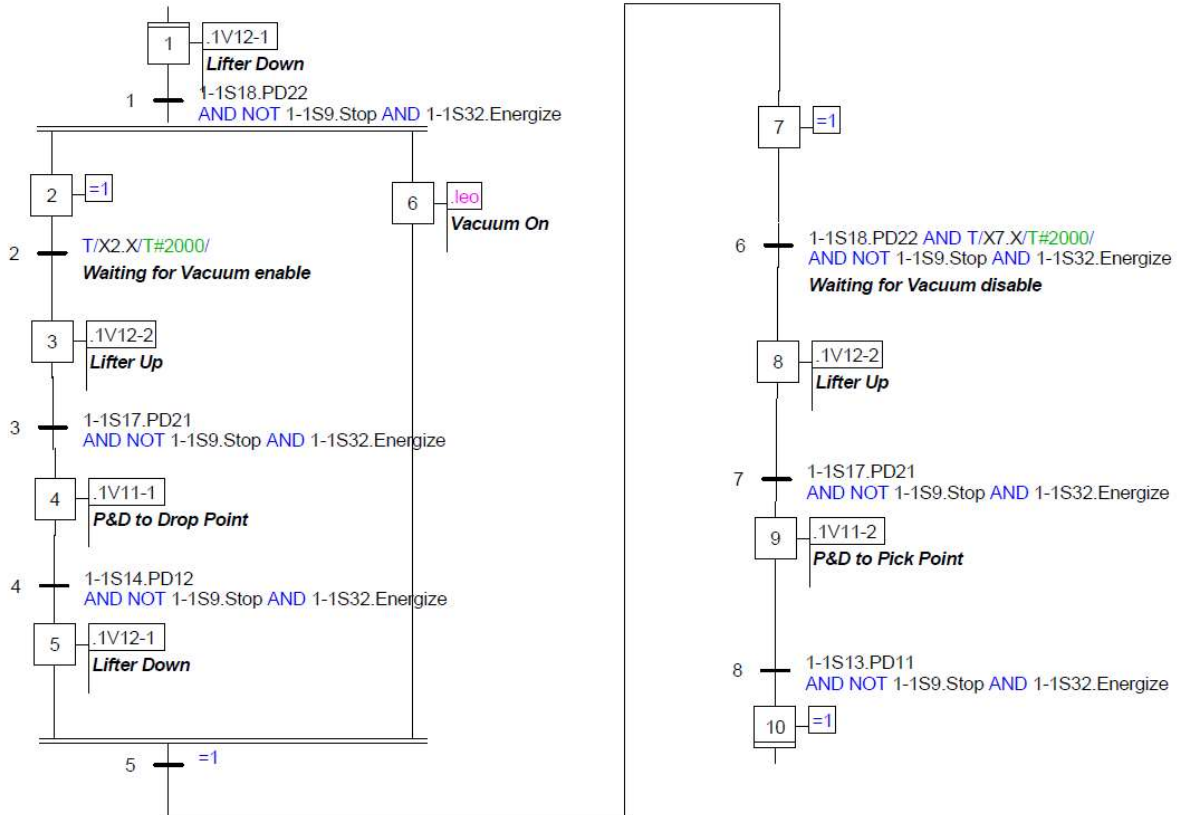
Fuente. Elaboración propia

#### 4.4.3. Macro\_F2.

En esta macro se lleva el control del ciclo neumático del manipulador neumático de materiales, cuya particularidad reside en que la Etapa 6, que se encuentra activa como el vacío en las ventosas de izado de los materiales, simultáneamente con el tiempo transcurrido en la evolución de las etapas 2, 3, 4 y 5.

Nótese como las transiciones 2 y 6 están temporizadas de tal manera que, dependiendo de los dispositivos físicos seleccionados en el diseño industrial, se puedan ajustar los tiempos para accionamiento de las válvulas generadoras de vacío.

**Ilustración 44.** Macro\_F2. Ciclo neumático manejo de materiales.



Fuente. Elaboración propia

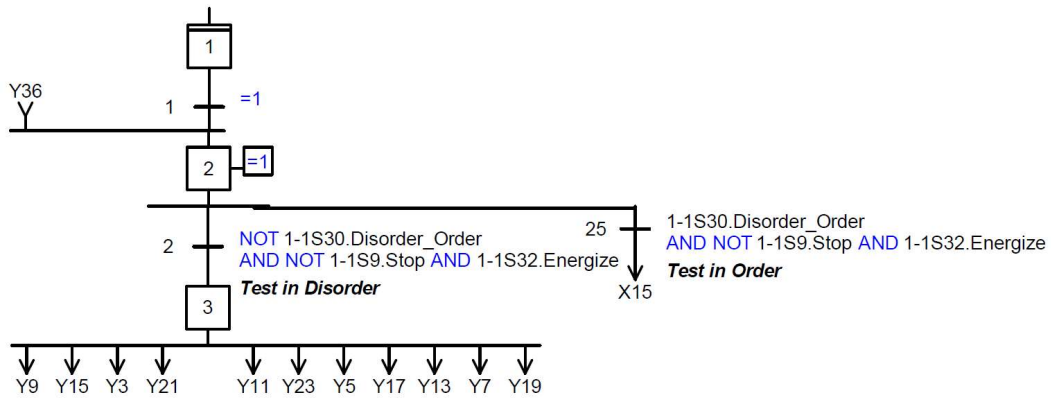
#### 4.4.4. Macro\_F45.

En esta macro se controla la selección del modo de prueba, en el orden o en el desorden, dependiendo de la posición del botón selector en el tablero de control.

