



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**Automatización del proceso de serigrafía en globos para mejora de la
producción en el grupo SIBELL**

Guamán Simba, Diego Alexander

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería en Mecatrónica

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de ingeniero en Mecatrónica

Ing. Naranjo Guatemala, Carlos Rodrigo

21 de agosto del 2021



Urkund Analysis Result

Analysed Document: Automatización del proceso de serigrafía en globos para mejora de la producción e n el grupo SIBELL.pdf (D111480350)
Submitted: 8/20/2021 12:02:00 AM
Submitted By: daguamns@espe.edu.ec
Significance: 1 %

Sources included in the report:

Sistema_semi_automu00E1tico_Rev_4.02.pdf (D12905495)
Proyecto-Final-Alex-Ceron.pdf (D21412040)
<http://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/9266/1/04%20MEC%20256%20TRABAJO%20DE%20GRADO.pdf>
<http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/5096/1/T-ESPEL-0878.pdf>

Instances where selected sources appear:

9



Firmado electrónicamente por:
CARLOS RODRIGO
NARANJO GUATEMALA

ING. CARLOS NARANJO G, MsC.
TUTOR PROYECTO



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería en Mecatrónica

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, **“Automatización del proceso de serigrafía en globos para mejora de la producción en el grupo SIBELL”** fue realizado por el señor **Guamán Simba Diego Alexander** el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por tanto cumple con el requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 17_ de agosto de 2021



Firmado electrónicamente por:
CARLOS RODRIGO
NARANJO GUATEMALA

Ing. Carlos Rodrigo Naranjo Guatemala

Director

CC: 1707087084



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería en Mecatrónica

Responsabilidad de Autoría

Yo, **Guamán Simba Diego Alexander**, con cédula de ciudadanía n° 1725532459, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación **Automatización del proceso de serigrafía en globos para mejora de la producción en el grupo SIBELL** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 19 de agosto de 2021

Una firma manuscrita en tinta azul que parece decir 'Guamán Simba'.

Guamán Simba Diego Alexander

CC. 1725532459



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería en Mecatrónica

Autorización de Publicación

Yo, **Guamán Simba Diego Alexander**, con cédula de ciudadanía N° 1725532459, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación **Automatización del proceso de serigrafía en globos para mejora de la producción en el grupo SIBELL** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 19 de agosto de 2021

Una firma manuscrita en tinta azul que corresponde al nombre de la persona autorizada.

Guamán Simba Diego Alexander

CC. 1725532459

Dedicatoria

Este trabajo va dedicado a mi familia, amigos, profesores y todas las personas intervinientes que con su apoyo moral y cooperación permitieron la culminación del presente, especialmente a mi madre quien cada día de mi vida universitaria me alentaba a seguir adelante.

Diego Guamán

Agradecimiento

A SIBELL quienes confiaron en mi para la realización de este proyecto, a mi familia y amigos quienes me apoyaron desde el primer día.

Especialmente al Ing. Carlos Naranjo quien fue la guía durante el desarrollo del proyecto quien gracias a sus consejos y conocimientos permitieron el éxito de este.

Diego Guamán

Tabla de contenido

Resumen.....	20
Abstract.....	21
Capítulo I Generalidades.....	22
Antecedente empresarial.....	22
Justificación e importancia	24
Objetivos	29
Objetivo General.....	29
Objetivos Específicos	30
Alcance del proyecto	30
Estructura del documento.....	34
Capítulo II Marco referencial.....	36
Elementos intervinientes en el proceso de serigrafía.....	36
Marco de malla	36
Malla serigráfica.....	37
Rastrillo	39
Tintas para globos	40
Estudios relacionados a la serigrafía	41
Parámetro fuerza de aplicación en el rastrillo	41
Parámetro rozamiento debido a la velocidad del rastrillo	46
Características de la materia prima globo de látex	47
Propiedad de inflado.....	49
Características.....	50

Caracterización del proceso en la empresa.....	51
Definición de pruebas para la medición de la productividad en el contexto	
OEE.....	53
Calidad	53
Rendimiento	53
Disponibilidad	54
Resultados esperados	54
Consideraciones en el diseño del proyecto	54
Selección de cilindros	54
Carga crítica de pandeo.....	55
Selección de válvulas neumáticas	56
Consumo de aire	57
Esquema resumen del diseño mecánico	57
Estabilidad elástica en estructuras y análisis estructural por elementos finitos.....	59
Capítulo III Diseño.....	61
Requerimientos de la empresa auspiciante	61
Despliegue de la función de la calidad	62
Investigación de alternativas	64
Arquitectura de la máquina.....	66
Sección 1 Ingreso material, extracción producto e inflado	72
Actuador interviniente	72
Diseño CAD boquilla de inserción.....	74

	10
Inflado del globo y detección	76
Esquema del circuito neumático de inflado	77
Sección 2 transporte material	78
Selección del tipo de actuador	78
Diseño mecánico	80
Estudio del movimiento y dimensionamiento del motor	82
Mesa de trabajo	84
CAD sección transporte	87
Sección 3 Impresión	88
Selección del tipo de actuador	90
Parámetros base de actuadores 1 y 2	92
Diseño mecánico base angular del rastrillo	93
Cálculo de parámetros del cilindro neumático 1	96
Diseño mecánico carril de rastrillos	98
Diseño CAD carril de impresión	100
Cálculo de parámetros del cilindro neumático 2	102
Cálculo de parámetros del cilindro neumático 3	104
Selección de válvulas electroneumáticas	106
Complementos del sistema neumático	107
Cálculo del eje – movimiento vertical	109
Diseño mecánico estructura soporte sección impresión	116
Sección 4 Electrónica y control	119
Entradas digitales	120

	11
Salidas de potencia	122
Control de motor a pasos.....	123
Controlador digital, visualización y otros	125
Consumo eléctrico	128
Diseño esquemático y diseño CAD.....	129
Capítulo IV Integración de sistemas y automatización	131
Secciones fabricadas	131
Ensamblaje estructural.....	133
Tablero neumático.....	139
Datos referentes a la automatización	141
Esquema de situación	142
Características de la automatización	143
Panel de control	144
Secuencia de trabajo.....	146
Raseado único.....	146
Doble raseado	147
Diagrama de funcionamiento.....	148
Diseño del circuito de control.....	152
Manejo de actuadores	153
Menú de control.....	154
Algoritmo de control	156
Capítulo V Pruebas y resultados	162
Calibración de parámetros de actuadores	162

	12
Actuador cilindros A y B – $\varnothing 16 \times 100$	162
Actuador cilindro C – $\varnothing 16 \times 330$	164
Actuador cilindro D – $\varnothing 25 \times 330$	165
Válvulas de paso E y F	166
Pruebas de funcionamiento y tiempos de producción	167
Pruebas de operación y productividad	169
Rendimiento	171
Calidad de producto	171
Capítulo VI Análisis Financiero	176
Gastos generados	176
Estado de resultados actuales	179
Flujo de caja actual	180
Estado de resultados proyectados	181
Flujo de caja proyectado	183
VAN & TIR	184
Capítulo VII Conclusiones y recomendaciones	187
Conclusiones	187
Recomendaciones	188
Referencias	189
Anexos	193

Índice de tablas

Tabla 1	<i>Tiempos estimados al momento de una producción serigráfica manual....</i>	26
Tabla 2	<i>Tiempos promedio en el proceso serigráfico manual.....</i>	28
Tabla 3	<i>Materiales habituales de marcos serigráficos.....</i>	37
Tabla 4	<i>Clasificación densidad de hilos en una malla.....</i>	38
Tabla 5	<i>Formas de los rastrillos.....</i>	40
Tabla 6	<i>Alternativas viables de máquinas serigráficas.....</i>	64
Tabla 7	<i>Electroválvulas NC para neumática.....</i>	73
Tabla 8	<i>Matriz evaluación de Holmes - Ponderación de parámetros.....</i>	79
Tabla 9	<i>Matriz evaluación de Holmes - Parámetro Costo.....</i>	79
Tabla 10	<i>Matriz evaluación de Holmes - Parámetro Sencillez de manejo.....</i>	79
Tabla 11	<i>Matriz evaluación de Holmes - Parámetro Precisión.....</i>	80
Tabla 12	<i>Matriz evaluación de Holmes - Evaluación final.....</i>	80
Tabla 13	<i>Características del motor Nema 17.....</i>	84
Tabla 14	<i>Características técnicas del Acero estructural A36 laminado en frío.....</i>	86
Tabla 15	<i>Resultados de la simulación FEM.....</i>	87
Tabla 16	<i>Funciones de cada actuador y posibles alternativas de solución.....</i>	89
Tabla 17	<i>Matriz evaluación de Holmes - Parámetro Costo.....</i>	90
Tabla 18	<i>Matriz evaluación de Holmes - Parámetro Sencillez de manejo.....</i>	90
Tabla 19	<i>Matriz evaluación de Holmes - Parámetro Confiabilidad.....</i>	91
Tabla 20	<i>Matriz evaluación de Holmes - Evaluación final.....</i>	91
Tabla 21	<i>Resultados FEM según material comerciales base angular rastrillo.....</i>	96
Tabla 22	<i>Elementos complementarios del circuito neumático.....</i>	108
Tabla 23	<i>Características técnicas del acero plata.....</i>	113
Tabla 24	<i>Resultados de la simulación FEM de la estructura.....</i>	119
Tabla 25	<i>Elementos electrónicos intervinientes.....</i>	119
Tabla 26	<i>Valores de tiempos de pulsos mínimos A4988.....</i>	124

Tabla 27	<i>Configuración de la fracción del paso y resolución A4988.....</i>	125
Tabla 28	<i>Listado de elementos electrónicos y consumo eléctrico</i>	128
Tabla 29	<i>Tabla de secuencia de actuadores único raseado.....</i>	147
Tabla 30	<i>Tabla de secuencia de actuadores doble raseado.....</i>	148
Tabla 31	<i>Tiempos de activación por secuencia doble raseado</i>	167
Tabla 32	<i>Tiempos de producción por secuencia único raseado</i>	168
Tabla 33	<i>Gastos debido a pago de empleados</i>	176
Tabla 34	<i>Gastos debido a servicios utilizados.....</i>	177
Tabla 35	<i>Gastos debido a producción serigráfica en globos</i>	177
Tabla 36	<i>Producción mensual de SIBELL</i>	178
Tabla 37	<i>Estado de resultados mensuales 2019.....</i>	179
Tabla 38	<i>Fujo de caja debido al estado de resultados.....</i>	180
Tabla 39	<i>Proyección de producción mensual de SIBELL</i>	181
Tabla 40	<i>Estado de resultados proyectados.....</i>	182
Tabla 41	<i>Flujo de caja debido al estado de resultados proyectados.....</i>	183
Tabla 42	<i>Desglose de gastos en elementos para el desarrollo de la máquina</i>	184
Tabla 43	<i>Desglose de costos debido a mano de obra e ingeniería</i>	185
Tabla 44	<i>Análisis de la viabilidad del proyecto VAN TIR</i>	186
Tabla 45	<i>Calibración de tiempo [s] de activación de actuadores neumáticos</i>	193
Tabla 46	<i>Tiempos (segundos) del proceso de único y doble raseado</i>	194
Tabla 47	<i>Medición indicadores de productividad.....</i>	195

Índice de figuras

Figura 1 <i>Mapa distribución de empresas dedicadas al sector serigráfico.....</i>	22
Figura 2 <i>Productos SIBELL</i>	23
Figura 3 <i>Diagrama de flujo serigrafía SIBELL.....</i>	24
Figura 4 <i>Comparación cualitativa procesos de estampado populares.....</i>	25
Figura 5 <i>Diagrama Ishikawa - efecto SIBELL.....</i>	29
Figura 6 <i>Diagrama de flujo de un proceso general en serigrafía.....</i>	31
Figura 7 <i>Componentes intervinientes en el diseño mecánico</i>	32
Figura 8 <i>Componentes intervinientes en el diseño electrónico</i>	32
Figura 9 <i>Componentes intervinientes en la automatización y control.....</i>	33
Figura 10 <i>Elementos básicos del proceso serigráfico</i>	36
Figura 11 <i>Rastillo de goma con mango de madera.....</i>	39
Figura 12 <i>Parámetros de estudio experimental serigráfico</i>	42
Figura 13 <i>Resumen experimental estudio 1.....</i>	43
Figura 14 <i>Resumen experimental estudio 2.....</i>	44
Figura 15 <i>Efectos de la tensión en la tela debido a la fuerza de raseado.....</i>	45
Figura 16 <i>Efectos del uso de altas fuerzas de raseado.....</i>	45
Figura 17 <i>Fuerza de rozamientos debido a la fuerza de raseado y velocidad.....</i>	46
Figura 18 <i>Estimación de la fuerza de rozamiento debido a la velocidad</i>	47
Figura 19 <i>Comportamiento de las fibras del globo de látex al estiramiento.....</i>	48
Figura 20 <i>Comportamiento del esfuerzo-deformación del globo de látex.....</i>	48
Figura 21 <i>Cambio de la presión interna frente al cambio del diámetro del globo ...</i>	49
Figura 22 <i>Efecto de histéresis del inflado y desinflado del globo</i>	50
Figura 23 <i>Efectos del constante inflado/desinflado de un globo de látex</i>	50
Figura 24 <i>Tipos de montaje de cilindros neumáticos</i>	55
Figura 25 <i>Factor de montaje de cilindros neumáticos.....</i>	56
Figura 26 <i>Esquema de los elementos del diseño por resistencia mecánica.....</i>	58

Figura 27	<i>Esquema de los elementos de la teoría de fallas</i>	58
Figura 28	<i>QFD SIBELL</i>	63
Figura 29	<i>Diagrama de flujo de las secciones del proceso serigráfico</i>	67
Figura 30	<i>Esquema de la sección de ingreso/extracción e inflado</i>	68
Figura 31	<i>Esquema transporte de materia prima</i>	69
Figura 32	<i>Esquema sección de impresión</i>	70
Figura 33	<i>Esquema del panel de control</i>	71
Figura 34	<i>Esquema general de la máquina</i>	71
Figura 35	<i>Boquilla de inserción de globos</i>	75
Figura 36	<i>Base boquilla de inserción</i>	76
Figura 37	<i>Sensor infrarrojo</i>	77
Figura 38	<i>Esquema sección de inflado por electroválvulas NC</i>	77
Figura 39	<i>Diseño CAD sección transporte materia prima</i>	81
Figura 40	<i>Cálculo inercia respecto al eje I_{yy} por el software CAD</i>	82
Figura 41	<i>Diagramas velocidad angular y torque vs el tiempo</i>	83
Figura 42	<i>Diseño CAD mesa de trabajo y DCL</i>	85
Figura 43	<i>Resultados de la simulación FEM en la mesa de trabajo</i>	86
Figura 44	<i>Esquema de montaje de elementos mecánicos en la mesa de trabajo</i> ..	88
Figura 45	<i>Esquema gráfico de los elementos actuadores de la sección impresión</i>	89
Figura 46	<i>Diseño CAD base angular rastrillo y DCL</i>	94
Figura 47	<i>Características de mallado FEM resultantes de la base angular rastrillo</i>	95
Figura 48	<i>Simulación FEM deformaciones en la base angular rastrillo</i>	95
Figura 49	<i>Esquema interno de los diámetros en un cilindro neumático</i>	97
Figura 50	<i>Cilindro neumático 16x100 XCPC</i>	98
Figura 51	<i>Ensamble del carril de impresión</i>	99
Figura 52	<i>Ecuación de deformación máxima en un eje doblemente empotrado</i>	99
Figura 53	<i>Acero plata rectificado brillante</i>	100
Figura 54	<i>Esquema de los elementos actuadores 2 y 3</i>	101

Figura 55	Diseño CAD del carril de impresión	102
Figura 56	Cilindro neumático 16x330 XCPC.....	104
Figura 57	Cilindro neumático 25x330 XCPC.....	106
Figura 58	Electroválvula 5/2 XCPC.....	107
Figura 59	Ensamble sección impresión y ejes verticales	109
Figura 60	DCL de las fuerzas intervinientes en los ejes.....	110
Figura 61	DCL de un eje vertical mostrando las fuerzas de reacción resultantes	111
Figura 62	Diagramas de cortante y momento flector.....	112
Figura 63	Factores de superficie del acero	114
Figura 64	Recta Goodman modificada para $n=1$ y $n=23$	115
Figura 65	Deformaciones máximas del eje	116
Figura 66	Distribución de fuerzas en la estructura y ensambla de componentes .	117
Figura 67	Resultados de la simulación FEM de la estructura.....	118
Figura 68	Circuito entrada digital opto aislada	120
Figura 69	Composición de la entrada digital opto aislada	121
Figura 70	Esquema de las salidas de potencia pseudo aisladas	122
Figura 71	Conexiones de leds indicadores al ULN2003A	123
Figura 72	Esquema de conexiones motor a pasos A4988	123
Figura 73	Diagrama de tiempos de pulsos A4988.....	124
Figura 74	Arduino Mega pro mini.....	126
Figura 75	LCD 128x64ZW DIGOLE.....	126
Figura 76	Módulo DC-DC regulador de voltaje XL4015	127
Figura 77	Encoder rotativo KY-040.....	128
Figura 78	Fuente de alimentación 12 [V] 5 [A].....	129
Figura 79	Diseño CAD electrónico y resultados finales.....	130
Figura 80	Conexiones de entrada y salida de la placa	130
Figura 81	Ensamble completo de la máquina	131
Figura 82	Construcción de elementos estructurales principales.....	132

Figura 83	<i>Fijación de ejes e instalación de carril de impresión</i>	133
Figura 84	<i>Instalación de rodamientos lineales del carril de impresión</i>	133
Figura 85	<i>Instalación de cilindros neumáticos $\varnothing 16 \times 330$ y $\varnothing 25 \times 330$</i>	134
Figura 86	<i>Instalación de ejes guía y rodamientos lineales del carril de rastrillos..</i>	134
Figura 87	<i>Fijación del par de cilindros neumáticos $\varnothing 16 \times 100$</i>	134
Figura 88	<i>Instalación de los rastrillos de goma y sus respectivos ejes guía</i>	135
Figura 89	<i>Instalación de válvulas electroneumáticas y conexiones neumáticas...</i>	135
Figura 90	<i>Fijación y conexión neumática de la unidad de mantenimiento</i>	136
Figura 91	<i>Instalación del motor a pasos con su acople flexible</i>	136
Figura 92	<i>Instalación de las boquillas de inserción y sus acoples base</i>	137
Figura 93	<i>Conexiones neumáticas hacia las electroválvulas NC</i>	137
Figura 94	<i>Conexiones circuito de control, electroválvulas y otras</i>	138
Figura 95	<i>Instalación de botones y luces indicadoras</i>	138
Figura 96	<i>Sistema completamente construido</i>	139
Figura 97	<i>Esquema de elementos electroneumáticos del tablero de control</i>	139
Figura 98	<i>Conexiones físicas</i>	140
Figura 99	<i>Conexiones neumáticas en la mesa de trabajo</i>	140
Figura 100	<i>Disposición de actuadores dentro del sistema</i>	142
Figura 101	<i>Panel de control de la máquina</i>	145
Figura 102	<i>Diagrama de fases actuadores único raseado</i>	150
Figura 103	<i>Diagrama de fases actuadores doble raseado</i>	151
Figura 104	<i>Esquema de conexiones de pulsadores</i>	152
Figura 105	<i>Esquema de conexiones de salidas de potencia</i>	153
Figura 106	<i>Conexiones de reguladores de caudal y amortiguador</i>	154
Figura 107	<i>Motor a pasos y controlador A4988</i>	154
Figura 108	<i>Esquema del menú de control</i>	156
Figura 109	<i>Encabezado del programa</i>	157
Figura 110	<i>Función de configuración de condiciones iniciales</i>	157

Figura 111	<i>Función de modo espera</i>	158
Figura 112	<i>Función de calibración de posiciones del motor</i>	158
Figura 113	<i>Función prueba de funcionamiento del motor</i>	159
Figura 114	<i>Función configuración de tiempos de funcionamiento</i>	159
Figura 115	<i>Función proceso de la máquina</i>	160
Figura 116	<i>Función principal bucle infinito</i>	161
Figura 117	<i>Estudio de movimientos de los elementos actuadores A y B</i>	162
Figura 118	<i>Histograma de las mediciones del tiempo de acción actuador A</i>	163
Figura 119	<i>Histograma de las mediciones del tiempo de acción actuador B</i>	163
Figura 120	<i>Estudio actuador C – parámetro velocidad de actuación</i>	164
Figura 121	<i>Histograma de las mediciones de la velocidad del actuador C</i>	164
Figura 122	<i>Estudio del tiempo de acción del actuador D</i>	165
Figura 123	<i>Histograma de las mediciones de tiempo de acción del actuador D</i> ...	165
Figura 124	<i>Electroválvulas normalmente cerradas inflando un globo</i>	166
Figura 125	<i>Histograma medición tiempos de inflado de electroválvulas E y F</i>	166
Figura 126	<i>Histograma mediciones tiempos de producción doble raseado</i>	168
Figura 127	<i>Histograma mediciones tiempos de producción a único raseado</i>	169
Figura 128	<i>Materiales para prueba de producción</i>	171
Figura 129	<i>Histograma tiempos de producción único y doble raseado</i>	172
Figura 130	<i>Impresión fallida debido a exceso de presión de los rastrillos</i>	173
Figura 131	<i>Impresión fallida incompleta</i>	173
Figura 132	<i>Impresión con manchas de tinta</i>	174
Figura 133	<i>Impresión mejorada</i>	174
Figura 134	<i>Impresión en globo resultante</i>	175
Figura 135	<i>Resultados de los ensayos de producción</i>	175

Resumen

En el presente documento se describe el diseño y construcción de una máquina que automatiza parte de las etapas del proceso de serigrafiado en globos para la microempresa SIBELL, dicha máquina optimiza los tiempos de producción en impresiones de globos aumentando la tasa de producción a tres y media unidades por minuto al mismo tiempo que tecnifica la operación manual del mismo, dada la importancia de la reducción de los tiempos de producción se establece la importancia del uso de actuadores y válvulas electroneumáticas, dada su ventaja en la velocidad de actuación frente a otros actuadores y además de ejercer movimientos lineales útiles para el proceso, además, por medio de simulaciones de elementos finitos se estudian las cargas que actúan en las diferentes estructuras, esto con el fin de definir el perfil estructural que disminuya las deformaciones debido a las cargas. Dentro de proceso de automatización se define la secuencia de trabajo de los actuadores intervinientes homologándolos con las etapas de un raseado manual, desarrollando así dos diagramas de espacio-fase para el raseado único y el doble raseado, esto permite definir el algoritmo de control que regirá la máquina. Posterior a ello se realiza pruebas de funcionamiento y calibración de tiempos de ejecución de los distintos actuadores pudiendo determinar el tiempo del proceso alcanzado durante las pruebas de operación cuyos resultados describen una mejora del 65% respecto de la producción manual manejada en la empresa cuyo valor aún puede ser mejorado con las respectivas calibraciones y necesidades de producción.

Palabras clave:

- **GLOBO DE LÁTEX**
- **ELECTRONEUMÁTICA**
- **AUTOMATIZACIÓN**
- **TIEMPOS DE PRODUCCIÓN**

Abstract

This document describes the design and construction of a machine that automates part of the stages of the balloon screen printing process for the SIBELL microenterprise, said machine optimizes production times in balloon printing by increasing the production rate to three and a half units per minute while at the same time making its manual operation more technical. Given the importance of reducing production times, the importance of using actuators and electropneumatic valves is established, given their advantage in the speed of action compared to other actuators and in addition to exercising useful linear movements for the process. In addition, through finite element simulations, the loads acting on the different structures are studied, this to define the structural profile that reduces the deformations due to the loads. Within the automation process the working sequence of the intervening actuators is defined, homologizing them with the stages of a manual smoothing, thus developing two space-phase diagrams for the single smoothing and the double smoothing, this allows defining the control algorithm that will govern machine. After this, operation tests and calibration of the execution times of the different actuators are carried out, being able to determine the process time reached during the operation tests, the results of which describe an improvement of 65% with respect to the manual production handled in the company whose value can still be improved with the respective calibrations and production needs.

Keywords:

- **LATEX BALLOON**
- **ELECTROPNEUMATIC**
- **AUTOMATION**
- **PRODUCTION TIMES**

Capítulo I

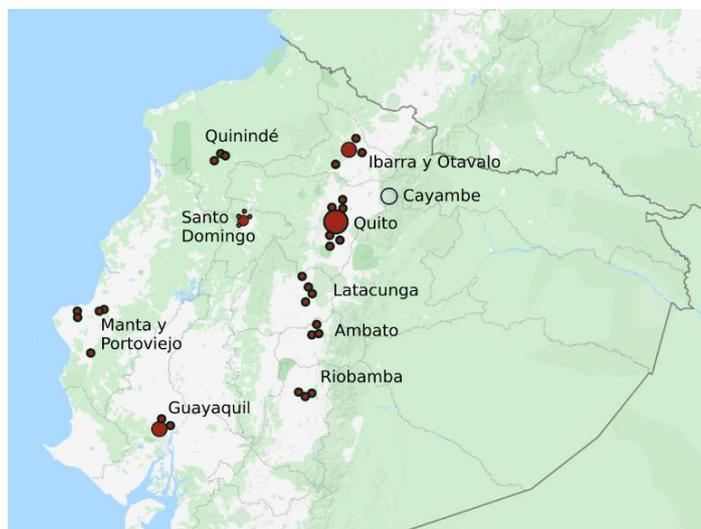
Generalidades

Antecedente empresarial

Dentro de Ecuador la industria serigráfica se encuentra implantada en varios sectores relacionados al comercio y el consumo masivo, siendo de las principales formas de ingresos económicos, como se puede observar en la Figura 1 muchos centros de producción serigráfica están distribuidos en la zona central del Ecuador ya que este proceso es utilizado principalmente en la industria textil y medio publicitario, sirviendo de apoyo o dando un valor agregado en los productos generados por estos sectores productivos, esto ha llevado a que el Grupo SIBELL incursione en este proceso de impresión.

Figura 1

Mapa distribución de empresas dedicadas al sector serigráfico



Nota. La distribución corresponde a las regiones central-norte de la costa y sierra del Ecuador.

El Grupo SIBELL ubicado en Cayambe, es una empresa ecuatoriana que se dedica a la fabricación e impresión serigráfica de bolsos reutilizables en tela no tejida, envases cilíndricos y globos de látex natural, ofreciendo toda una línea de

productos con modelos impresos personalizados Figura 2, desde otro enfoque la empresa también se desenvuelve creando productos que sirven de promoción y publicidad para empresas que contraten sus servicios y es por esto que el Grupo SIBELL tiene como objetivo entrar en el mercado publicitario a nivel nacional.

Figura 2

Productos SIBELL



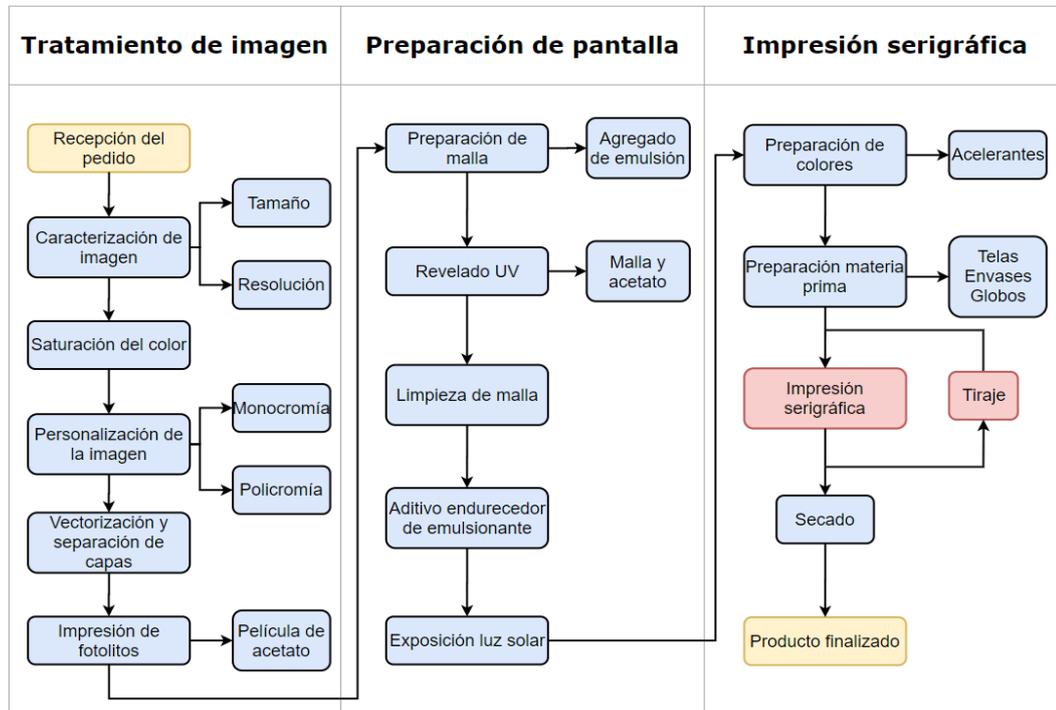
Nota. Muestra de objetos con diseños impresos que produce SIBELL. Fuente: SIBELL

Siendo una empresa relativamente nueva, las labores en el área de serigrafía son realizadas por un pequeño personal especializado que maneja máquinas completamente manuales, esto conlleva que su trabajo sea laborioso y en algunas temporadas especiales agotador debido a la cantidad de pedidos.

La empresa maneja un proceso de fabricación sencillo que inicia una vez receptado un pedido, como se observa en la Figura 3 de manera general el proceso de serigrafía se maneja en tres fases secuenciales.

Figura 3

Diagrama de flujo serigrafía SIBELL



Nota. El diagrama detalla los procedimientos que realiza SIBELL para el desarrollo de productos serigrafiados. Fuente: SIBELL.

De la Figura 3 podemos ver que gran parte del proceso requiere de la habilidad y conocimientos del personal implicando que no puede ser factible una automatización de aquellas partes, sin embargo, de todo el diagrama de flujo del proceso destaca la etapa el Tiraje pues es la etapa donde mayor tiempo se consume siendo un proceso repetitivo y automatizable.

Justificación e importancia

Existe un sinnúmero de procesos de impresión dentro del campo del estampado del cual es parte la serigrafía, cada proceso existente tiene su propio campo de aplicación en el que se desempeña mejor, por ejemplo, la impresión offset y la flexografía son muy utilizados en la imprenta y en el empaque plástico de

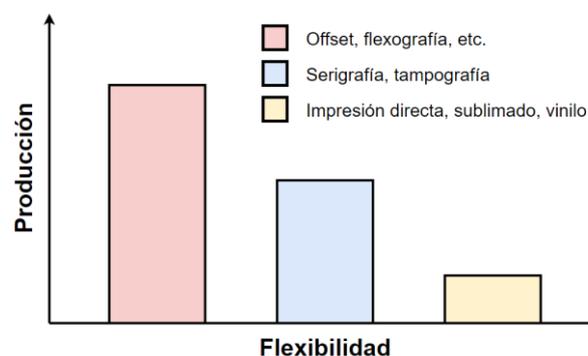
alimentos debido a su altísima tasa de producción y bajo coste cuando se trata de producción en masa, pero decae cuando se trata de flexibilidad.

Otros procesos como la sublimación, el vinilo textil y la impresión directa se desenvuelven muy bien en productos decorativos, personalización y medios publicitarios que, si bien tienen la ventaja de producir colores vivos y de alta resolución decae cuando se requiere de una alta producción ya que se encarece el proceso.

Como se observa en la Figura 4 existen procesos intermedios que tienen una excelente relación entre flexibilidad y producción entre ellos están la Tampografía y la Serigrafía, siendo procesos especializados de bajo costo y de alta producción, convirtiéndose en las técnicas más utilizadas debido a su flexibilidad, aunque en términos de calidad de imagen sea inferior a procesos como el sublimado, vinilo textil o impresión directa es más oportuno usarlo puesto que puede aplicarse en variedad de materiales y formas, variedad de tintes y tamaños, aportando bastante beneficio en sectores como el publicitario, artes gráficas, textil, señalética, decorativo, entre otros.

Figura 4

Comparación cualitativa procesos de estampado populares



Nota. Se coteja cuanto un proceso permite flexibilizar en la impresión al tiempo que maximiza la producción.

En este punto, el Grupo SIBELL una empresa dedicada al sector publicitario que aplica procesos de impresión serigráfica manuales, entiende de la importancia de este campo y busca aumentar su productividad con la ayuda de tecnologías que permitan mejorar su eficiencia y calidad de producción para así dar mayor oferta de sus servicios.

Considerando la gran relevancia de este proceso de impresión para el Grupo SIBELL ya que es la base de sus ingresos, hizo que se plantearan si el procedimiento técnico que manejan actualmente es óptimo y económicamente rentable, tras un análisis el equipo técnico de la empresa ha notado varias desventajas al mantener parte de sus procesos manuales.

La Tabla 1 muestra los tiempos estimados que se manejan en las etapas del proceso de serigrafía dentro de la empresa, actualmente la empresa maneja a 2 personas encargadas de preparar los tintes, de la etapa de tiraje o raseado con el rastrillo, entre otros y su capacidad máxima de producción diaria considerando una jornada laboral y máximo dos globos por minuto con una capa de color y modelo de impresión único es aproximadamente de 1800 unidades de globos impresos al día (sin considerar la impresión de otros productos) dado que la tasa de producción decae con el pasar de las horas de la jornada laboral.

Tabla 1

Tiempos estimados al momento de una producción serigráfica manual

N.º	Descripción	Tiempo estimado
1	Recepción de orden de trabajo previo al tratamiento de la imagen por software	5 min

N.º	Descripción	Tiempo estimado
2	Desarrollo de diseño e impresión en PVA (polivinilo acetato)	30 min
3	Preparación y aplicación de emulsionante en marco de serigrafía. Nota: el tiempo de secado del emulsionante es de doce horas por lo que estos marcos deben ser aplicados el día anterior.	15 min
4	Revelado de diseño en cámara de insolación y secado	50 min
5	Control de calidad en revelado y realizar correctivos pertinentes, en caso de presentar fallas se debe revelar nuevamente el marco	15 min
6	Aplicación de cinta en la parte inferior del marco de impresión serigráfica sin tapar el diseño con la finalidad de evitar futuros derrames de la tinta.	10 min
7	Inserción del marco de impresión serigráfica en la mesa de trabajo, preparación y aplicación de tinta y prueba de ensayo.	25 min
8	Impresión de la cantidad requerida de unidades deseadas, inserción del globo, raseado y extracción.	2 unidades/min aproximadamente
9	Secado del globo inflado a temperatura ambiente	30 segundos
Tiempo total sin considerar el raseado o tiraje en		2 horas y 30 min

Nota. Los tiempos estimados fueron proporcionados por la empresa durante un estudio del tiempo del proceso. Fuente: SIBELL.

De la tabla anterior se puede considerar que la disponibilidad de producción en el contexto de impresión (ítem 8 de la Tabla 1) es 68.75% del tiempo total sobre la jornada laboral cuando se requiere de preparativos siendo que el promedio de producción diario por persona es de 960 unidades de globos al día, en la Tabla 2 se muestran a detalle los tiempos que aproximadamente toma serigrafiar un globo.