En la Ilustración 45, se puede observar, que la Etapa 3 evoluciona simultáneamente hacia las etapas 4 a 13, de tal manera que se pueden probar discretamente todos los actuadores a partir de los pulsadores correspondientes en el tablero de control.

En cuanto a la salida del Grafset X15, se observa que evoluciona hacia la secuencia de etapas 15 a 24, controlando la verificación secuencial y en orden de todos los actuadores.

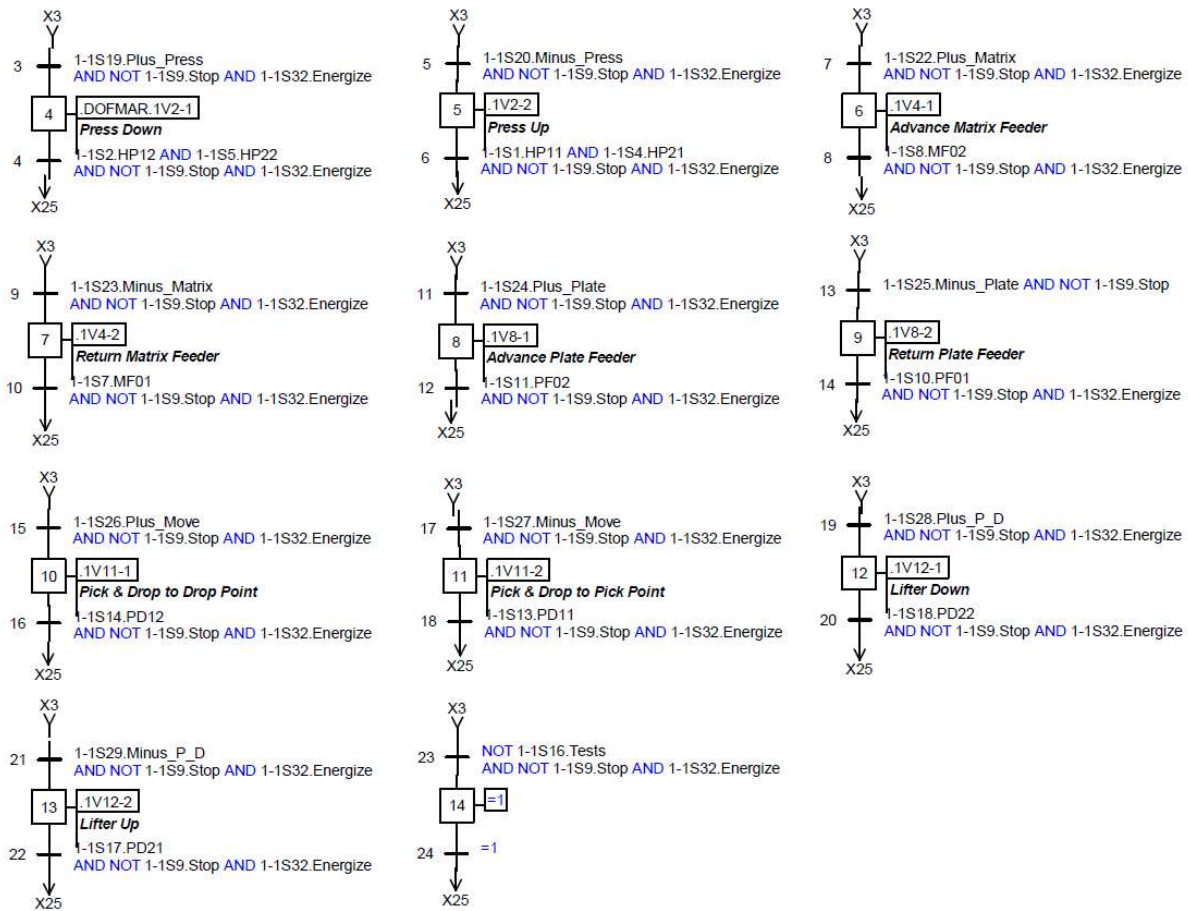
**Ilustración 45.** Macro\_F45. Selección del modo de prueba.



**Fuente.** Elaboración propia

En esta macro se lleva el control de las verificaciones discretas de los diferentes actuadores, en el orden y en el desorden.