Tabla 2

Tiempos promedio en el proceso serigráfico manual

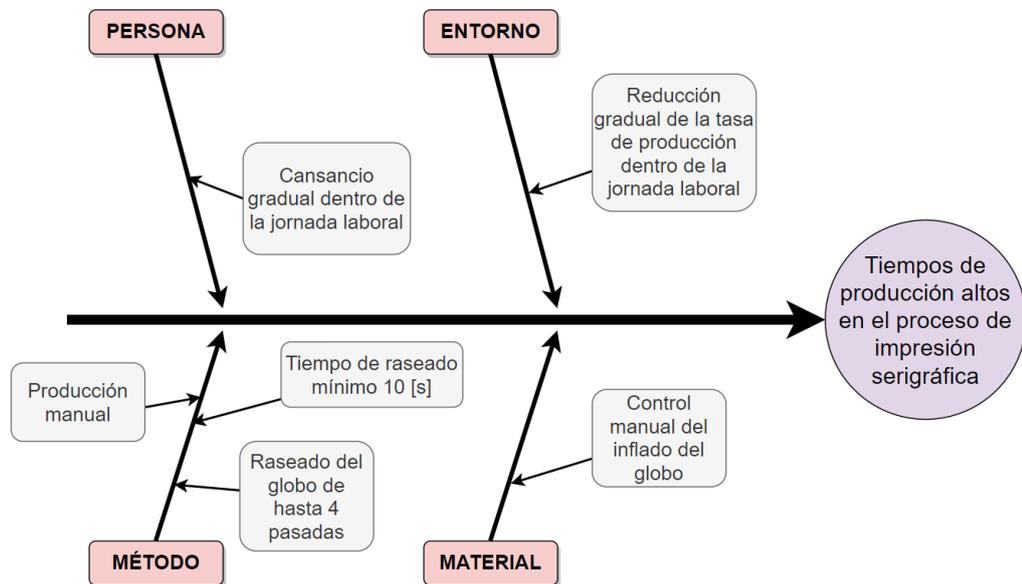
Descripción	Tiempo [s]
Inflado	10
Posicionamiento	5
Aplastamiento	2
Raseado	10
Extracción	2
Total	29

Nota. Fuente: SIBELL

Luego en la Figura 5 se desarrolla el diagrama causa-efecto Ishikawa que muestra como los procedimientos que actualmente se manejan dan como resultado tiempos de producción relativamente altos y limitaciones en ventas puesto que no pueden aumentar la oferta de sus productos o servicios, además de otros puntos relacionados al operario.

Figura 5

Diagrama Ishikawa - efecto SIBELL



Nota. Los diagramas relacionan todo el entorno laboral de SIBELL y define uno de los principales problemas de producción que se va a solucionar.

De igual manera la Figura 5 puntualiza como el cansancio gradual del artesano reduce al mismo grado la producción durante la jornada laboral es por lo que se propone realizar una máquina impresión semiautomático para serigrafía en globos que permita mejorar los tiempos de producción y así aumentar la producción ya que se eliminaría parte del proceso manual, mejorando las capacidades de la empresa aumentando así las ganancias de la empresa; asimismo el Grupo SIBELL cree que es imprescindible el desarrollo de tecnologías en Ecuador que puedan ser competitivas a nivel nacional o con maquinaria proveniente del extranjero.

Objetivos

Objetivo General

- Automatizar el proceso de serigrafía en globos para mejorar la producción del grupo SIBELL

Objetivos Específicos

- Investigar sistemas de impresión serigráfica existentes en el mercado e identificar sus características.
- Plantear una solución de máquina semiautomática que implique en la mejora de la producción mayor del 50 %.
- Diseñar y construir la máquina semiautomática de serigrafía con la información recopilada y las necesidades de la empresa.
- Analizar los resultados obtenidos con la máquina semiautomática de serigrafía y comprobar las mejoras obtenidas respecto al proceso manual.

Alcance del proyecto

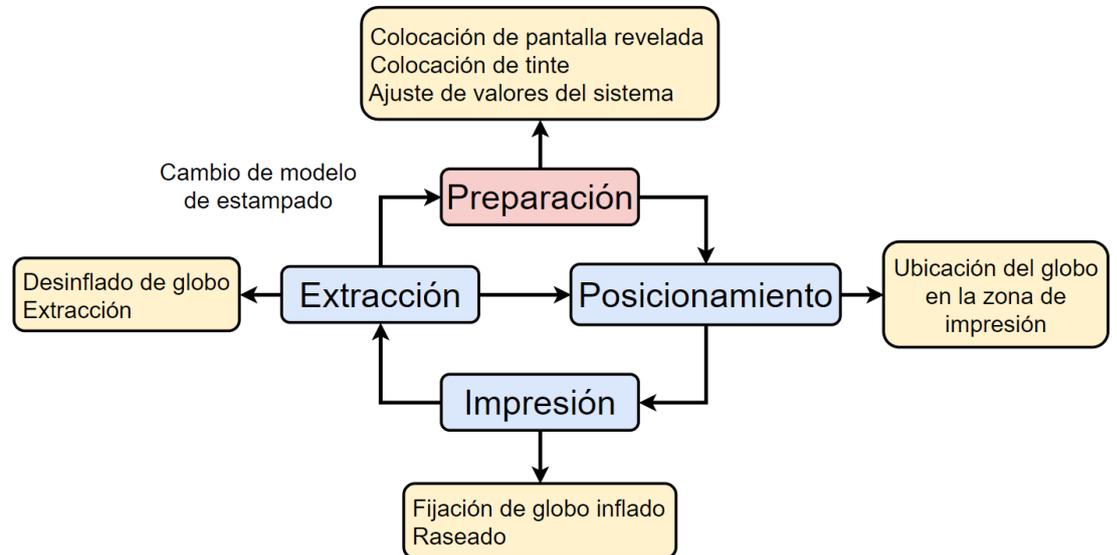
El proyecto consiste en el desarrollo de una máquina semiautomática de impresión por serigrafía en globos, el cual busca optimizar el proceso de impresión reduciendo el trabajo del artesano, mejorando tiempos de producción y manteniendo la calidad del producto.

Para tal cometido se tiene un presupuesto máximo de mil dólares que permitirán desarrollar un diseño funcional simple con los procesos de manufactura que maneja la empresa siendo estos procesos metalmecánicos, todo esto para permitir crear un dispositivo que cumpla con una velocidad meta de producción mínima de 3 [u/min] que corresponde a un 50% de mejora o preferible de 3.5 [u/min] que implicaría una mejora del 75% a nivel de producción y así mejorar el rendimiento actual de la empresa.

De manera previa y general se muestra en la Figura 6 las etapas del proceso de serigrafado indica un funcionamiento mínimo requerido por la empresa auspiciante y cuyo diseño permitirá flexibilidad en cambios para distintas materias primas como mejoras a futuro.

Figura 6

Diagrama de flujo de un proceso general en serigrafía



Nota. Fuente: SIBELL.

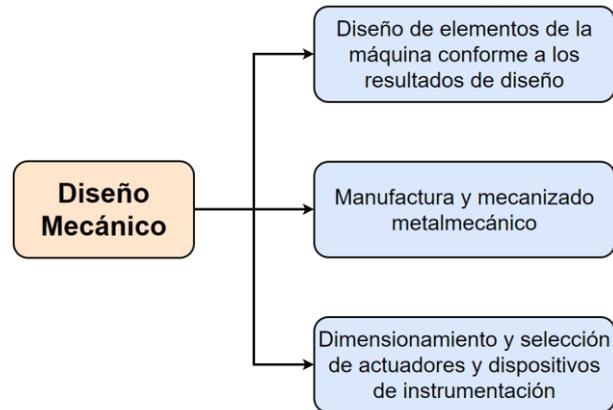
El proyecto a desarrollar se desenvuelve en varias ramas técnicas que al interrelacionarlas buscan la mejor solución posible, tales ramas son el diseño mecánico, el diseño electrónico y la automatización y control.

En la Figura 7 se describe los componentes que intervendrán en el diseño mecánico, tales componentes requerirán del uso de herramientas CAD/CAE que permitirían detectar elementos de la máquina con problemas de diseño.

El diseño final de la máquina considerará usar elementos materiales normalizados que puedan ser fácilmente manufacturables y ensamblables. Finalmente, y previo a una selección y dimensionamiento, el diseño usará actuadores, sensores y la electrónica necesaria para el acondicionamiento de estos, considerando su accesibilidad en el mercado nacional.

Figura 7

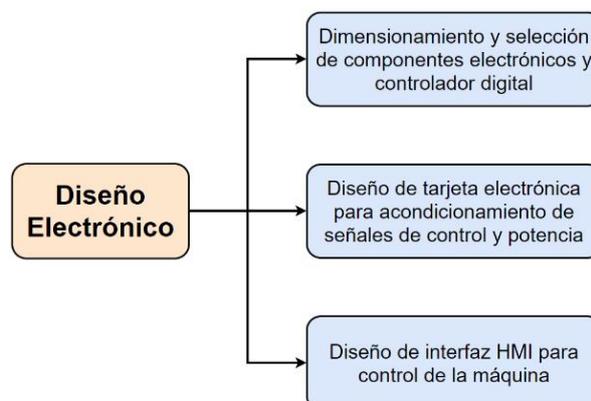
Componentes intervinientes en el diseño mecánico



El diseño electrónico como muestra la Figura 8 requiere del estudio a nivel de potencia eléctrica y corrientes para una correcta selección de componentes electrónicos, cabe recalcar que la máquina en sí estará gobernada por algún tipo de controlador digital y un circuito electrónico que acondicione y procese las señales de control y potencia, todo este sistema deberá ser controlado por el operador a través de una interfaz de usuario.

Figura 8

Componentes intervinientes en el diseño electrónico



Finalmente, la máquina como tal requiere ser automatizada, el nivel de automatización que se pretenda dependerá mucho de las funcionalidades que espera la empresa auspiciante y el presupuesto que se va a manejar.

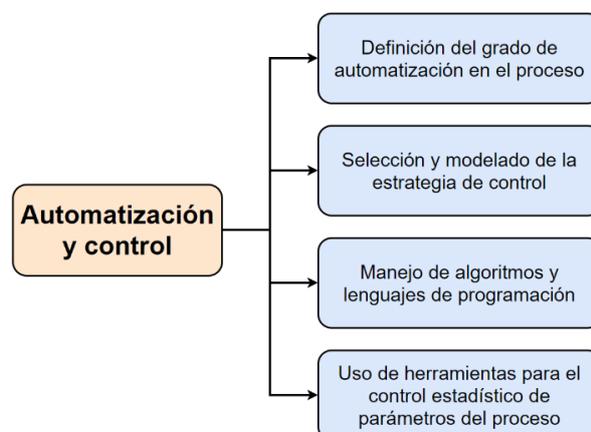
La Figura 9 muestra el esquema a seguir para la automatización y control donde una vez especificado el nivel de automatización, el tipo de control dependerá mucho de algunos factores como el grado de dificultad de implementación tanto física como algorítmica, la complejidad de manipulación de la variable a controlar por parte del actuador, el número de entradas o salidas y finalmente los elementos o señales externas que puedan interferir en el proceso.

Con todos estos requerimientos se seleccionará una estrategia de control útil que garantice estabilidad y robustez, sea eficiente y fácilmente implementable.

Para cualquier estrategia de control seleccionada, se requerirá establecer ciertos parámetros de funcionamiento en variables que lo requieran, el control estadístico del proceso en el proyecto permitirá analizar el valor de estos parámetros para un óptimo funcionamiento y obtener mejoras en la calidad de impresión.

Figura 9

Componentes intervinientes en la automatización y control



Estructura del documento

El documento actual consta de siete capítulos en el que se describen varios aspectos que conciben el desarrollo de la máquina de impresión semiautomática para el proyecto *“Automatización del proceso de serigrafía en globos para mejora de la producción en el grupo SIBELL”*, con una breve descripción de cada uno se tiene al Capítulo I: Generalidades, el cual describe la situación actual del área de producción de la empresa y pormenores generales de la solución planteada.

En el Capítulo II: Marco Referencial, se recopila toda la información necesaria del proceso de serigrafía y caracterización de los parámetros de la máquina a diseñar, además de cuestiones que no son de dominio.

Dentro del Capítulo III: Diseño, se describe completamente el proceso de diseño y control, iniciando desde los requerimientos de la empresa auspiciante y expone el análisis matemático y computacional que se realiza para cada caso y el Capítulo IV: Integración de Sistemas y Automatización, muestra como cada parte del diseño realizado con anterioridad se relacionan entre sí para obtener el producto final, cabe mencionar este último describe los procesos de manufactura utilizados, ensamblajes e implementación de algoritmos de control e interfaz de usuario.

El Capítulo V: Pruebas y Resultados, a través de un conjunto de pruebas de funcionamiento y mediciones realizadas obtenemos las características técnicas y corregimos los fallos encontrados, este capítulo también nos permitirá determinar los efectos y beneficios que la empresa tendrá a futuro.

El Capítulo VI: Análisis Económico y Financiero, después de obtener los resultados del capítulo anterior, finalmente podemos exponer cual es el impacto que va a tener la empresa a futuro hablando en términos económicos, además describe que tan beneficioso resulta el invertir en este tipo de máquinas para una empresa.

Finalmente, el Capítulo VII: Conclusiones y Recomendaciones, con toda la información obtenida hacemos una recapitulación de todos los resultados obtenidos, pros y contras, trabajos a futuro y posibles mejoras.

Capítulo II

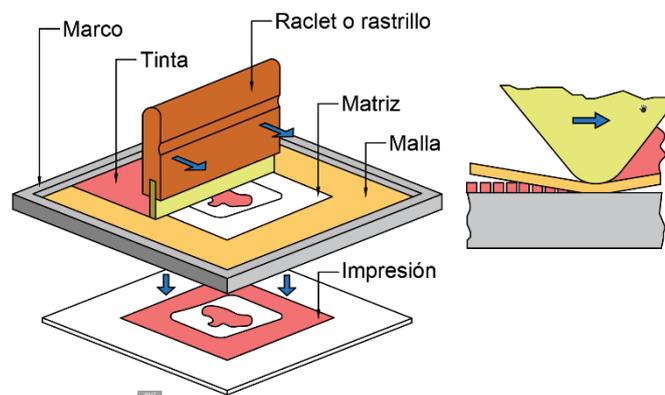
Marco referencial

Elementos intervinientes en el proceso de serigrafía

La definición más básica de la impresión por serigrafía es transferir tinta de forma controlada a través de las aberturas de una malla preparada con un patrón y depositarlo en un material base, para ello requiere un conjunto de componentes como se muestra en la Figura 10 (Faine, 1991).

Figura 10

Elementos básicos del proceso serigráfico



Como se observa en la Figura 10, este proceso se logra mediante una escobilla o rastrillo de goma flexible, al presionarla con la pantalla deforma esta hacia abajo para que entre en contacto con el material base. Al hacerlo así, y con movimientos de avance permite la deposición de la tinta en las aberturas de la malla empujando el excedente delante del rastrillo y despegando dinámicamente la pantalla del material base a cierta distancia detrás de la escobilla. Tales elementos se describen a continuación:

Marco de malla

Los marcos utilizados en el proceso son principalmente fabricados en madera y perfil de aluminio y cada uno de ellos se aprovecha mejor dentro de diferentes situaciones como muestra la Tabla 3 y las dimensiones estandarizadas

toman como referencia la norma DIN teniendo variantes en las medidas si la aplicación lo requiere.

Tabla 3

Materiales habituales de marcos serigráficos

Material	Ventajas	Desventajas	Aplicación
Madera	Simple fabricación	Deformable	Impresión manual
	Peso	Durabilidad	Baja producción
	Costos	Dimensiones	
Aluminio	Resistente	Costos	Impresión mecánica y manual
	Rígido		Alta producción
	Dimensiones		

Nota. Las conclusiones descritas son un resumen de los artículos webs proporcionados por: (Macrokun, Screen printing supplier, 2020) (Catspit, 2021).

Malla serigráfica

En condiciones de alta producción se manejan mallas de dos tipos de materiales que son el poliéster y el nylon, estas se caracterizan por su resistencia a productos químicos además sus propiedades físicas le confieren la capacidad de resistir cargas de presión sin sufrir deformaciones que afecten la calidad de impresión (Macrokun, Screen printing supplier, 2020).

Considerando la aplicabilidad, las mallas de poliéster son ideales para trabajos que requieran una alta precisión perdiendo la misma con el tiempo debido a efectos de estiramiento por la disminución de la tensión de las fibras, en cambio al usar las mallas de nylon se tiene la ventaja de un bajo nivel de absorción de

humedad dándole el beneficio de mantener sus propiedades resistivas (Macrokun, Screen printing supplier, 2020).

Para elegir el tipo de malla correcto se considera la calidad y resolución del diseño que se quiere revelar sobre la misma, es por lo que los fabricantes de mallas los han clasificado según una numeración que indica el número de hilos por unidad lineal como muestra la Tabla 4.

Tabla 4

Clasificación densidad de hilos en una malla

# hilos por centímetro lineal	Aplicación
13	Uso en tintas escarchadas
21-37	Uso en tintas de cerámica
45-61	Uso en tintas textiles a base de agua o plastisol Tintes de baja viscosidad En la creación de fondos blancos
77-100	En impresiones sobre papel, madera o cartón
120	En impresiones sobre PVC o acrílicos Mínimo recomendado para trabajos en cuatricromía
130-140	En impresiones sobre frascos de vidrio
150-165	En impresiones sobre metales En impresiones de circuitos impresos

# hilos por centímetro lineal	Aplicación
180 en adelante	Tintes UV Para tintas y barnices UV con detalles muy finos, delineados o rotulación

Nota. Valores de densidad de hilos mayormente comerciales en estándar métrico (Digital, 2016).

Rastrillo

También conocido como rasero consta de dos partes que son el mango de sujeción y el filo Figura 11, siendo este último el que está en contacto directamente con la malla serigráfica y el tinte, existen de diversas calidades, formas y tamaños pero todos comparten el material base de fabricación que es el caucho natural debido a su alta resistencia a los solventes, su dureza y flexibilidad (Anatol, 2017).

Figura 11

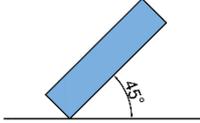
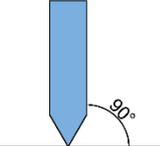
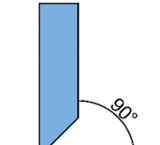
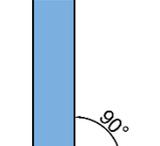
Rastrillo de goma con mango de madera



Nota. Los rastrillos de goma se caracterizan principalmente por su dureza, siendo 70 Shore A la óptima para el uso en serigrafía de globos (Anatol, 2017).

Una forma típica de seleccionar el rastrillo es por la forma de su punta ya que cada forma es fabricada para aplicaciones específicas como muestra la Tabla 5.