**Ilustración 46.** Macro\_F45. Verificación de actuadores en el desorden.

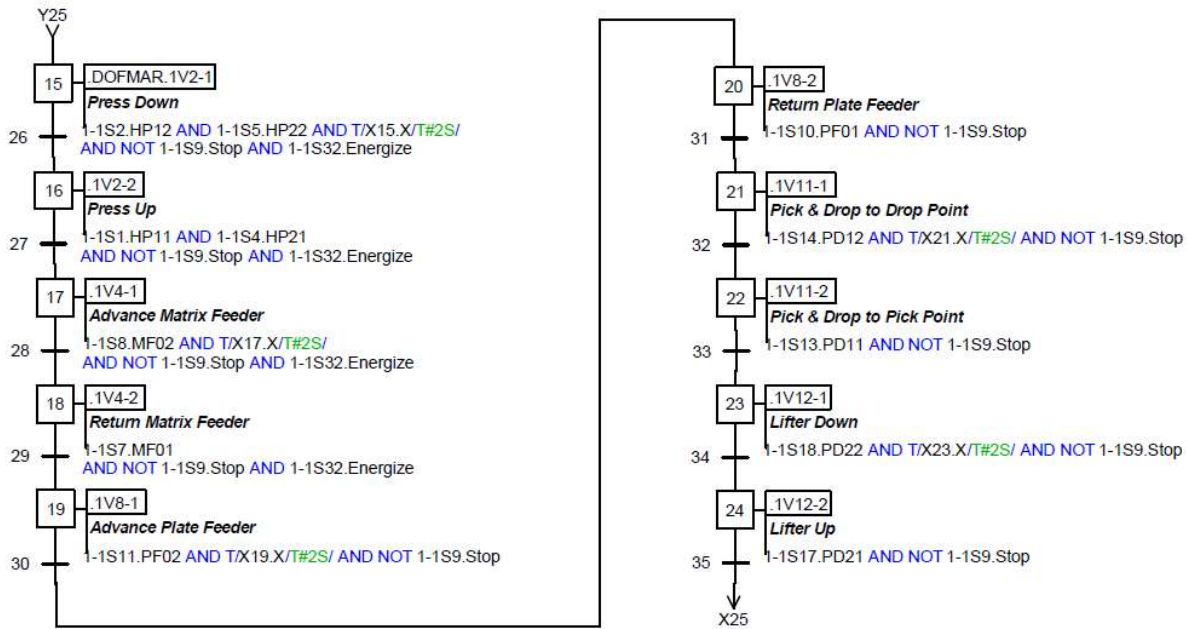


**Fuente.** Elaboración propia

Cada uno de los grafos de las etapas 4 a 13 (Ilustración 46), permiten la verificación de cada actuador, de manera independiente, a partir del accionamiento de los correspondientes pulsadores en el tablero de control (Ilustración 29), lo que corresponde a la verificación en el desorden.

En la Ilustración 47, se observa que el grafo evoluciona de manera secuencial de la etapa 15 hasta la etapa 24, realizando la verificación secuencial de los actuadores, control que procede de la posición del interruptor respectivo en el tablero de control (Ilustración 29),

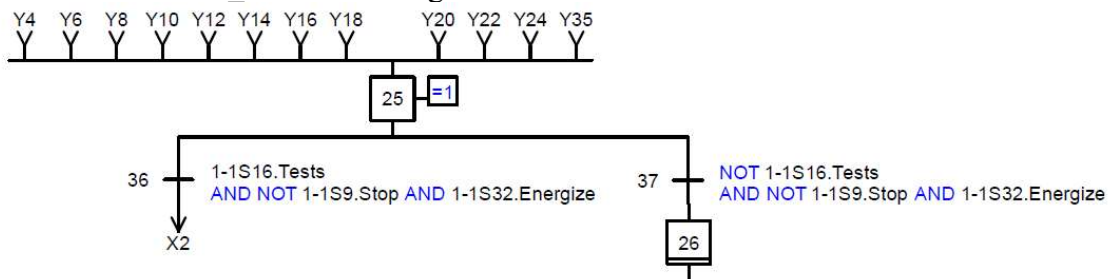
**Ilustración 47.** Macro\_F45. Verificación de los actuadores en el orden.



**Fuente.** Elaboración propia

En la Ilustración 48, se observa una doble posibilidad de salida del grafo; por la transición 36 se continúa en la verificación de los actuadores en el desorden; y por la transición 37 se finaliza la verificación de los actuadores en el orden, se termina la ejecución de la macro y se retorna al punto de llamada.

**Ilustración 48.** Macro\_45. Cierre del grafo.

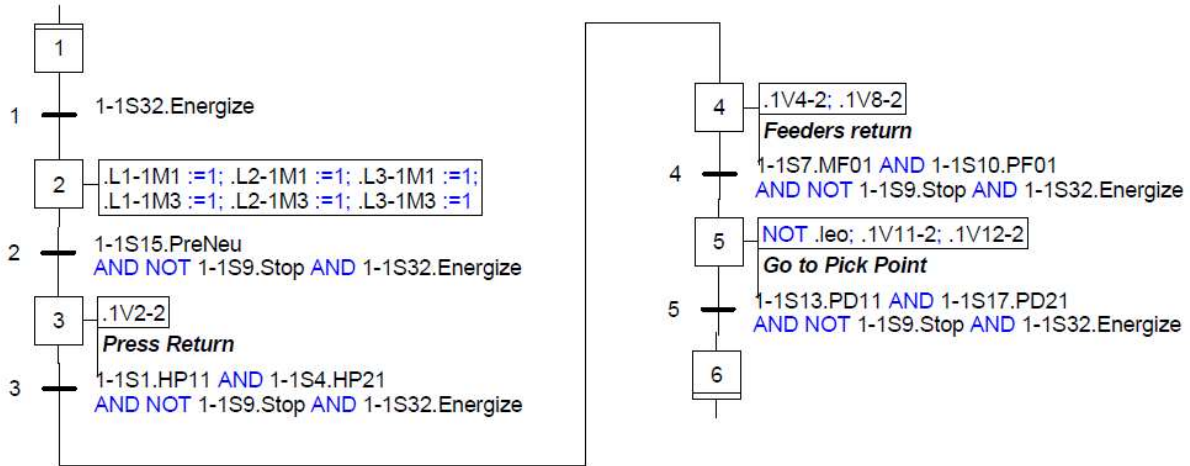


**Fuente.** Elaboración propia

#### 4.4.5. Macro\_A6.

En esta macro se lleva el control de puesta en estado inicial de los diferentes actuadores, es decir, en las posiciones de vástago retraído y en el caso del actuador P&D, en la posición de reposo inicial (Ilustración 49).

**Ilustración 49.** Macro\_A6. Restauración de los sistemas neumático e hidráulico.



Fuente. Elaboración propia

#### 4.4.6. Macro\_SC01.

En esta macro se lleva el control del ciclo de prensado de las PMA (Ilustración 50); nótese que el prensado en la etapa 2 se encuentra temporizado, de tal manera que dependiendo de las características de temple del aluminio como materia prima, se pueda ajustar el tiempo de sostenimiento de la presión para logra el correcto gofrado del material.

**Ilustración 50.** Macro\_SC01. Control de prensado.



Fuente. Elaboración propia

## 5. CONCLUSIONES

*La alegría de ver y entender es el más perfecto don de la naturaleza.*

*Albert Einstein*

Finalizado el presente proyecto y después de la verificación del objetivo principal, que fue planteado como *Diseñar, modelar y simular el control automático de una prensa hidráulica y sus equipos auxiliares, para el proceso de estampado de PMA – Placas Matrículas Automotrices*, queda establecido que éste ha sido cumplido a cabalidad.

Lo anterior se puede declarar y sustentar con las siguientes consideraciones acerca del cumplimiento de los objetivos específicos:

En el Capítulo 2, se ha hecho una completa exposición del proceso de producción de PMA, con el soporte fotográfico suficiente para entregar al lector una clara idea del proceso real.

Adicionalmente, en el cuerpo del documento, se hace permanente referencia al proceso productivo con notas y referencias oportunas.

En el Capítulo 3, no solo se ha llevado a cabo los diseños eléctrico, neumático e hidráulico, sino que se han planteado un sin número de opciones mecánicas como solución a la automatización, la cual no procede con desconocimiento real del proceso.

Las soluciones mecánicas planteadas, aunque no diseñadas, son perfectamente factibles a la luz de un razonamiento mecánico medio y de una experiencia mínima en procesos industriales.

En cuanto a la ejecución y simulación de los diferentes sistemas, se usó un software pertinente; aquel conocido como *Automation Studio*.

En el Capítulo 4, se desarrolló y simuló la *Red de Petri* correspondiente al proyecto con la respectiva generación de las ecuaciones de estado.

Para ejecutar lo anterior, se usó un software pertinente; aquel conocido como *Syrphico*.

En el Capítulo 4, se desarrolló y simuló el *Grafset* correspondiente al proyecto, lo cual procedió a partir de los diseños realizados en *Automation Studio* y las funcionalidades del mismo software para la realización de los *Grafset*.

En el Capítulo 4, se exponen las características completas de la guía *Gemma* y se establece aquella con la cual se llevará a cabo el proyecto.

Visto lo anterior, queda establecido y evidenciado el cumplimiento de los objetivos específicos y por ende el objetivo principal del proyecto.

### 5.1. Perspectiva de proyectos futuros.

Cuatro son los proyectos que se pueden plantear a la luz del desarrollo del presente trabajo, que resultan complementarios, determinantes para la evolución del conocimiento y especialmente, valiosos como complemento eventualmente futuro del proceso completo de producción de PMA.

**5.1.1. Diseño mecánico y desarrollo de bastidores y dados de repujado con orientación a la automatización.**

**5.1.2.** Diseño, modelado y simulación de un almacén automatizado, con indexación para selección y ubicación de los dados en el bastidor de estampado.

**5.1.3.** Diseño, modelado y simulación de una estación proveedora de materiales para la selección por tipos y tamaños de PMA para el estampado.