Tabla 5*Formas de los rastrillos*

Forma de la punta	Aplicación
Rectangular	Ángulo de aplicación de 45 °
	Para cualquier tipo de estampado en serigrafía manual
Doble bisel	Ángulo de aplicación de 90 °
	Eficaz en serigrafía manual/mecánica Útil para superficies redondeadas o cónicas
Cuña	Ángulo de aplicación de 90 °
	Eficaz en serigrafía manual/mecánica Útil en serigrafía textil
Media luna	Ángulo de aplicación es indiferente
	Eficaz en serigrafía mecánica Permite generar efectos de alto relieve

Nota. Fuente: (WebPin, 2019).

Tintas para globos

Una tinta especializada en serigrafía se caracteriza por su alto nivel de adhesión al material base, una viscosidad relativamente alta a tal punto que pueda

atravesar la malla y su velocidad de secado, en la impresión sobre globos prima las tintas a base de solventes dada su capacidad de adhesión en materiales como el PVC, vidrio, metales, látex y su capacidad elástica y alta resistencia al desgaste una vez seco, siendo esta última característica rápida y a temperatura ambiente (Druckfarben, 2021).

Como su nombre lo indica en sus pigmentos se encuentran disueltos disolventes orgánicos no polares como las bencinas (Croma, 2020), además de contener resinas, colorantes insolubles y aditivos que gracias a ellos confiere propiedades de tenacidad, adherencia, opacidad de coloración, solidez a la luz, resistencia a la intemperie o agentes químicos, durabilidad, viscosidad entre otros (Fuerte, Herrera, & Vera, 2005), finalmente dado un material específico existe una numeración o serie de identificación de la tinta para cada material, en nuestro caso se usa la serie PC para globos de látex.

Estudios relacionados a la serigrafía

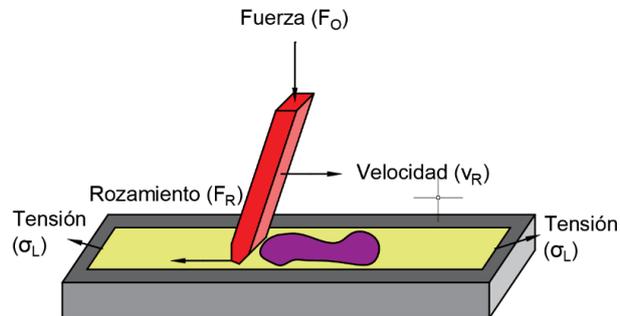
Los estudios que se mencionan a continuación describen mediciones de parámetros que intervienen en el proceso de serigrafía, dichos parámetros serán la base para el desarrollo del proyecto en cuestión.

Parámetro fuerza de aplicación en el rastrillo

El estudio "Study of screen-printing application control variables and their influence on shades in tile" (Martí, Peñalver, & Portolés) mide las interacciones de las variables de control temperatura, velocidad, fuerza media de aplicación, viscosidad, entre otros y de cierta manera trata de predecir el comportamiento de dichas variables, la Figura 12 muestra un esquema general del montaje experimental utilizado.

Figura 12

Parámetros de estudio experimental serigráfico



Nota. Corresponde a un esquema de los parámetros que intervinieron en los estudios que se detallan a continuación.

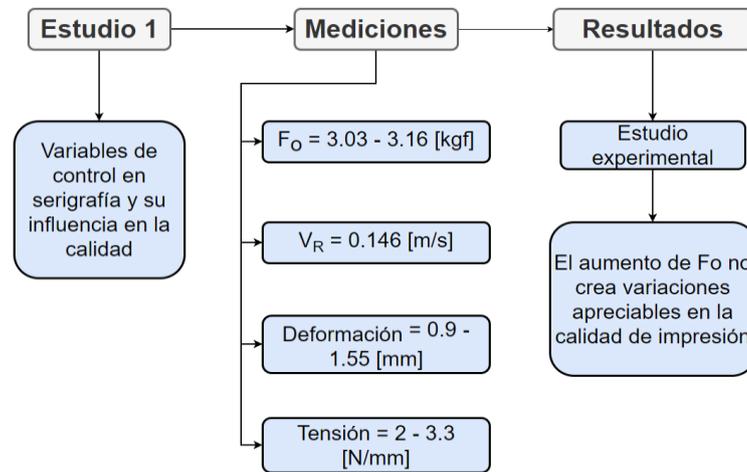
Para dicha experimentación toma como referencia los siguientes parámetros:

- Viscosidad del tinte: 506 – 880 [cP] reología no newtoniana (serigrafía)
- Dureza nominal del rastrillo de goma: 70 – 80 [shore A] (estándar)
- Tensión de la tela: 2 – 3.3 [N/mm]
- Dimensiones de impresión: 3 x 3 [cm] con una malla de 77 [h/cm]

Los resultados obtenidos indican que la fuerza óptima de aplicación en el rastrillo ronda entre $F_o = 3.03 - 3.16$ [kgf] para una velocidad de raseado $V_r = 146$ [mm/s] generando deformaciones en la tela $\delta = 0.9 - 1.55$ [mm], luego el aumento en la fuerza no crea variaciones en la calidad de impresión Figura 13.

Figura 13

Resumen experimental estudio 1



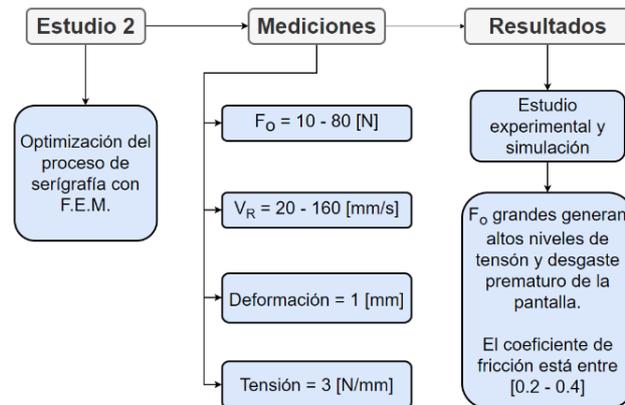
Nota: Conclusiones obtenidas del artículo “Study of screen-printing application control variables and their influence on shades in tile” (Martí, Peñalver, & Portolés)

Para complementarlo, en proyecto “Diseño y construcción de una impresora serigráfica neumática para superficies planas de funcionamiento automático” (Laguna, 2009) el autor realizó mediciones de fuerza que un operario ejerce en el rastrillo para realizar una impresión, varias mediciones dan como resultado una fuerza promedio de 7 [lbf] o 3.18 [kgf].

En un tercer estudio “Optimization of computer-aided screen printing desing” (Horvath, Torok, Ficzero, & Zador, 2014) muestra la existencia de concentradores de tensión cerca a los extremos de la malla serigráfica correspondiendo a una tensión promedio normal de 56 [MPa] al usar fuerzas cercanas a 30 [N] e incrementando aprisa la tensión al incrementar la fuerza de aplicación Figura 14.

Figura 14

Resumen experimental estudio 2

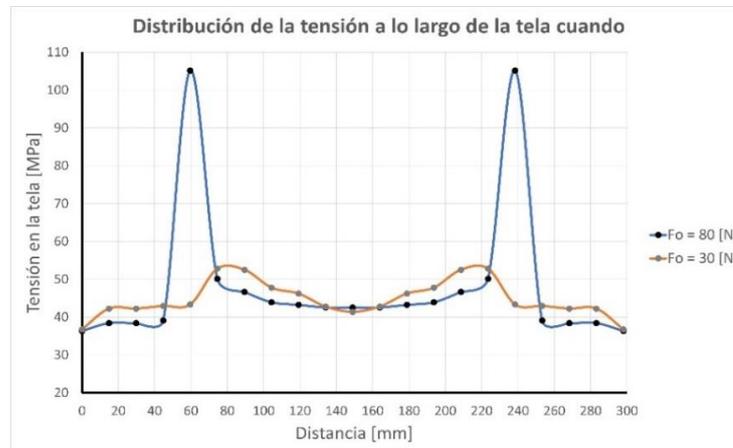


Nota. Conclusiones obtenidas del artículo “Optimization of computer-aided screen printing desing” (Horvath, Torok, Ficzero, & Zador , 2014).

Los picos altos de tensión presentes en la Figura 15 generan daños en los filamentos de la tela Figura 16 y en el filo del rastrillo, reduciendo su vida útil rápidamente, se observa también que la tensión se normaliza en las zonas cercanas al centro de la malla, finalmente todos estos resultados permiten definir los parámetros para la selección del actuador que genere dicha fuerza.

Figura 15

Efectos de la tensión en la tela debido a la fuerza de raseado



Nota. La figura implica que el uso de fuerzas de raseado bajas generan una normalización en la tensión de los extremos de la tela alargando la vida útil de la misma como del rastrillo (Horvath, Torok, Ficzer, & Zador , 2014).

Figura 16

Efectos del uso de altas fuerzas de raseado



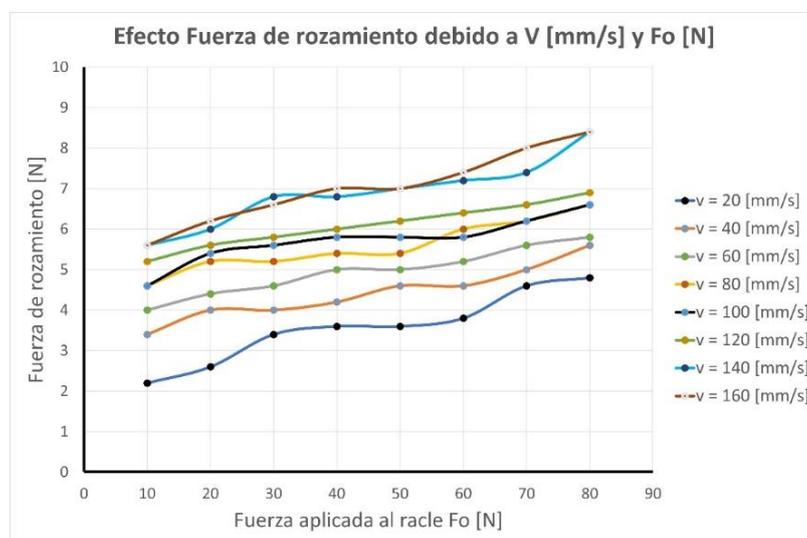
Nota. El daño más usual debido al uso de altas fuerzas de raseado es el desgaste de los filamentos del rastrillo debilitando los extremos de la tela y distorsionando la imagen impresa (Horvath, Torok, Ficzer, & Zador , 2014).

Parámetro rozamiento debido a la velocidad del rastrillo

En el estudio “Optimization of computer-aided screen printing design” (Horvath, Torok, Ficzere, & Zador , 2014) muestra los efectos de la velocidad de raseado en conjunto con la fuerza de aplicación usada en el rozamiento como muestra la Figura 17.

Figura 17

Fuerza de rozamientos debido a la fuerza de raseado y velocidad

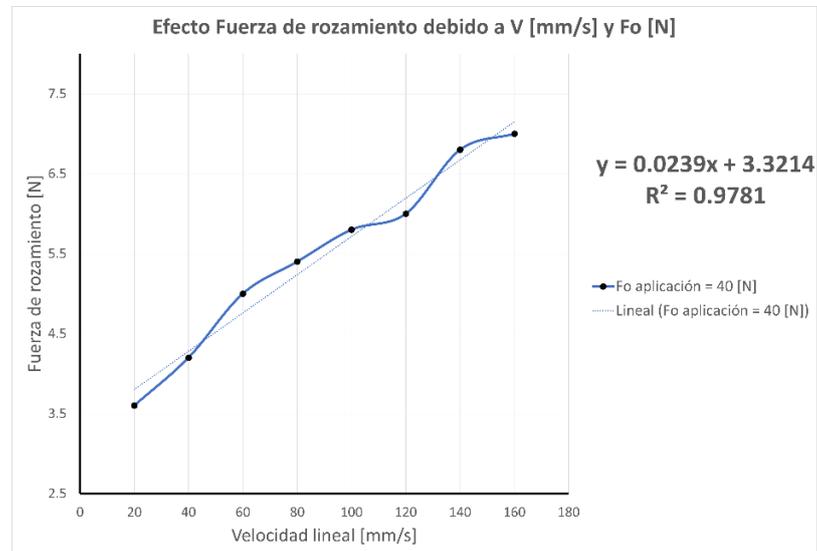


Nota. Aun cuando las cargas debido a la fuerza de raseado son “altas” las fuerzas de rozamiento no crecen de la misma manera, los datos fueron obtenidos del estudio realizado por los autores (Horvath, Torok, Ficzere, & Zador , 2014).

En la Figura 17 se observan incrementos de la fuerza de rozamiento al incrementarse la fuerza de aplicación en conjunto con la velocidad de raseado, pese a ello los efectos de rozamiento son bajos respecto a la fuerza aplicada y esto es debido a la tinta, que al aplicarse genera una película donde el rozamiento es bajo. De la Figura 17 podemos extrapolar datos considerando una fuerza de aplicación fija de $F_o = 40[N]$ obteniendo el resultado de la Figura 18.

Figura 18

Estimación de la fuerza de rozamiento debido a la velocidad



Nota. Esta estimación considera una fuerza de raseado de 40 [N] resultando en un comportamiento lineal, útil para extrapolar datos para próximos diseños.

Aproximando los datos a una ecuación de una línea recta se obtiene:

$$F_r(v) [N] = 0.0239v [mm/s] + 3.3214, \quad \text{para } v \geq 20[mm/s] \quad R^2 = 0.978$$

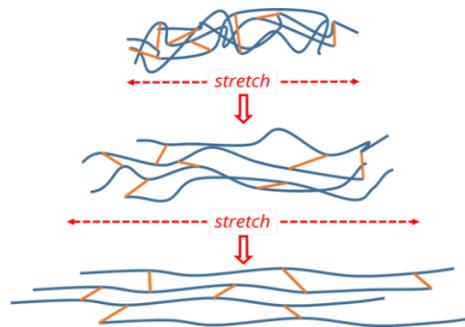
Ecuación que nos permitirá predecir la fuerza de rozamiento aplicada del actuador que genere el movimiento de raseado y poder seleccionarlo.

Características de la materia prima globo de látex

El globo está fabricado en látex de goma, específicamente y como muestra la Figura 19 es un polímero que consta de largas cadenas unidas entre sí formando estructuras reticuladas en múltiples direcciones a lo largo de la cadena, en su estado natural estas cadenas se enredan entre sí de manera aleatoria, en cambio al momento de estirar este material las cadenas se enderezan y se alinean creando un sistema más ordenado pero perdiendo propiedades elásticas (Will, Raphael, & Gareth Jones, 2021).

Figura 19

Comportamiento de las fibras del globo de látex al estiramiento

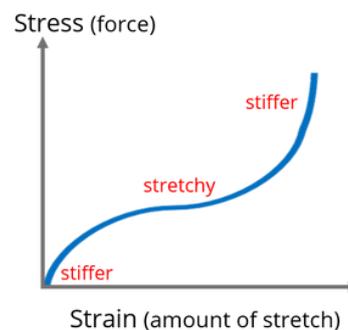


Nota. Las cadenas de polímeros le confieren la propiedad de estiramiento siendo el máximo cuando estas se encuentran completamente estiradas mostrando un comportamiento rígido (Will, Raphael, & Gareth Jones, 2021).

Esta condición no puede ser determinada según la ley de Hooke, es decir que su elasticidad cambia a medida que se estira, “*El gráfico de la tensión vs deformación unitaria muestra una región empinada inicial, donde el caucho es más rígido, una región media donde el material es más fácil de estirar, y luego otra región empinada*” (Will, Raphael, & Gareth Jones, 2021).

Figura 20

Comportamiento del esfuerzo-deformación del globo de látex



Nota. Tomado de “The Science of Balloons Part 1: Under Pressure” – Department of Mathematics University of Manchester (Will, Raphael, & Gareth Jones, 2021).

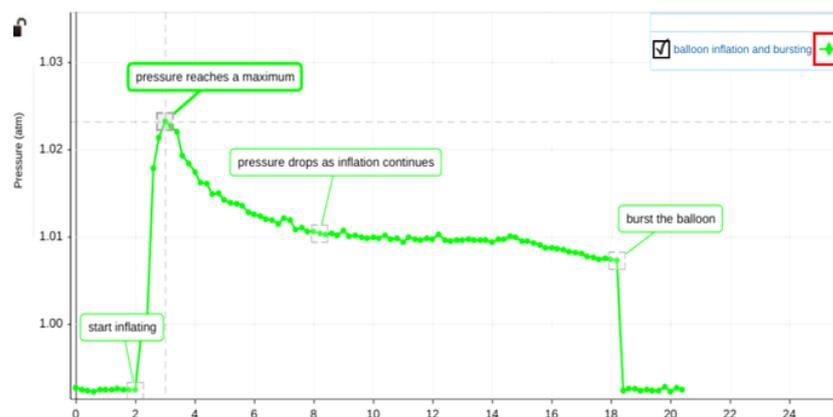
Propiedad de inflado

En los estudios “The pressure for a rubber balloon” (Merritt, 1978), “Ballons revisited” (Jeskova, 2012) y “On the inflating of ballons” (Stein, 1958) muestran la variación de la presión interna durante el proceso de inflado y como debido al material de construcción presenta variaciones de presión dando como resultado una curva característica como muestra el siguiente modelo con su representación gráfica Figura 21.

$$\Delta P(r) = \frac{C}{r_0^2 r} \left[1 - \left(\frac{r_0}{r} \right)^6 \right]$$

Figura 21

Cambio de la presión interna frente al cambio del diámetro del globo

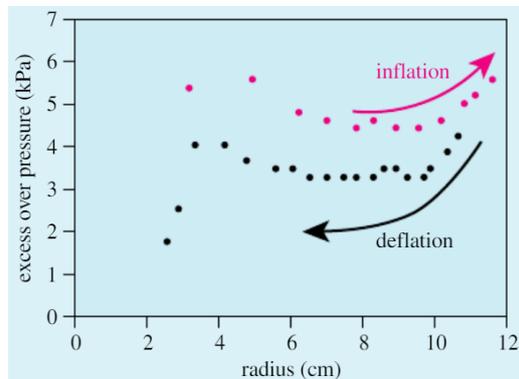


Nota. Se observa un pico en la presión interna pues esta debe ser lo suficientemente alta para romper el desorden de las cadenas de polímeros e iniciar el ciclo de ordenamiento (estiramiento del globo), grafico obtenido de (Will, Raphael, & Gareth Jones, 2021).