**5.1.4.** Diseño, modelado y simulación del proceso de trazabilidad, empaque y embalaje.

---

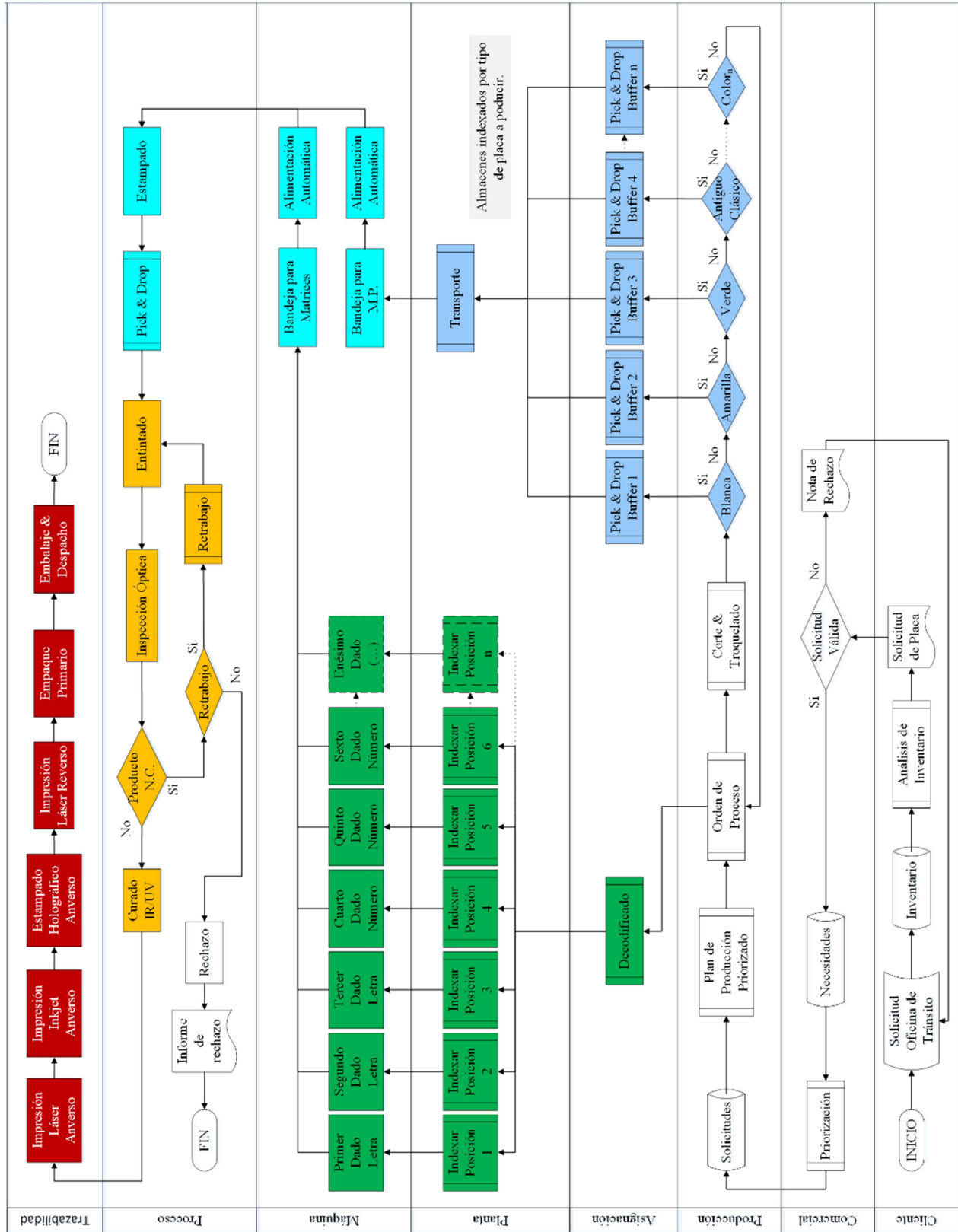
## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] R. Hernández Gaviño, *Introducción a los sistemas de control: conceptos, aplicaciones y simulación con matlab*. Pearson Educación, 2010.
- [2] S. Fletcher *et al.*, “Adaptive Automation Assembly: Identifying System Requirements for Technical Efficiency and Worker Satisfaction,” *Comput. Ind. Eng.*, Mar. 2019.
- [3] P. Ponsa, R. Vilanova, and M. Diaz, “GEMMA GUIDE APPROACH FOR THE INTRODUCTION OF THE HUMAN OPERATOR INTO THE AUTOMATION CYCLE,” *IFAC Proc. Vol.*, vol. 39, no. 6, pp. 285–290, 2006.
- [4] J. L. Díez, A. Valera, J. L. Navarro, M. Vallés, and A. Encinas, “AN INTERACTIVE COURSE ON ‘LOGIC CONTROLLERS DESIGN USING GRAFCET,’” *IFAC Proc. Vol.*, vol. 39, no. 6, pp. 135–140, Jan. 2006.
- [5] L. Rodríguez Urrego, “GEMMA Una Herramienta Universal para la Automatización de Procesos,” *search.ebscohost.com*, no. September, 2015.
- [6] FAMIC Technologies Inc., *AUTOMATION STUDIO. Guía del usuario*, 3a ed. StLaurent, QC, Canada: FAMIC Technologies Inc.
- [7] FAMIC Tehnologies Inc., *AUTOMATION STUDIO. Guía del usuario del taller*, 3a ed. StLaurent, QC, Canada: FAMIC Tehnologies Inc.
- [8] Ministerio de Transporte, “Estadísticas del RUNT | RUNT,” 2019. [Online]. Available: [https://www.runt.com.co/cifras?field\\_fecha\\_de\\_la\\_norma\\_value%5Bvalue%5D%5Byear%5D=2018&field\\_grafica\\_value=5](https://www.runt.com.co/cifras?field_fecha_de_la_norma_value%5Bvalue%5D%5Byear%5D=2018&field_grafica_value=5). [Accessed: 23-Apr-2019].
- [9] Soluciones Corporativas Integrales S.A.S., “Señalización vial, Placas Automóvil y Motocicleta -,” 2018. [Online]. Available: <http://solucionescorp.com.co/>. [Accessed: 24-Apr-2019].
- [10] UTSCH, “Máquinas computarizadas,” 2019. [Online]. Available: <https://www.utsch.com/Produkte/Maschinen-Geraete/Computergesteuerte-Maschinen/?lang=2>. [Accessed: 23-Apr-2019].
- [11] UTSCH, “Máquinas & Equipos,” 2019. [Online]. Available: <https://www.utsch.com/es/Productos/Maquinas-y-equipos/>. [Accessed: 23-Apr-2019].
- [12] UTSCH, “UTSCH | Máquinas completamente automáticas,” 2019. [Online]. Available: <https://www.utsch.com/en/Products/Machines-Equipment/Fully-Automatic-Machines/>. [Accessed: 23-Apr-2019].
- [13] “MICROSENS Switches form the IT infrastructure of Erich Utsch AG,” 2019. [Online]. Available: <https://www.microsens.com/fr/success-stories/microsens-switches-form-the-it-infrastructure-of-erich-utsch-ag/>. [Accessed: 23-Apr-2019].
- [14] Trimble Inc., “SketchUp Pro - Producto | SketchUp,” *ScetchUp Pro*, 2019. [Online]. Available: <https://www.sketchup.com/es/products/sketchup-pro>. [Accessed: 24-Apr-2019].
- [15] S. N. Chapman and E. M. Jasso Hernand Boneville, *Planificación y control de la producción*. Pearson Educacion, 2006.
- [16] Ministerio de Transporte, “Ficha Técnica MT-001.” Ministerio de Transporte, Santafé de Bogotá D. C., p. 13.

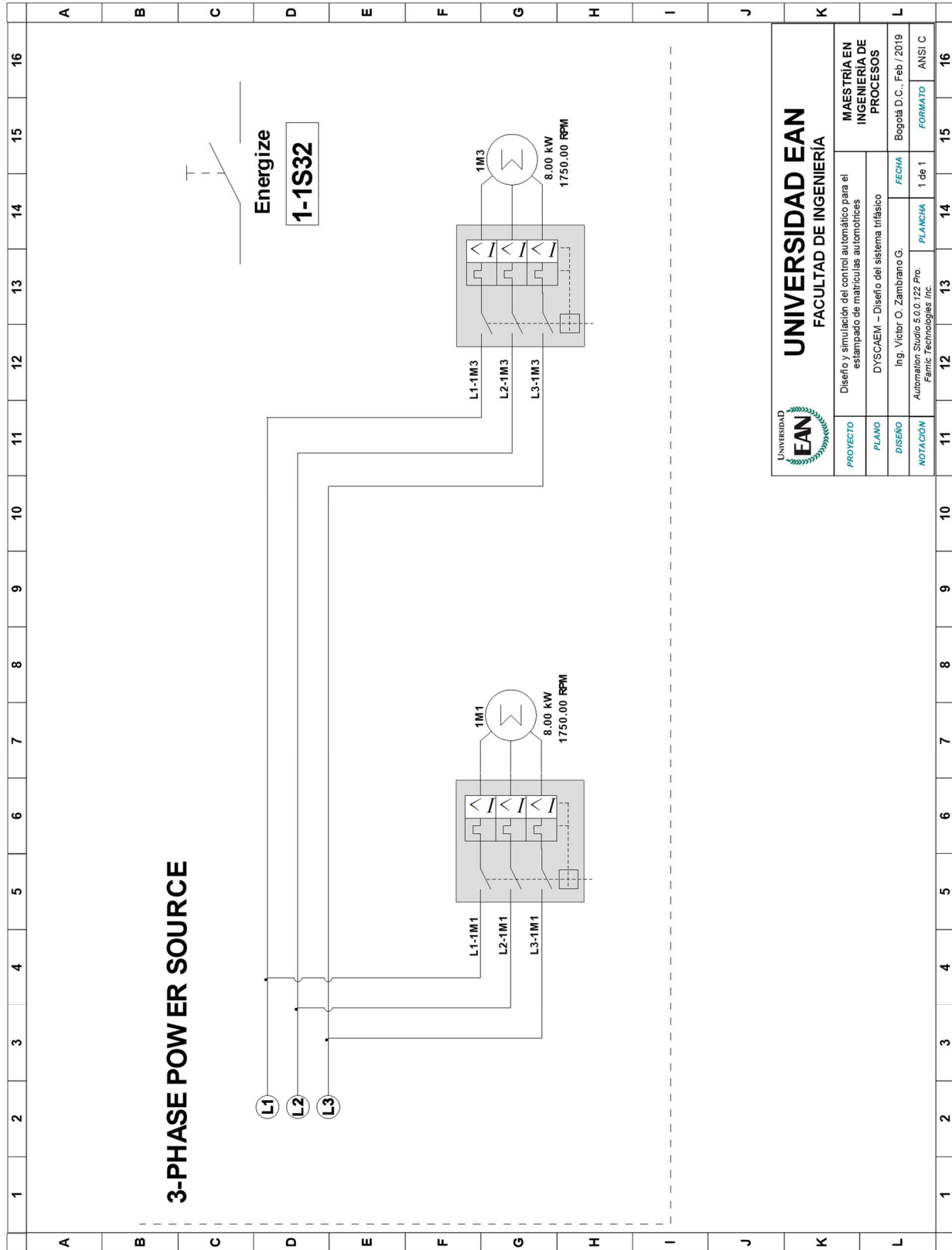
- [17] J. C. Vásquez Cortés, J. P. Cardona Guio, and J. J. Leal Gómez, *Automatización neumática*, 1a ed. Bogotá D. C.: Ediciones de la U, 2015.
- [18] A. Creus Solé, *Neumática e hidráulica*, 2a ed. México D.F.: Marcombo, 2011.
- [19] C.-M. Lorena and R.-U. Leonardo, “Sustainable procurement with Coloured Petri Nets. Application and extension of the proposed model,” *Expert Syst. Appl.*, vol. 114, pp. 467–478, Dec. 2018.
- [20] L. R. Urrego, E. G. Moreno, F. M. Anglada, A. C. Salvador, and E. Q. Cucarella, “Hybrid Analysis in the Latent Nestling Method Applied to Fault Diagnosis,” *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.*, vol. 10, no. 2, pp. 415–430, Apr. 2013.
- [21] L. Rodríguez-Urrego, E. García, E. Quiles, A. Correcher, F. Morant, and R. Pizá, “Diagnosis of Intermittent Faults in IGBTs Using the Latent Nestling Method with Hybrid Coloured Petri Nets,” *Math. Probl. Eng.*, vol. 2015, pp. 1–14, Sep. 2015.