En los estudios mencionados se detalla que debido al material y a las interacciones resultado del movimiento browniano de las cadenas de polímeros el globo pierde las propiedades iniciales de elasticidad creando una curva de histéresis Figura 22 al momento de la salida del aire.

Figura 22

Efecto de histéresis del inflado y desinflado del globo



Nota. Durante el desinflado las cadenas de polímeros regresan a un desordenamiento quedando residuos de ordenamiento de cadenas generando un efecto de histéresis, gráfico obtenido de (Jeskova, 2012).

Causando como muestra la Figura 23 deformidades en la geometría del globo en su estado normal.

Figura 23

Efectos del constante inflado/desinflado de un globo de látex



Nota. El efecto principal es un incremento de las dimensiones del globo como se observa en la muestra de la derecha.

Características

- Tamaños: 2, 5, 7, 9, 12, 18, 36 [in] de diámetro

- Porcentaje de látex natural: 100% globos biodegradables
- Tiempo de degradación: entre seis meses hasta dos años en desgradarse al contacto con la luz solar
- Antibacteriano y fungicida natural ya que sus sustratos evitan el crecimiento de estos organismos
- Más costoso que el globo de látex sintético, aun así, tiene una calidad superior

Caracterización del proceso en la empresa

- Proceso objetivo: Impresión serigráfica sobre globos
- Alcance
 - Estación de impresión única y manual
 - Monocolor
 - Sobre globos N.º 12
- Encargado del proceso
 - Un operario por estación
 - Una obrero encargado de recoger el globo recién impreso para llevarlo a secado.
- Entradas del proceso
 - Materia prima: globo N.º 12
 - Marco serigráfico 50x40 [cm]
 - Malla serigráfica con imagen revelada
- Definición de etapas del proceso

- Inflado del globo
 - El globo se infla hasta un 70% de su capacidad máxima
- Posicionamiento del globo
 - La estación de serigrafía tiene una base específica para retener el globo y evitar movimientos durante la impresión
- Incorporación del tinte
 - El tinte es esparcido por toda la malla antes del raseado
- Raseado
 - Se requieren por lo menos tres pasadas
- Secado
 - El tiempo de secado promedio es de dos minutos a temperatura ambiente.
- Salida del proceso
 - N cantidad de globos impresos empacados
- Recursos
 - Tintas de impresión serigráfica a base de solventes serie PC
 - Rastrillo de goma flexible rojo
 - Recurso humano capacitado
- Requisitos
 - Inflado del globo al 70% de su capacidad total
- Seguimiento y control

- Documentación de cantidad de globos realizados y del tiempo de consumido

Definición de pruebas para la medición de la productividad en el contexto OEE

Una empresa que dispone de máquinas y requiere conocer su nivel de productividad necesita hacer el cálculo OEE de producción real de máquina considerando tres factores fundamentales de la producción:

- Calidad: considera bueno un bajo nivel de piezas defectuosas
- Rendimiento: considera a la velocidad de producción que maneja
- Disponibilidad: considera el tiempo de uso de las máquinas

“El OEE (Overall Equipment Effectiveness) o Eficiencia General de los Equipos, consiste en un porcentaje que permite medir la eficiencia productiva de la máquina” (doeet, 2021) que engloba tres parámetros de producción fundamentales: Calidad, Rendimiento y Disponibilidad, y así conocer el nivel de productividad que puede ofrecer la máquina al mismo tiempo que advierte el parámetro a mejorar.

Cada parámetro se mide como una razón, como se describe a continuación

Calidad

Para calcular este parámetro se resta las unidades defectuosas o perdidas en tiempo de producción del total fabricado, también se puede incluir unidades reprocesadas y este valor se divide para la cantidad total de producción.

$$Calidad = \frac{Producción\ total - Pérdidas}{Producción\ total} \times 100\%$$

Rendimiento

También conocido como Eficiencia se puede medir al dividir la cantidad de unidades realmente producidas para la cantidad de piezas que se esperaban

producir, esta última se puede calcular multiplicando el tiempo de producción por la capacidad de producción.

$$\text{Rendimiento} = \frac{\text{Producción real}}{\text{Producción esperada}} \times 100\%$$

Disponibilidad

Este parámetro se obtiene al dividir el tiempo que ha estado produciendo la máquina para el tiempo en que la máquina haber producido y esto es el resultado del tiempo total de producción menos los periodos de paradas.

$$\text{Disponibilidad} = \frac{\text{Tiempo de operación}}{\text{Tiempo planificado de Producción}} \times 100\%$$

Resultados esperados

Al multiplicar el resultado de los tres parámetros obtenemos un resultado que engloba el nivel de productividad que manifiesta la máquina en la empresa, y permitirá tomar decisiones adecuadas si algún parámetro rinde poco.

Consideraciones en el diseño del proyecto

Selección de cilindros

- “La fuerza del cilindro es una función de su diámetro, presión del aire, rozamientos con el émbolo que depende de la velocidad de este, además de fuerzas o mecanismos que interactúen con el mismo” (Solé, 2007).
- “El rozamiento del pistón en su movimiento equivale a un valor comprendido entre el 3% y el 10% del valor de la fuerza calculada” (Solé, 2007).
- En términos de diseño se aplica un factor $f_d = 2$ aplicado a la carga útil (Renedo, 2012).
- La carga útil considerada es la masa por desplazar añadiendo fuerzas intervinientes y pertinentes a estudios anteriores.

- Por tanto, el diámetro del pistón queda definido de la siguiente manera:

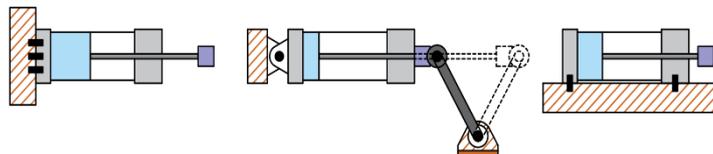
$$\phi_p [mm] = \sqrt{\frac{4 f_d \Sigma F}{\pi 0.6 [N/mm^2]}}$$

Carga crítica de pandeo

- La fuerza de carga es dependiente del tipo de montaje del cilindro, siendo tres:
 - Grupo 1: Montaje fijo, la línea central del cilindro absorbe las fuerzas
 - Grupo 2: Montaje donde se requiere un movimiento curvilíneo
 - Grupo 3: Montaje en que las fuerzas no coinciden con la línea central

Figura 24

Tipos de montaje de cilindros neumáticos



Nota. El tipo de montaje definirá el factor de pandeo como muestra la Figura 25.

- Debido a la proporción entre el diámetro del vástago y su longitud, existe riesgo de pandeo debido a cargas compresivas, para calcularlo se usa la fórmula de Euler

$$Carga_{critica} = \pi^2 E \frac{I}{(f_p * L_{vástago})^2}$$

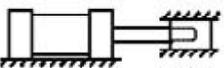
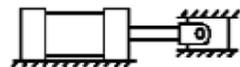
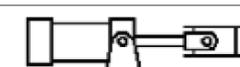
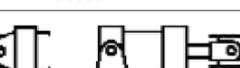
- El diámetro del vástago equivaldrá al 30% del diámetro del pistón.
- Considerar también el factor de pandeo debido al montaje Figura 25.
- El factor de diseño utilizado $f_{dv} = 4$.

- Si el material del vástago es algún tipo de acero $E = 2 \times 10^5 [N/mm^2]$
- Se define al diámetro del vástago como:

$$\phi_v \geq \sqrt[4]{\frac{\sum F (f_p * L_{vástago})^2}{24223.65}}$$

Figura 25

Factor de montaje de cilindros neumáticos

Tipos de montaje	Conexión del extremo del vástago	Tipo de conexión	Factor de pandeo
Grupos 1 o 3 - Los cilindros de gran longitud de carrera deben montarse usando en un extremo una base rígida y alineada para soportar la fuerza principal y en el extremo opuesto un soporte parecido. Se aconseja un soporte intermedio para el caso de carreras muy largas	Fijo y guiado rígido	I 	0,5
	Pivote y guiado rígido	II 	0,7
	Soporte sin guiado rígido	III 	2
Grupo 2	Pivote y guiado rígido	IV 	1
	Pivote y guiado rígido	V 	1,5
	Pivote y guiado rígido	VI 	2

Nota. El tipo de montaje define un factor de pandeo siendo mejores factores de los grupos 1 y 3 tomado del libro Tecnología Neumática Industrial (Hannifin, 2003).

Selección de válvulas neumáticas

Una válvula se selecciona por su capacidad de caudal, siendo el actuador el elemento que consume el aire comprimido este definirá que caudal requiere para ser accionado, dado ese parámetro la capacidad de caudal de la válvula debe superar las necesidades del actuador.

En términos dimensionales la capacidad de caudal posee las siguientes unidades:

$$C_v \left[\frac{gal}{min} \right] = 1.16 K_v \left[\frac{m^3}{s} \right]$$

Consumo de aire

El consumo del aire en un cilindro neumático indica la cantidad de aire a presión necesaria para su manejo, considerando un ciclo de trabajo con el desplazamiento tanto de ida como de retorno y es función de la relación de compresión, de la carrera y del área del pistón como se muestra en la ecuación.

$$\text{Consumo de aire} = \text{Relación de compresión} * \text{Área del pistón} * \text{carrera} * \frac{\text{ciclos}}{\text{minuto}}$$

$$\text{Relación de compresión } R_c = \frac{0.987 + P_{aire} [bar]}{0.987}$$

Considerando un cilindro neumático de doble efecto en condiciones normales de presión y temperatura tenemos la siguiente expresión:

$$Q = 2 * \frac{0.987 + P_{aire} [bar]}{0.987} * \frac{\pi D^2 L}{4000000} * n$$

Donde:

- Q : Consumo total de aire [dm^3/min]
- D : Diámetro del cilindro [mm]
- L : Carrera [mm]
- n : Ciclos por minuto [min^{-1}]

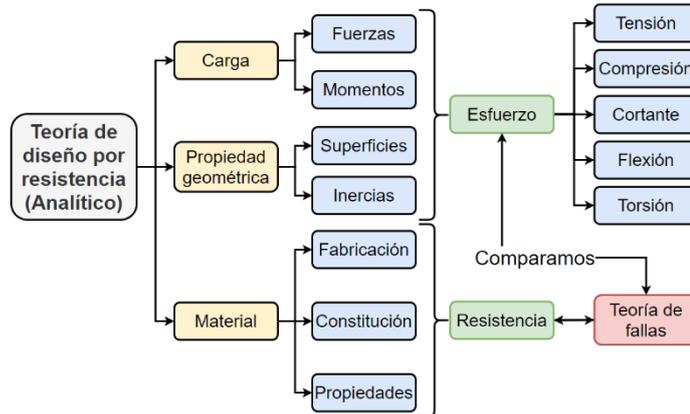
Esquema resumen del diseño mecánico

En términos de resistencia mecánica, un diseño debe ajustarse al esfuerzo que va a estar sometido a efecto de una carga de tal forma que la resistencia del material constitutivo exceda al esfuerzo por un margen suficiente y no falle (Budynas & Nisbett, 2008).

Siendo la resistencia una propiedad inherente de cada material o de un elemento mecánico depende del diseñador seleccionar el material adecuado considerando sus condiciones químicas, procesos de fabricación, tratamientos, etc.

Figura 26

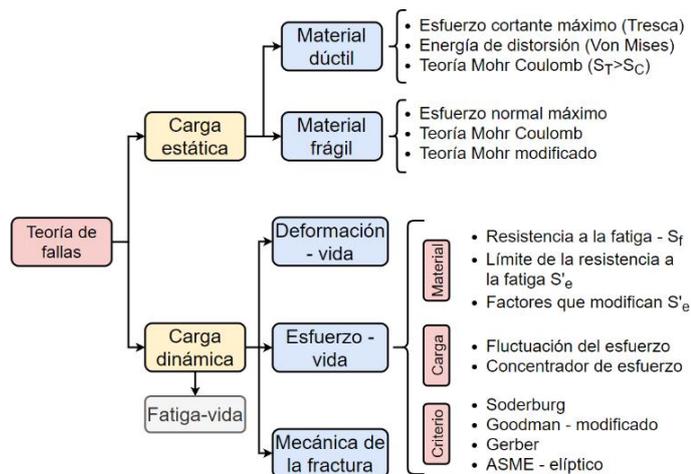
Esquema de los elementos del diseño por resistencia mecánica



Nota. Servirá de guía para decidir qué parámetros intervendrán durante el diseño mecánico que se presentará más adelante.

Figura 27

Esquema de los elementos de la teoría de fallas



Nota. Permitirá tener una idea de la confiabilidad del diseño geométrico frente a las cargas que interactúan con este.

Estabilidad elástica en estructuras y análisis estructural por elementos finitos

“Las cargas y los esfuerzos compresivos dentro de cualquier estructura larga y delgada pueden provocar inestabilidades estructurales (pandeo)” (Budynas & Nisbett, 2008) esto implica que un esfuerzo compresivo puede crear una inestabilidad local o global, siendo locales puede crear deformaciones permanentes provocando falla de funcionamiento y siendo globales las fallas pueden ser hasta catastróficas.

Debido a la variedad de comportamientos estructurales inestables, al amplio rango de aplicaciones y a la complejidad de análisis, el diseñador puede necesitar del cálculo numérico como es el caso de los elementos finitos y realizar un análisis que determine la carga crítica (Budynas & Nisbett, 2008).

El método de elementos finitos es una simulación numérica englobado dentro de un proceso macro como herramienta de creación de prototipos digitales optimizando tiempos de desarrollo y es flexible pues nos permite:

- Explorar opciones de diseño al inicio del ciclo de diseño
- Predecir el rendimiento del producto antes de crearlos
- Validar los diseños al predecir posibles fallas de campo
- Desarrollo de nuevos conceptos e innovadores

Los parámetros principales que rigen una buena estructuración del mallado en elementos finitos son el aspecto ratio, skewness y el jacobiano, siendo la primera una relación entre los lados del elemento más largo y el más corto cuyo valor aceptable es 1:3 (iberisa, s.f.), el segundo parámetro mide las desviación angular en la forma de un elemento finito y la medición de esta asimetría resulta del menor ángulo formado por el ortocentro restado de 90° y que debe ser menor o igual a 30° .

Finalmente, el jacobiano se utiliza como una medida general de distorsión y representa cuan deformado están los elementos de su forma ideal al momento de adaptarse a geometrías complejas (AraWorks, 2021) cuyo valor varía entre $[-1,1]$ donde 1 indica una forma ideal, tendiendo a 0 a medida que se distorsiona el elemento y tendiendo a -1 si el elemento se vuelve cóncavo (López, 2019).

Capítulo III

Diseño

Requerimientos de la empresa auspiciante

El proceso de serigrafía en los globos de látex dentro de las instalaciones de Grupo SIBELL se realiza de manera manual, la producción es muy dependiente de la habilidad del operario que realiza el trabajo y los tiempos son relativamente altos, por lo que al implementar un sistema semiautomático se espera una mejora de los tiempos de producción.

La producción en cuestión es la serigrafía en globos N.º 12 (número que indica el diámetro máximo en pulgadas que puede alcanzar) cuya medida estándar es utilizada en la totalidad de pedidos respecto a este tipo de materia prima, con impresiones que tienen dimensiones máximas de 20 [cm] x 26 [cm] en ancho y largo.

En la Tabla 1 se observó que la etapa que mayormente puede ser tecnificada y automatizada es del ítem número 8, para ello el equipo técnico de la empresa ha refinado sus necesidades ajustándose a los parámetros generales de producción, costo, calidad, servicio todo ello para ser un diferenciador respecto a la cantidad de producción.

A continuación, se detallan las necesidades de la empresa para el desarrollo de la máquina:

- Número máximo de operadores en la máquina: 2
- Espacio dedicado a la máquina máximo: 1.5 [m] x 1.5 [m] en ancho y largo.
- Admita marcos serigráficos de 40[cm] x 50 [cm]
- Impresión de tipo monocolor (estación de impresión única)
- Velocidad de producción que presente una mejora de por lo menos un 50% ítem 8 de la Tabla 1 esto es 3 [unidades/min].

- Presupuesto máximo manejable: 1000\$
- Configuración para el ingreso de al menos 2 globos
- Incluir sistemas de conteo de producción, paro de emergencia, medición de tiempo de raseado y control de tiempo de inflado.
- El nivel de automatización requerido implica que el operador únicamente tenga que ingresar la materia prima y extraer el producto procesado, incluido el manejo de un panel de control.