## **ANEXOS**

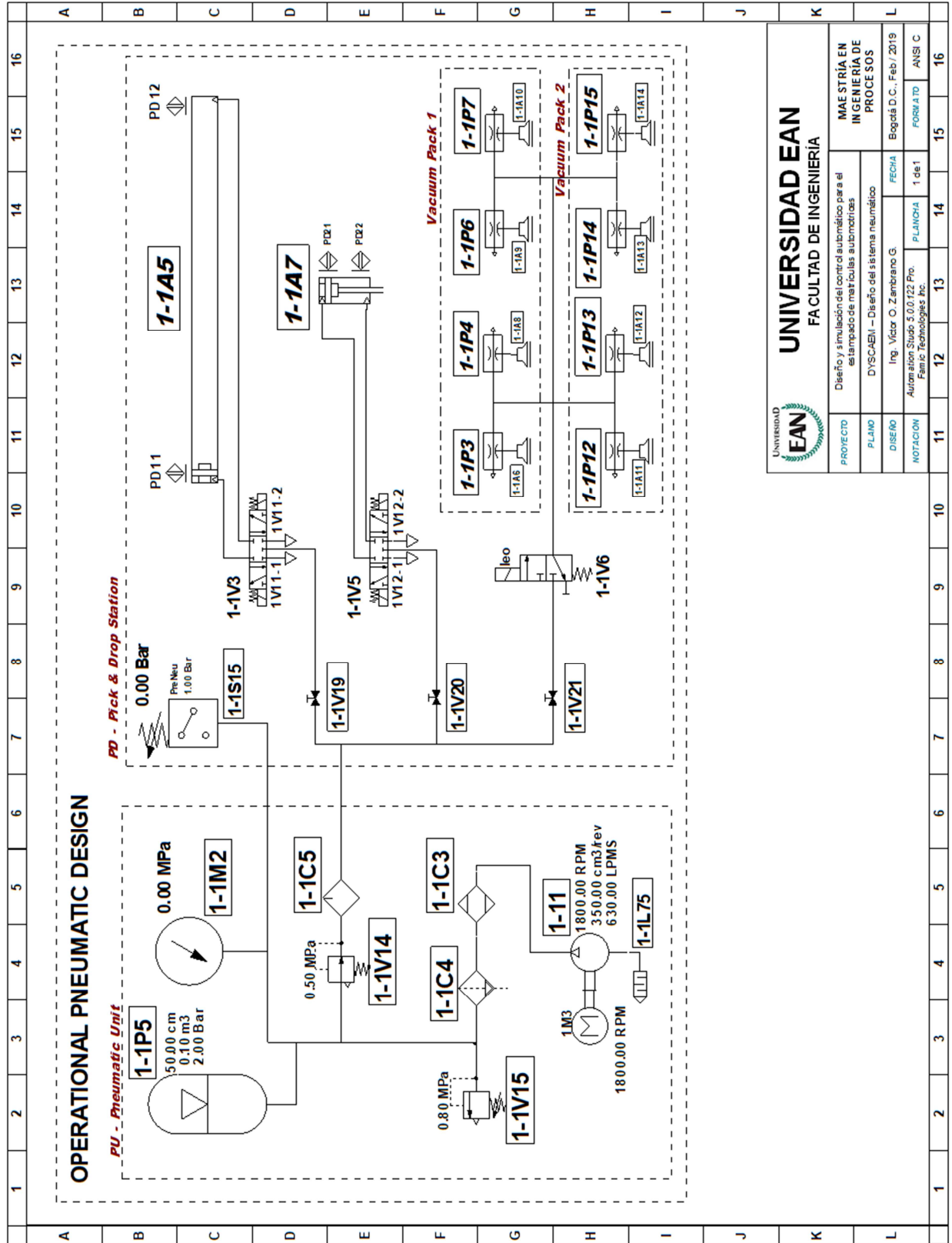
Anexo 1. Diagrama de funciones cruzadas.



## Anexo 2. Circuito Trifásico Motores.

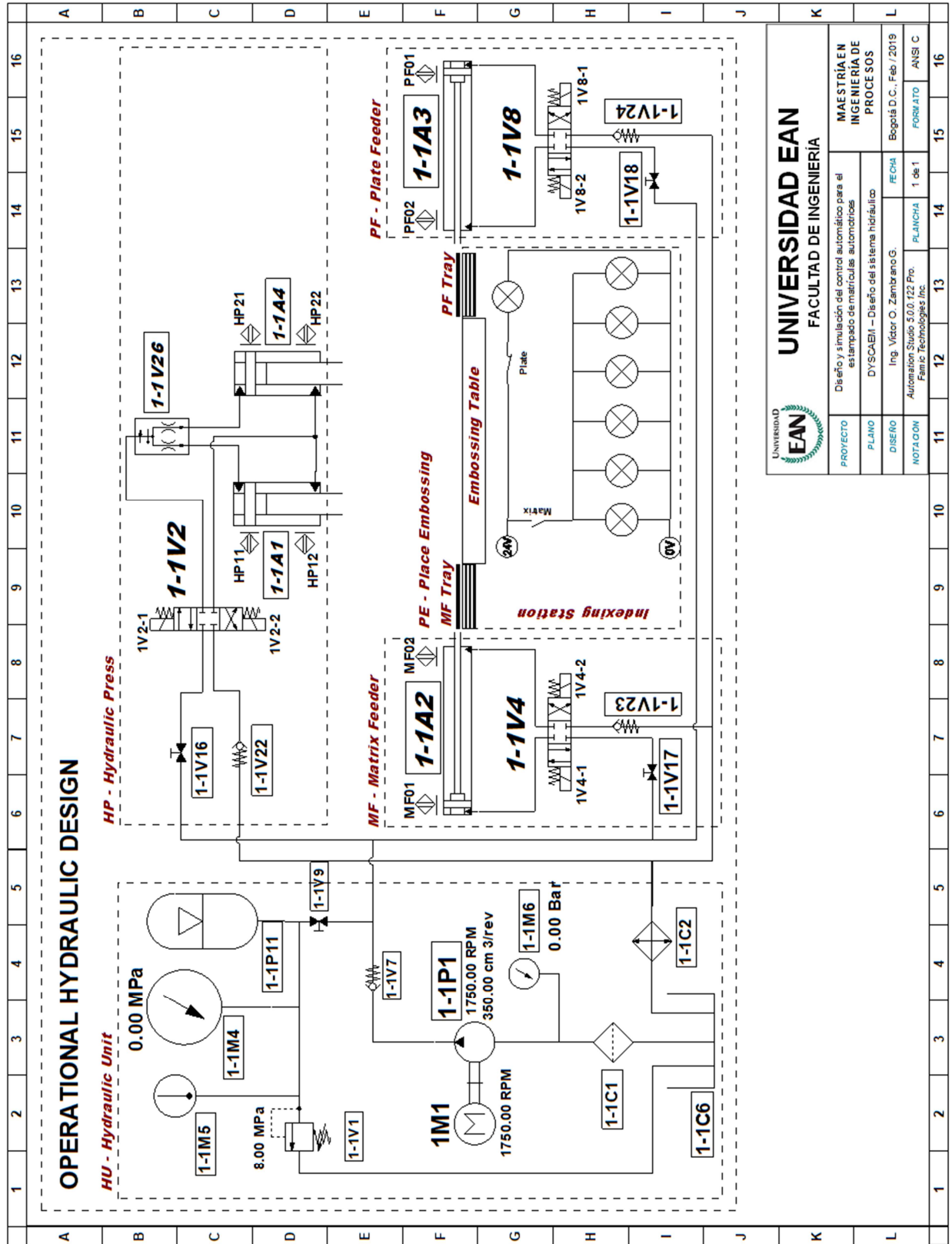


### Anexo 3. Sistema Neumático.

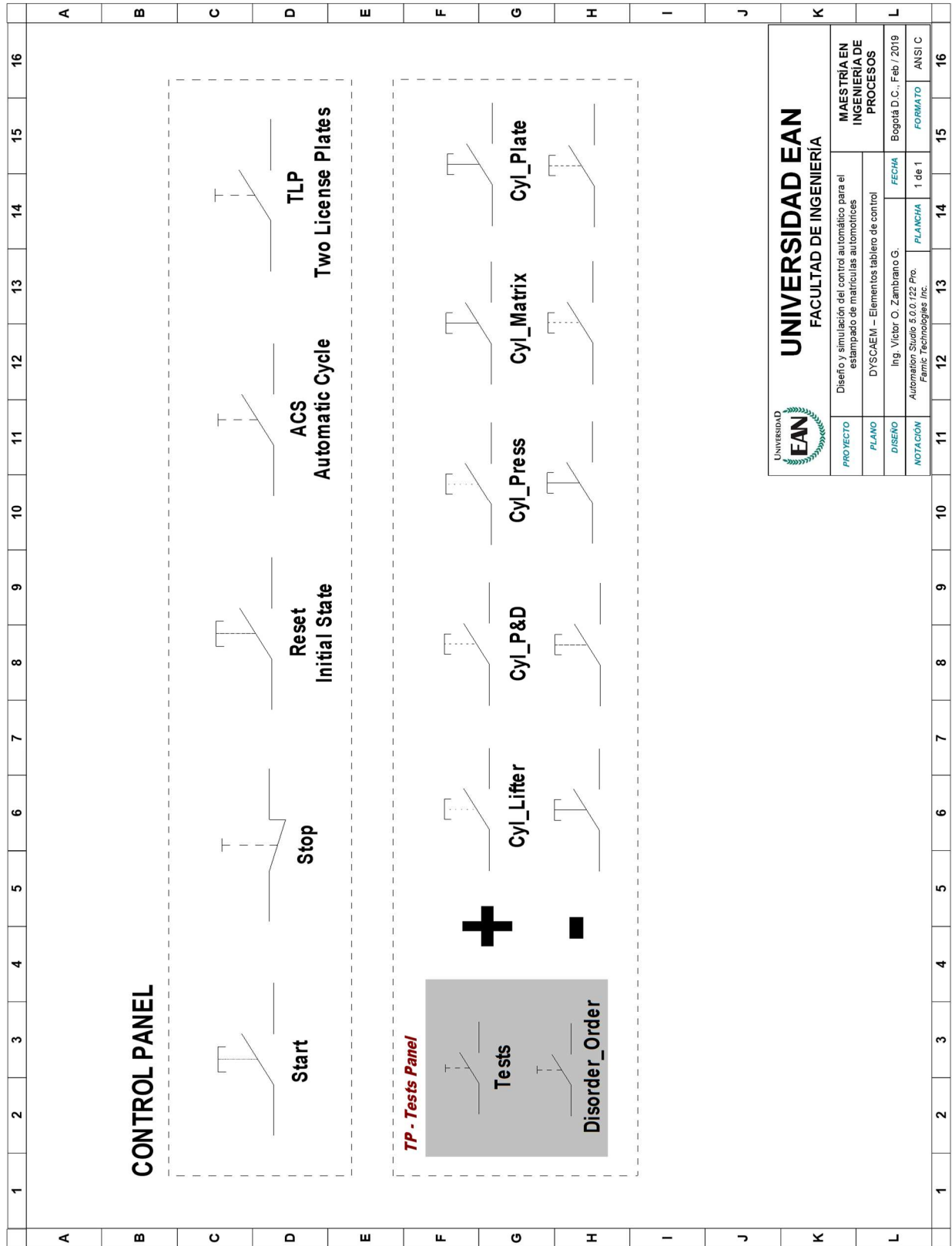


		<b>UNIVERSIDAD EAN</b> FACULTAD DE INGENIERIA	
		MAESTRIA EN INGENIERIA DE PROCESOS Bogotá D. C., Feb / 2019	FORMATO ANSI C
PROYECTO Diseño y simulación del control automático para el estampado de matrículas automotrices	PLANO DYSCAEM - Diseño del sistema neumático	FECHA 1 de 1	PLANTILLA 1 de 1
DISEÑO Ing. Víctor C. Zambrano G.	NOTACION Automatización S.00.123 Pro. Famic Technologies Inc.		

### Anexo 4. Sistema Hidráulico.



## Anexo 5. Componentes Eléctricos Tablero de Control.



### Anexo 6. Diseño Tablero de Control.