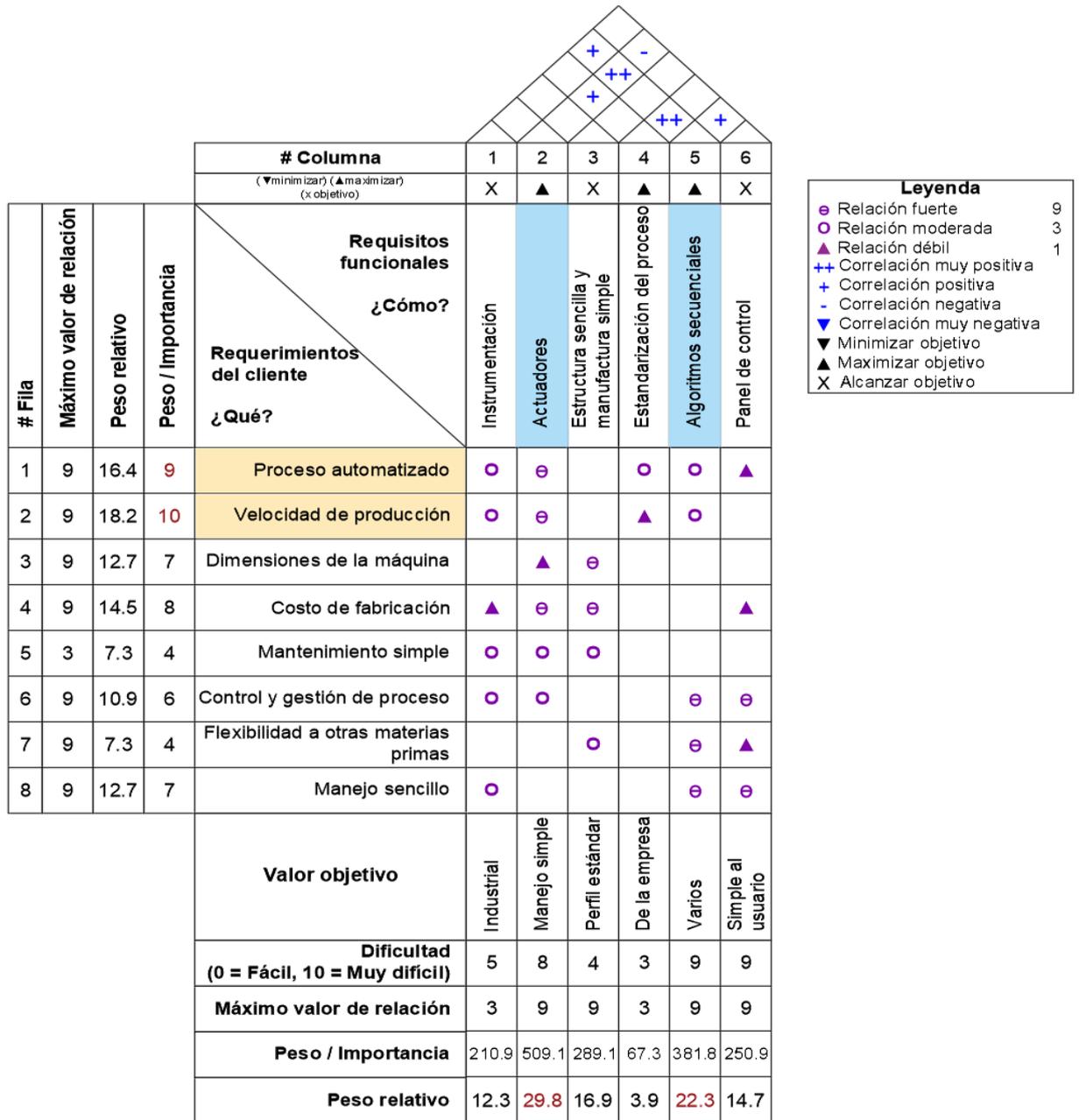
Despliegue de la función de la calidad

Todas estas necesidades son una visión objetiva de lo que busca el equipo técnico, sin embargo, son características que requieren ser valoradas por su nivel de importancia, disponibilidad tecnológica y costos, además requieren ser traducidas a especificaciones de diseño técnico y garantizar que estas satisfagan las necesidades de la empresa.

Para ello se usará el Despliegue de la Función de la Calidad - QFD, herramienta que permitirá enfocarse en las necesidades y expectativas de la empresa auspiciante a la vez que analiza diseños y características que ofrecen máquinas similares para dar con la mejor solución posible para la empresa, estos resultados se detallan en la Figura 28.

Figura 28

QFD SIBELL



Resultados: En el diagrama QFD de la Figura 28 se observa que la empresa prioriza la velocidad de producción y la automatización del proceso nivel de requerimientos, en términos generales el nivel de automatización que se incorpore al proceso y la velocidad de producción que son requerimientos que pueden ser

relacionados entre sí, hay que considerar la limitante de la inversión pues resulta el tercer ítem de importancia para la empresa.

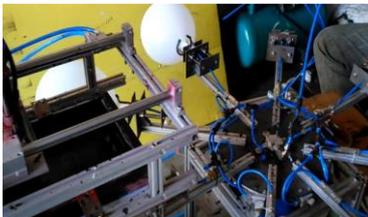
Como aportes de solución en términos generales se plantean tres que destacan en el estudio del diagrama QFD, entre ellos están el uso de actuadores, el desarrollo de un algoritmo para el control secuencial del proceso, la forma estructural de la máquina sencilla con procesos de manufactura simples, todos estos aportes están muy relacionados con los requerimientos más relevantes de la empresa auspiciante y permitirá estudiar alternativas de máquinas que se encuentren en el mercado y que servirán de base para definir la arquitectura de la máquina.

Investigación de alternativas

Algunas máquinas comerciales que cumplen con las características que busca la empresa se muestran en la siguiente Tabla 6.

Tabla 6

Alternativas viables de máquinas serigráficas

Máquina	Características	Valor
Ballon printing machine – Indiamart 	Velocidad de producción	4 [u/min]
	Dimensiones	0.8x1.6x1.9 [m]
	Área de impresión	40 x 50 [cm]
	Tecnología	Neumática y lógica cableada
	Cantidad de operarios	2 (imprescindibles)
	Funcionamiento	Ciclo continuo sin algún tipo de control por parte del usuario
	Precio	1600 [\$]
	Velocidad de producción	5 [u/min]

Máquina	Características	Valor
Automatic screen-printing machine GW-BL-4 	Dimensiones	1.0x0.88x1.2 [m]
	Área de impresión	40 x 50 [cm]
	Tecnología	Electroneumática
	Cantidad de operarios	1
	Funcionamiento	Flexible en el control de algunos parámetros de funcionamiento
	Precio	3 500 [\$]
Máquina	Características	Valor
Automatic screen-printing machine GW-BL-2 	Velocidad de producción	2 [u/min]
	Dimensiones	0.44x0.88x1.0 [m]
	Área de impresión	25 x 30 [cm]
	Tecnología	Electroneumática
	Cantidad de operarios	1 (mínimo)
	Funcionamiento	Flexible en el control de algunos parámetros de funcionamiento
Precio	2600 [\$]	

Nota. De las alternativas investigadas se tomarán las mejores características que permitirán desarrollar la arquitectura de la máquina, la información detallada de las máquinas se encuentra en (Hoystar, 2021) y (DirectIndustry, 2021).

De las máquinas investigadas en la Tabla 6 podemos obtener información útil como la forma geométrica de la estructura por ejemplo las alternativas 1 y 2 muestran que la materia prima rota durante el proceso admitiendo mayor cantidad y paralelizando el proceso mejorando así la producción, las alternativas 2 y 3

muestran que el uso de componentes electromecánicos y un panel de control mejora la velocidad de producción y disminuye la cantidad de operarios, pero incrementa en el precio.

Las tres alternativas muestran actuadores que generan movimientos lineales para el proceso de impresión, además todas ellas inflan al globo automáticamente, la primera y segunda alternativa lo hacen durante el proceso mientras que la última se tiene una boquilla externa para inflarlo.

Con las observaciones realizadas se puede describir a la máquina que se va a desarrollar tomando sus mejores características para así definir su arquitectura.

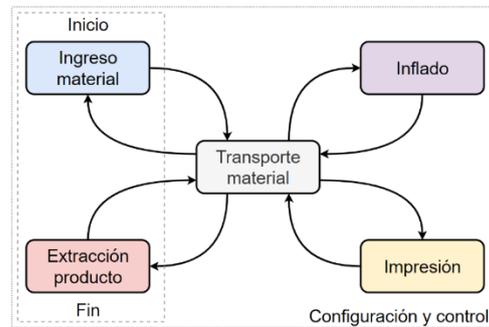
Arquitectura de la máquina

De manera general, una máquina alberga un grupo de sistemas que trabajan en conjunto para dar un valor agregado a una materia prima y generar un producto requerido, en nuestro caso la materia prima es el globo de látex natural y el valor agregado es el proceso de impresión por serigrafía.

En ese sentido el desarrollo de la máquina de impresión serigráfica converge en un conjunto de sistemas en el que cada uno de ellos resuelve una parte del proceso en general; como se describió en la Figura 6 del Capítulo I, la Tabla 1 y la Tabla 6 la máquina se limitará a los procesos que trabajan directamente con la materia prima, como muestra la Figura 29 en el que se aprecia que se divide en cinco secciones.

Figura 29

Diagrama de flujo de las secciones del proceso serigráfico



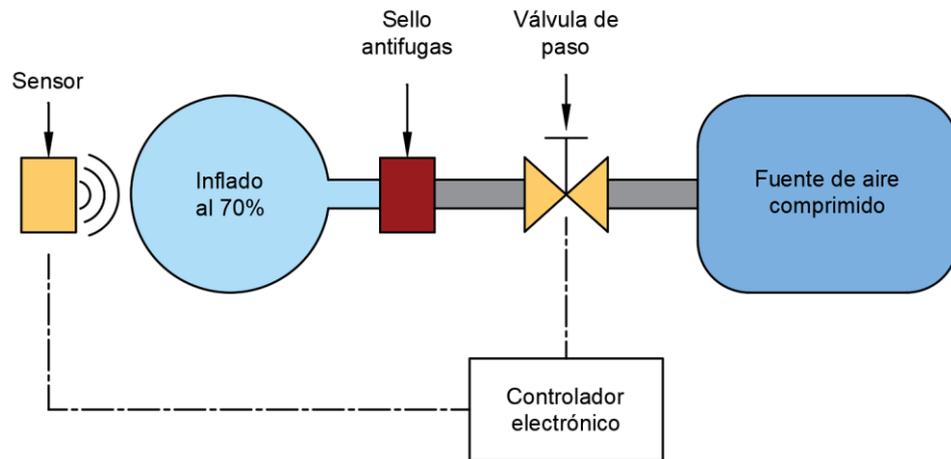
Nota. Cada sección interactúa con el transporte material.

Sección 1 Ingreso material, extracción producto e inflado

- Retiene el globo al momento de ser insertado.
- Fácil y rápida inserción del globo de manera manual
- Mantiene un sellado con la boquilla del globo para que no se escape el aire.
- Mantiene fijo al globo durante el transporte por las diferentes secciones.
- Mide la cantidad de globos extraídos posterior a su impresión.
- Detecta la presencia de un globo
- Infla al globo al 70% de su capacidad total.
- Permite el paso del flujo de aire y lo controla para que no exista un sobre inflado.

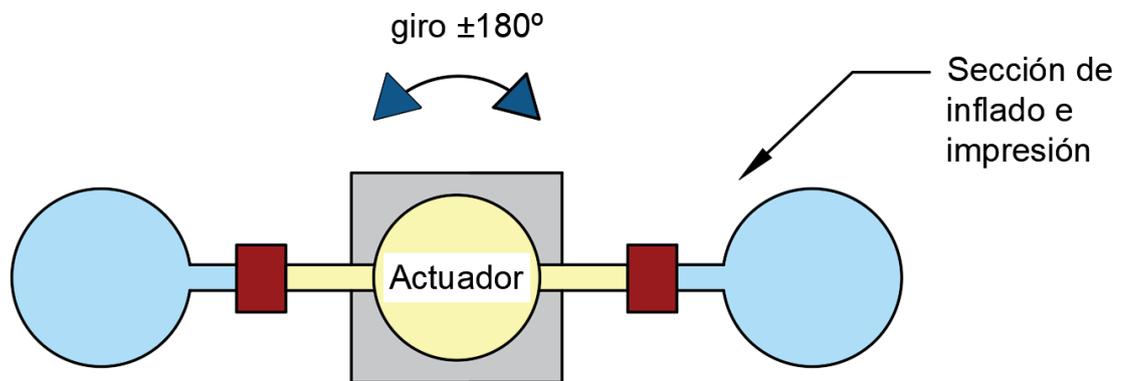
Figura 30

Esquema de la sección de ingreso/extracción e inflado

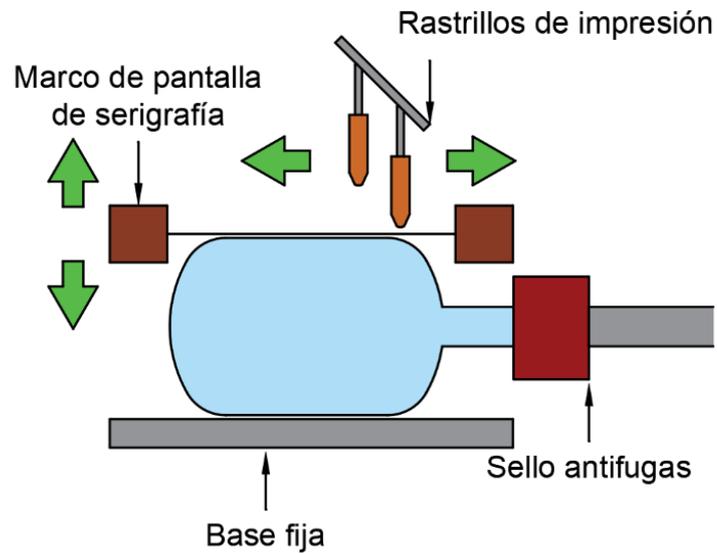


Sección 2 Transporte material

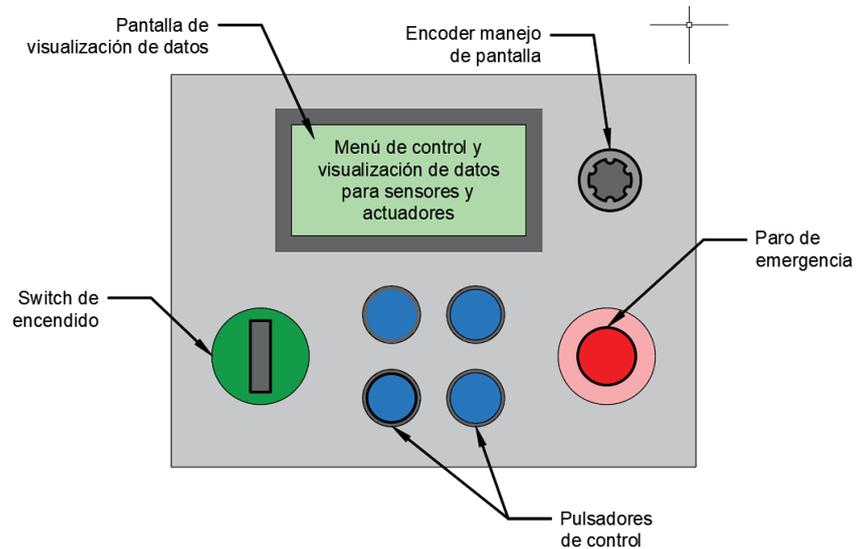
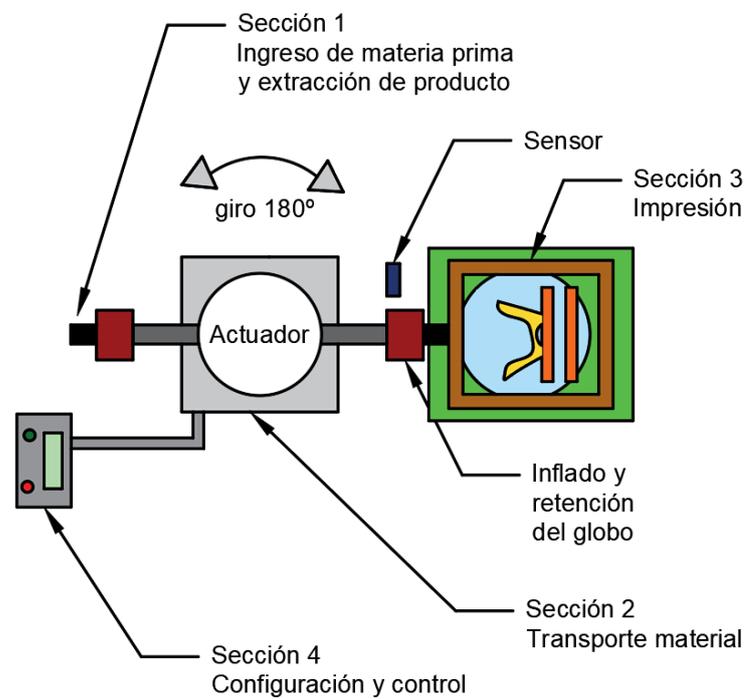
- Un actuador permite el transporte del material por las diferentes etapas del proceso.
- Genera un movimiento suave para mantener la posición del globo.
- Produce movimientos simétricos de 180 [°] horario y antihorario entre la sección de ingreso de materia prima y la sección de impresión según el tiempo de operación requerido por parte del usuario.
- La activación de los movimientos es generada tanto de manera semiautomática al accionar un pulsador del panel como automático.

Figura 31*Esquema transporte de materia prima***Sección 3 Impresión**

- En este se encuentra el marco de pantalla de serigrafía.
- Un sistema de movimiento vertical presiona al globo entre una base fija y el marco de pantalla de tal forma que genera una superficie plana.
- El aplastamiento genera una superficie plana en el globo de medidas 20 x 26 [cm] de impresión máxima.
- Con movimientos de vaivén el rastrillo transfiere la tinta a través de la tela estampando el diseño dispuesto en el marco de serigrafía.
- Todos los movimientos son automáticos y secuenciales.

Figura 32*Esquema sección de impresión***Sección 4 Configuración y control**

- Permite el control de tiempos en el transporte de material.
- Mide los tiempos que ejecutan los actuadores.
- Mantiene un control de conteo y tiempos de producción.
- Permite manejar algunos actuadores de manera manual para hacer más flexible al usuario.
- Permite el control del inicio y fin del proceso.

Figura 33*Esquema del panel de control***Figura 34***Esquema general de la máquina*

Nota. Las diferentes secciones interactúan entre sí.

Sección 1 Ingreso material, extracción producto e inflado

Como se observará posteriormente a la Sección 3 Impresión le debe llegar el globo inflado de tal manera que pueda ser deformado al momento de ser presionado y formar una superficie plana, además debe mantener en su interior el mismo volumen de aire desde el momento que fue inflado, para ello se requiere del diseño de una ranura de inserción que pueda soportar la carga ejercida por la presión interna que permita sujetar al globo de tal manera que genere una superficie impermeable con la boquilla de este.

Actuador interviniente

Considerando que el globo se infla al 70% de su capacidad máxima, es decir al alcanzar un radio de 10.25 [cm], se obtiene que el volumen de aire almacenado en su interior es:

$$V = \frac{4}{3} \pi R^3$$

$$V = 4188.79 [cc] = 4.19 [l]$$

Si se estima que el globo se infle en menos de 5 [s] se espera que ingrese un caudal de aire de:

$$Q = \frac{V}{t}$$

$$Q = 12.57 \left[\frac{lt}{min} \right] = 0.754 \left[\frac{m^3}{h} \right]$$

Algunas válvulas comerciales se describen en la Tabla 7 a continuación

Tabla 7

Electroválvulas NC para neumática

Válvula	Característica	Valor
Válvula solenoide 2/2 NC	Voltaje de trabajo [Vcc]	10
	Potencia [W]	20 (máximo)
	Nivel de protección	IP-67
	Presión de trabajo [bar]	16 (máximo)
	Conexión	1/2"
	Caudal KV [m^3/h]	1.3
	Precio [\$]	42
	Electroválvula SLC Series 2/2 NC	Voltaje de trabajo [Vcc]
	Potencia [W]	12 [W]
	Nivel de protección	No especificado
	Presión de trabajo [MPa]	0.02 – 0.8
	Conexión	1/2"
	Caudal [l/min]	9
	Precio [\$]	20
	ZE-4F180 2/2 NC	Voltaje de trabajo [Vcc]
	Potencia [W]	5
	Nivel de protección	No especificado
	Presión de trabajo [MPa]	0.02 – 0.8
	Conexión	G1/2 [in]
	Caudal [l/min]	1.5 – 20
	Precio [\$]	10

Nota. Características técnicas obtenidas de: (Vignola, s.f.) y (e-Gizmo, s.f.)

Optaremos por el tercer modelo de la Tabla 7 puesto que sus especificaciones son las suficientes para el proyecto, mencionando el principal de ellos el caudal que puede manejar que permitirá tiempos cortos de inflado del globo cuyas mediciones se realizarán una vez construido este sistema, además el voltaje de funcionamiento es compatible con las tensiones que se esperan manejar en el resto de los componentes electrónicos.

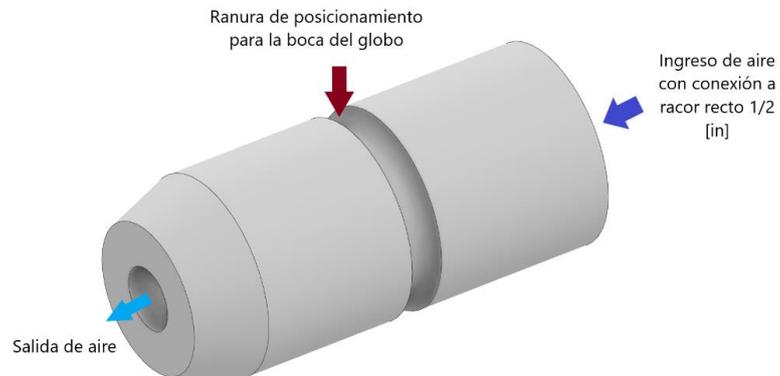
Diseño CAD boquilla de inserción

En el capítulo 1 se describe a varios estudios que permiten conocer la propiedad de deformación del material del que está fabricado el globo, esto nos permite saber que la presión interna del globo N.º 12 apenas supera 1 [atm] de presión cuando inicia el proceso de inflado, como muestra la Figura 21 el punto de trabajo será cuando el globo alcance un perímetro de circunferencia cercano a 73 [cm] o su valor en radio de 10.25 [cm] ya que en ese punto obtenemos una superficie de trabajo de máxima.

Toda la sección que corresponde al cuello y la boquilla del globo poseen las siguientes dimensiones $\emptyset 18$ [mm] de diámetro, 6 [cm] de largo y, aprovechando la alta elasticidad de la boquilla se propone el siguiente diseño.

Figura 35

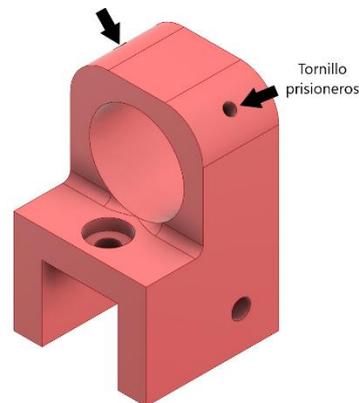
Boquilla de inserción de globos



Nota. El elemento posee una ranura diseñada para retener el globo. Software Autodesk Inventor.

La boquilla de inserción mostrada en la Figura 35, muestra una ranura en la cual se depositará la boca del globo que gracias a su elasticidad y su material base, permitirá crear un sello anti-fuga de aire, el material con el que se espera fabricar la boquilla será en duralón con el proceso de manufactura de torneado.

Dada su geometría, requiere de una base que le sirva de soporte, para ello se ha diseñado una pieza como muestra la Figura 36 la cual se inserta en entre un perfil cuadrado de acero de 20 [mm] de lado y se ajusta a la boquilla gracias al uso de tornillos prisioneros M3, dicha pieza se fabricará por medio de manufactura aditiva.

Figura 36*Base boquilla de inserción*

Nota. Los parámetros de impresión son, velocidad de cabezal: 200 [mm/s], altura de capa 0.25 [mm], diámetro de boquilla \varnothing 0.4 [mm], diámetro de filamento \varnothing 1.75 [mm] en material base PLA. Software Autodesk Inventor

Inflado del globo y detección

Para el inflado del globo se considera el flujo de aire calculado anteriormente y realizando mediciones de tiempo de inflado, esto con el fin de calibrar el programado del temporizador y es práctico pues no requiere de elementos extras, las pruebas iniciarán con un tiempo de inflado de 5 [s] que se regularán gracias a un regulador de caudal proveniente del sistema neumático.

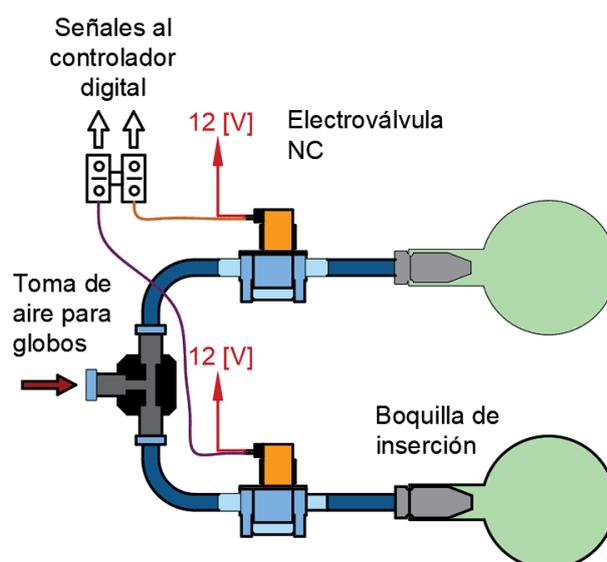
Del planteamiento anterior existe la desventaja de la incertidumbre de la existencia del globo, pues el sistema de control en principio no detectaría si el globo fue o no inflado, para ello se usará un sensor infrarrojo Figura 37 para detectar que efectivamente existe un globo al detectarlo en el punto en que el globo alcanza su diámetro máximo de inflado.

Figura 37*Sensor infrarrojo*

Nota. El sensor ya se encuentra acondicionado cuya exactitud debe ser regulada por medio de un potenciómetro, voltaje de operación 5 [V].

Esquema del circuito neumático de inflado

El diseño final de esta sección queda como muestra la Figura 38 nótese que el sistema admitirá como máximo dos globos al mismo tiempo, esto es debido a que como se observará a continuación el movimiento de rotación completa será impedido ya sea por el cableado eléctrico como el cableado neumático

Figura 38*Esquema sección de inflado por electroválvulas NC*

Sección 2 transporte material

Desde la sección 1 donde se ingresa el globo, la materia tiene que trasladarse a la sección 3, como se observa en la Figura 34 del análisis de la arquitectura de la máquina, nos resulta útil y práctico generar un transporte de material rotativo pues ocupa menos espacio ya que reduce las dimensiones de la máquina, el globo impreso llega a la posición inicial para que pueda ser extraído y existen una gran variedad de actuadores que permiten el movimiento rotativo.

Selección del tipo de actuador

En cuanto al tipo de actuador, optamos por tres opciones que se describen a continuación.

1. Motor neumático
2. Motor a pasos
3. Servo motor

Métricas de evaluación

- Costo: Siempre y cuando exista una buena relación costo/beneficio del elemento podemos elegir dicha opción.
- Sencillez de manejo: El elemento asegura una fácil implementación y manejo con respecto a las otras alternativas permitiendo un mayor grado de flexibilidad en la lógica de control.
- Precisión: Dado que la materia prima debe trasladarse generando movimientos semejantes, es primordial que la opción permita un control flexible y preciso de la posición.

Para evaluar todos estos parámetros se usará la matriz de evaluación de Holmes como muestran las Tabla 8, Tabla 9,

Tabla 10, Tabla 11, Tabla 12.

Tabla 8

Matriz evaluación de Holmes - Ponderación de parámetros

Criterio	Costo	Sencillez de manejo	Precisión	SUMA+1	Ponderación
Costo	-	1	0.5	2.50	0.42
Sencillez de manejo	0	-	0	1.00	0.17
Precisión	0.5	1	-	2.50	0.42
TOTAL				6.00	

Tabla 9

Matriz evaluación de Holmes - Parámetro Costo

Costo	Solución A	Solución B	Solución C	SUMA+1	Ponderación
Solución A	-	0	0.5	1.50	0.25
Solución B	1	-	1	3.00	0.50
Solución C	0.5	0	-	1.50	0.25
TOTAL				6.00	

Tabla 10

Matriz evaluación de Holmes - Parámetro Sencillez de manejo

Sencillez de manejo	Solución A	Solución B	Solución C	SUMA+1	Ponderación
Solución A	-	0	0	1.00	0.17
Solución B	1	-	0	2.00	0.33
Solución C	1	1	-	3.00	0.50
TOTAL				6.00	

Tabla 11*Matriz evaluación de Holmes - Parámetro Precisión*

Precisión	Solución A	Solución B	Solución C	SUMA+1	Ponderación
Solución A	-	0	0	1.00	0.17
Solución B	1	-	0.5	2.50	0.42
Solución C	1	0.5	-	2.50	0.42
			TOTAL	6.00	

Tabla 12*Matriz evaluación de Holmes - Evaluación final*

	Costo	Sencillez de manejo	Precisión	SUMA	Prioridad
Solución A	0.10	0.03	0.07	0.20	3
Solución B	0.21	0.06	0.17	0.44	1
Solución C	0.10	0.08	0.17	0.36	2
			TOTAL	1.00	

Los resultados de la matriz de evaluación de Holmes concluyen en el uso de un actuador rotativo eléctrico, el motor a pasos, dado su relativa sencillez de uso, alto nivel de precisión gracias a su manejo por pulsos/pasos y su alta cantidad de stock en el mercado nacional optaremos por este tipo de motor para poder rotar el sistema.

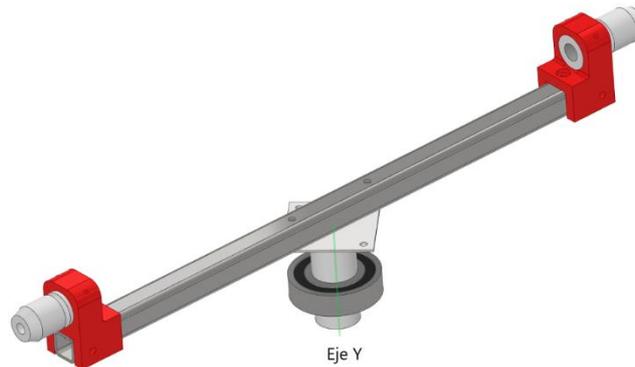
Diseño mecánico

El diseño base optado para esta sección es como el que muestra la Figura 31 de la arquitectura dado que el movimiento circular es más fácil de obtener por actuadores rotativos en contra de movimientos lineales que requieren una transformación de movimiento.

El objetivo del diseño es obtener uno el cual la inercia másica sea lo suficientemente baja sin perder prioridad en su resistencia mecánica por lo que se opta usar perfiles como estructura base tal como muestra la Figura 39.

Figura 39

Diseño CAD sección transporte materia prima

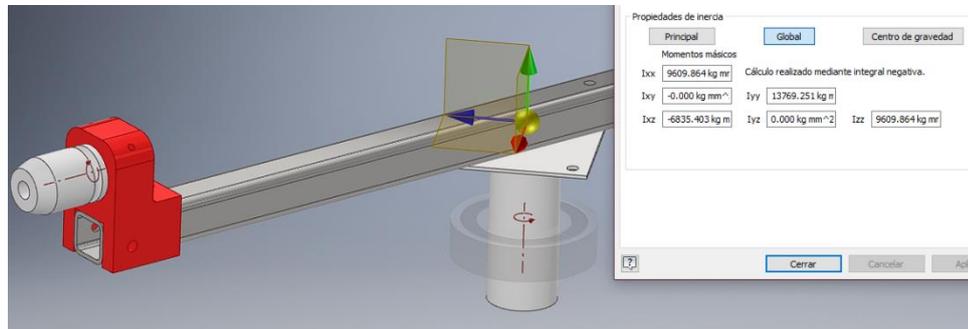


Nota. Software utilizado Autodesk Inventor.

Este sistema compuesto por una base que sujeta al brazo porta-material y está diseñado con chapa metálica de 2 [mm] de espesor de Acero estructural ASTM A36 y el brazo de perfil cuadrado del mismo material de 20 [mm] de lado y 1.5 [mm] de espesor, además se observan la disposición de la boquilla de inserción con su respectivo soporte; luego gracias a las herramientas que nos provee el software la inercia másica del sistema calcula un valor de 13769.25 [$kg\ mm^2$] Figura 40 respecto del eje Y que coincide con el centro geométrico.

Figura 40

Cálculo inercia respecto al eje Iyy por el software CAD



Nota. Software utilizado Autodesk Inventor.

Algunas consideraciones para el motor:

- El par de movimiento que va a manejar es constante, pero el par de arranque es variable como se describirá a continuación.
- Se busca un arranque suave incremental, esto para reducir los cambios abruptos de consumo de corriente y dar mayor vida útil al motor.
- El ciclo de trabajo estará definido por el tiempo de giro entre estaciones, esto implica un funcionamiento intermitente.

Estudio del movimiento y dimensionamiento del motor

Para un arco definido dentro de un ángulo de 180° y un radio calculado entre cada extremo $r = 265 \text{ [mm]}$ tenemos:

$$S = \theta r = 180 * \frac{\pi}{180} * (265 \text{ [mm]})$$

$$S = 832.52 \text{ [mm]}$$

Se propone un tiempo $t = 4 \text{ [s]}$ para completar ese arco, luego

$$\omega = \frac{v}{r} = \frac{\frac{832.52 \text{ [mm]}}{4 \text{ [s]}}}{265 \text{ [mm]}}$$

$$\omega = 0.79 \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]$$

Considerando que parte del reposo y alcanza la velocidad estable $\omega = 0.79 \text{ [rad/s]}$ en un tiempo de 0.5 [s] y con el uso de la ecuación

$$T = I_y * \frac{d\omega}{dt}, \quad \text{para } I_y = 13769.25 \text{ [kg mm}^2\text{]}$$

$$T_{0.5} = 13769.25 \text{ [kg mm}^2\text{]} * \frac{0.262 \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]}{0.5 \text{ [s]}}$$

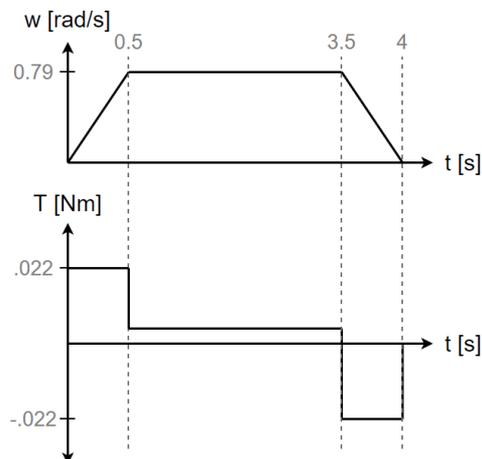
$$T_{0.5} = 21755.42 \text{ [kg mm}^2\text{s}^{-2}\text{]}$$

$$T_{0.5} = 0.022 \text{ [Nm]} = 0.23 \text{ [kgf cm]}$$

En resumen, el ciclo de trabajo del motor está definido como muestra el diagrama de la Figura 41.

Figura 41

Diagramas velocidad angular y torque vs el tiempo



Nota. El torque permitirá seleccionar al motor adecuado para ejercer movimiento.

Considerando cargas inesperadas, efectos de rozamientos, sobrecalentamientos, entre otros, se plantea un factor de diseño de $n = 4$ dando como resultado un motor

que pueda proveer de un torque de $T = 0.088 [Nm] = 0.92 [kgf\ cm]$ el más próximo a este valor es el motor que se muestra en la Tabla 13.

Tabla 13

Características del motor Nema 17

Modelo	Características
Motor NEMA 17 - SHINANO KENSHI 	Marca: SHINANO KENSHI Modelo: STP-43D2001 Bipolar 1.8 [°/paso] Voltaje nominal 12 [V_{dc}] Corriente por fase 1.2 [A] a 4 [V] Torque 1.6 [$kgf\ cm$]

Nota. Fuente: (HardwareLibre, 2019)

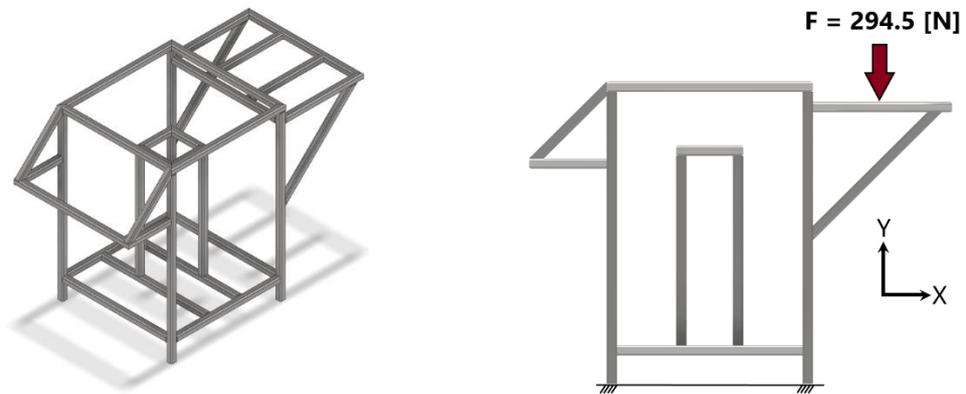
Sabiendo que cada paso o pulso eléctrico equivale a 1.8° se requiere de 100 pasos para alcanzar los 180° , para alcanzar la velocidad $\omega = 0.79 [rad/s]$ se requiere de la siguiente razón en pasos $razón = 25.15 [pasos/s]$, posteriormente se analizará a más detalle los aspectos para el control de velocidad del motor.

Mesa de trabajo

Los brazos que sujetan la materia prima Figura 39 se sostienen dentro de una mesa llamada estructura mesa de transporte como muestra la Figura 42, dicha estructura está construida usando el mismo perfil cuadrado de acero estructural A36 de 20 [mm] de lado y 1.5 [mm] de espesor pues resulta suficiente para soportar las cargas estáticas que se le presentan.

Figura 42

Diseño CAD mesa de trabajo y DCL



Nota. A la izquierda se muestra el diseño isométrico de la mesa de trabajo y a la derecha la carga debido a la fuerza de aplastamiento en el globo.

Como se observa en la Figura 42, en la parte lateral izquierda sobresale un plano inclinado el cual servirá para alojar todo el conjunto de pulsadores, interruptores, luces indicadoras y pantalla para que el usuario pueda manejar la máquina, al lado contrario sobresale un plano horizontal, este en cambio permite tener una base de apoyo del globo al momento de presionarlo con el marco de pantalla.

En su interior se alza una pequeña estructura que sirve de base para el motor a pasos y para el rodamiento respectivo, finalmente en la Figura 43 se observa la fuerza interviniente y los resultados de la simulación FEM que muestran que el uso de un perfil cuadrado de dimensiones anteriormente mencionadas brinda un esfuerzo máximo de 12.91 [MPa] en la zona de aplastamiento en la cual también se refleja una deformación 0.38 [mm] .

Tabla 14

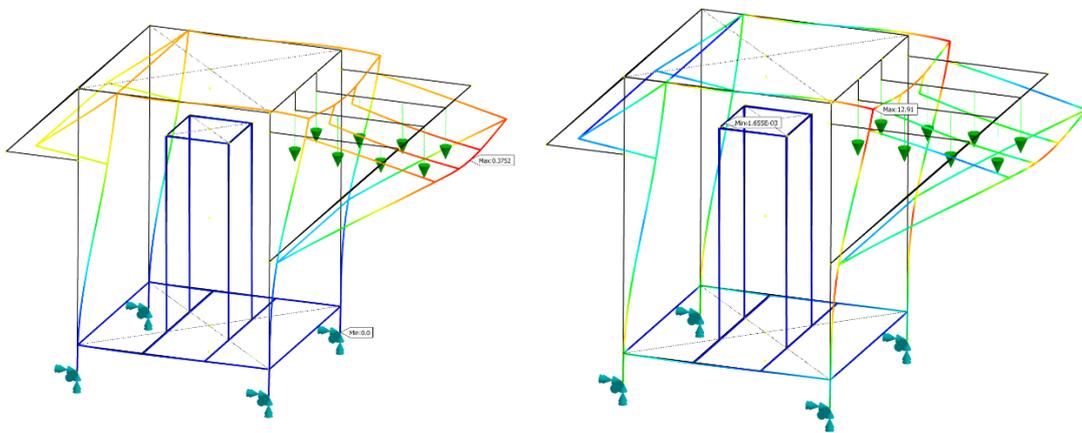
Características técnicas del Acero estructural A36 laminado en frío

Propiedad	Valor
Resistencia a la tracción	400 – 550 [MPa]
Resistencia a la fluencia	220 [MPa] (mín.)
Módulo de elasticidad	200 [GPa]
Relación de Poisson	0.26
Densidad	7.85 [g/cm ³]
Calidad	JIS 3141 SPCC SD

Nota. Fuente: (DIPAC, 2021) y (AAMSA, 2021)

Figura 43

Resultados de la simulación FEM en la mesa de trabajo



Nota. Software de simulación Autodesk Inventor Nastran 2021

Tabla 15*Resultados de la simulación FEM*

Perfil [mm]	Deformación máxima [mm]	Esfuerzo máximo [MPa]	Factor de seguridad (mínimo)
20x1.5	0.38	12.91	20
½"x1.5	1.62	35.82	7

Nota. La simulación utilizó un elemento lineal de 30 [mm] de longitud, los resultados muestran la viabilidad de un perfil u otro.

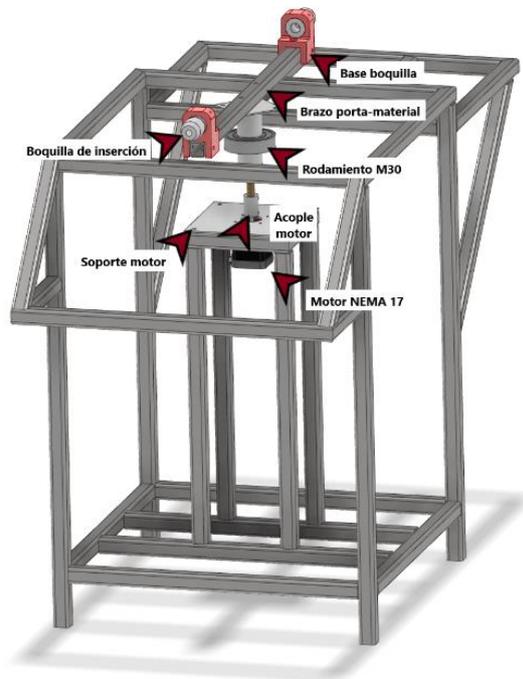
Reducir las dimensiones del perfil a ½ [in] que si bien posee un factor de seguridad de 7 trae efectos negativos pues aparecen deformaciones con un valor máximo 1.62 [mm] que pueden perjudicar el proceso de impresión pues incurrirían en inclinaciones.

CAD sección transporte

El ensamblaje final de la mesa de trabajo mostrado en la Figura 44 muestra los distintos elementos hasta el momento desarrollados ya en un conjunto, cabe recalcar que el diseño permite trabajar con dos globos al mismo tiempo lo que permitiría un aumento en el rendimiento de la producción.

Figura 44

Esquema de montaje de elementos mecánicos en la mesa de trabajo



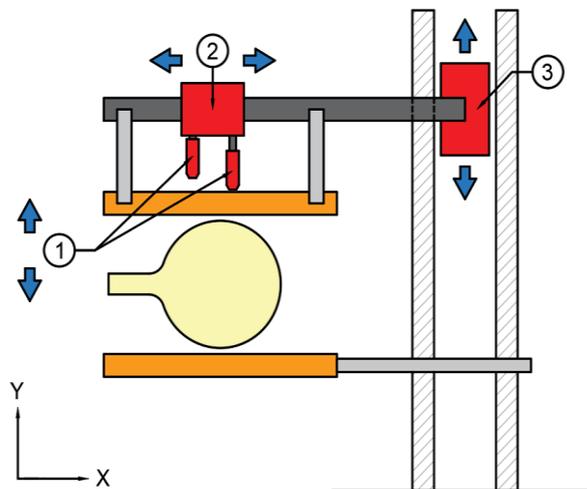
Nota. Ensamble realizado en el software Autodesk Inventor 2021.

Sección 3 Impresión

Esta sección es la más importante ya que es la encargada de imprimir sobre el globo y como muestra la Figura 45 consta de varios elementos actuadores que permiten tal proceso que se describen en la Tabla 16.

Figura 45

Esquema gráfico de los elementos actuadores de la sección impresión



Nota. El esquema muestra los movimientos requeridos para la impresión serigráfica.

Tabla 16

Funciones de cada actuador y posibles alternativas de solución

Actuador	Función	Alternativas
1	Movimiento vertical de los rastrillos encargados de generar presión sobre la pantalla del marco y el globo, en conjunto al actuador 2 transfieren la tinta hacia el globo.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Solución A: Motor eléctrico en conjunto con un tornillo sin fin
2	Movimiento horizontal que permite el desplazamiento de los rastrillos a través del marco serigráfico.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Solución B: Motor eléctrico en conjunto con un sistema piñón-cremallera
3	Movimiento vertical permite el desplazamiento de la pantalla hacia el globo con fuerza a fin de presionarlo y crear una superficie plana.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Solución C: Cilindro neumático

Selección del tipo de actuador

En cuanto al tipo de actuador, optamos por tres opciones que se describen en la Tabla 16.

Para las métricas de evaluación se toman las mismas de la evaluación anterior salvo el parámetro precisión pues es reemplazado por confiabilidad, como se describe a continuación.

- **Confiabilidad:** De ser el caso de que requiera mecanismos o sistemas electrónicos extras, dependerá del nivel de robustez que presenten estos extras y del mismo actuador para ofrecer un mayor grado de confiabilidad respecto a otra alternativa.

A continuación, todos estos parámetros se valoran usando la matriz de evaluación de Holmes como muestran las Tabla 17, Tabla 18, Tabla 19, Tabla 20.

Tabla 17

Matriz evaluación de Holmes - Parámetro Costo

Costo	Solución A	Solución B	Solución C	SUMA+1	Ponderación
Solución A	-	1	0.5	2.50	0.42
Solución B	0	-	0	1.00	0.17
Solución C	0.5	1	-	2.50	0.42
			TOTAL	6.00	

Tabla 18

Matriz evaluación de Holmes - Parámetro Sencillez de manejo

Sencillez de manejo	Solución A	Solución B	Solución C	SUMA+1	Ponderación
Solución A	-	0.5	0	1.50	0.25
Solución B	0.5	-	0	1.50	0.25
Solución C	1	1	-	3.00	0.50

Sencillez de manejo	Solución A	Solución B	Solución C	SUMA+1	Ponderación
TOTAL				6.00	

Tabla 19

Matriz evaluación de Holmes - Parámetro Confiabilidad

Confiabilidad	Solución A	Solución B	Solución C	SUMA+1	Ponderación
Solución A	-	0.5	0.5	2.00	0.33
Solución B	0.5	-	0	1.50	0.25
Solución C	0.5	1	-	2.50	0.42
TOTAL				6.00	

Tabla 20

Matriz evaluación de Holmes - Evaluación final

	Costo	Sencillez de manejo	Confiabilidad	SUMA	Prioridad
Solución A	0.10	0.10	0.11	0.32	2
Solución B	0.04	0.10	0.08	0.23	3
Solución C	0.10	0.21	0.14	0.45	1
TOTAL				1.00	

Los resultados de la matriz de evaluación de Holmes concluyen en el uso de cilindros neumáticos como actuadores para esta sección, si bien son más costosos que motores eléctricos destacan a la hora de usarlos pues, su sencillez de uso, velocidad, alta confiabilidad de diseño en cuanto a que son actuadores preparados para generar movimientos lineales y prácticamente no requieren de complejos diseños de elementos de control lo hacen útiles para esta aplicación.

La selección de este tipo de actuadores requiere de un diseño previo de mecanismos y estructuras de pues algunas cargas debido al peso y fuerzas de acción son requeridas para posterior selección de estos actuadores, además existen

estudios previos como se muestran en el Capítulo II Marco Teórico que indican factores intervinientes y estudios de cinemática y dinámica en el proceso de serigrafía que nos ayudarán a tener una base de las características requeridas en el cilindro neumático.

Parámetros base de actuadores 1 y 2

En los estudios mencionados en el Capítulo II muestra que efectos se tienen sobre algunas variables que intervienen en el proceso de serigrafía al usar elementos actuadores, resumiendo tales estudios se pueden obtener algunas consideraciones tales como:

1. A efectos de un aumento de la fuerza de aplicación sobre el rastrillo y la velocidad de aplicación generan un incremento en la fuerza de rozamiento, considerando una fuerza de aplicación de 40 [N] se puede extrapolar un modelo lineal con se muestra a continuación:

$$F_r(v)[N] = 0.0239 v[mm/s] + 3.3214 \text{ con } (R^2 = 0.978) \text{ para } v \geq 20[mm/s]$$

2. Si consideramos una velocidad de 250 [mm/s] para el actuador 2, con el modelo matemático anterior se puede calcular una fuerza de rozamiento estimada de 9.29 [N].
3. El uso de fuerzas de aplicación bajas (menores a 80 [N]) en el rastrillo por parte del actuador 1 crea una distribución uniforme de tensiones en la tela del marco serigráfico, evitando un desgaste prematuro.

En resumen, los parámetros que son base para el diseño se describen a continuación

Parámetros generales

- Deformación permisible de la tela $\delta_{m\acute{a}x} = 3 [mm]$
- Tensión en la tela $\sigma_L = 3 [N/mm]$

- Presión de trabajo $P = 6 [bar] = 0.6 [MPa]$
- Dimensiones del marco $40 [cm] \times 50 [cm]$
- Ancho y longitud útil de impresión $27 [cm] \times 33 [cm]$

Parámetros cilindro – 1

- Aplicación de una fuerza cilindro $F_3 = [30 - 50] [N]$
- Longitud de carrera cilindro $L = [80 - 100] [mm]$

Parámetros cilindro – 2

- Velocidad máxima del vástago $v_2 = 250 [mm/s]$
- Longitud de carrera cilindro $L = 33 [cm]$
- Fuerza de rozamiento respecto a la tela $F_r(v = 250 [mm/s]) \approx 10 [N]$

Para el diseño actual se va a partir desde el punto donde se realiza la impresión hasta llegar a la estructura soporte, esto con el fin de reconocer todas las fuerzas intervinientes.

Diseño mecánico base angular del rastrillo

Se propone la geometría de diseño como se muestra en la Figura 46, el cual posee un agujero central que permitirá la conexión con el cilindro neumático y un agujero a un lado por el cual pasará un eje liso de $8 [mm]$ de diámetro para eliminar efectos de rotación.

Figura 46

Diseño CAD base angular rastrillo y DCL



Nota. Diseño realizado en el software Autodesk Inventor 2021, a la derecha se muestra un esquema de los elementos que se acoplarán a la base angular y las fuerzas de raseado F_y y rozamiento F_x .

La pieza en cuestión debe mantener su forma cuando se aplican las fuerzas y movimientos ejercidos de los cilindros, dado la complejidad geométrica un análisis analítico se mostrará muy dificultoso de analizar por lo que se usará la herramienta CAE de elementos finitos por software, teniendo las siguientes consideraciones.

En la Figura 46 se muestran las fuerzas $F_y = 40 [N]$ (por parte del cilindro neumático) y $F_x = 10 [N]$ debido al rozamiento dada una velocidad de pasada de $250 [mm/s]$, además se considera como material base una chapa metálica de acero estructural A36 (debido a su bajo coste) Tabla 14 y fácil manufactura con espesores entre $1.5 - 3 [mm]$ para saber cuál es el espesor óptimo en dicha pieza realizando distintas simulaciones.

Figura 47

Características de mallado FEM resultantes de la base angular rastrillo

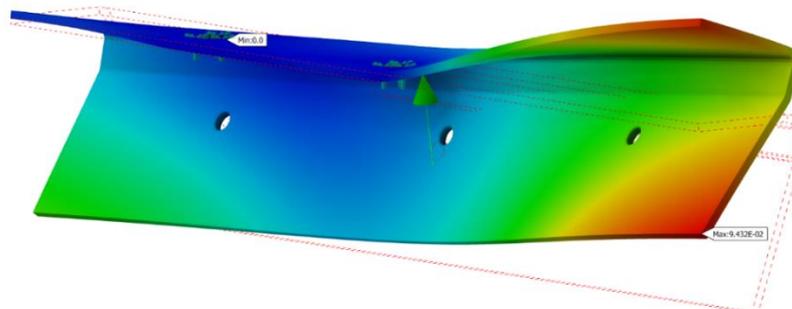
Característica	Valor	Observación
Tamaño del elemento	12 [mm]	De segundo orden (parabólico)
Taza de crecimiento	1.2	máximo
Tamaño de geometrías específicas	2 [mm]	
Aspect ratio	> 2.5	0% elements failed
Skew angle	> 45 °	2.19% elements failed
Jacobiano	< 0.42	4.34% elements failed

Nota. Los resultados fueron obtenidos en el software Autodesk Inventor Nastran 2021.

Tras el análisis de elementos finitos, Figura 48 se muestran los resultados como la deformación máxima, el esfuerzo máximo, el factor de seguridad respecto al esfuerzo máximo considerando Von-Mises y la masa del elemento como muestra la Tabla 21.

Figura 48

Simulación FEM deformaciones en la base angular rastrillo



Nota. Software de simulación Autodesk Inventor Nastran 2021.

Tabla 21

Resultados FEM según material comerciales base angular rastrillo

Espesor [mm]	Deformación máxima [mm]	Esfuerzo máximo [MPa]	Factor de seguridad (mínimo)	Masa [kg]
1.1	0.56	171.37	1.643	0.197
1.9	0.094	58.38	5.752	0.351
3	0.026	33.27	11.165	0.515

Nota. Los resultados permitirán seleccionar un espesor adecuado para la fabricación del elemento en cuestión.

Los resultados muestran que el espesor óptimo para la fabricación de este componente es de 1.9 [mm] dado que brinda un factor de seguridad de 5.75 dentro de un análisis estático, ofreciendo una masa de apenas 351 [gr].

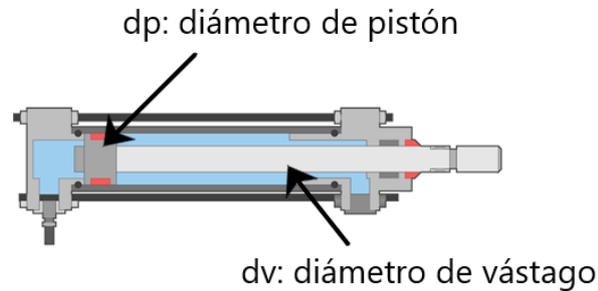
Cálculo de parámetros del cilindro neumático 1

En la Figura 49 se muestra un esquema interno de un cilindro neumático en el que destacan dos parámetros importantes, el diámetro de pistón y el diámetro de vástago es por ello por lo que se propone que para el cálculo de los cilindros neumático tengan dos enfoques, por una parte, el cálculo del diámetro del pistón dada por la fórmula general de la Ley de Pascal, desarrollada en el Capítulo I y la estimación del diámetro del vástago que equivaldrá al 30% del diámetro del pistón.

Por otra parte, si la longitud de carrera del cilindro neumático es demasiado larga correría el riesgo de sufrir efectos de pandeo, de igual manera la ecuación está desarrollada en base a la fórmula de Euler y realizando consideraciones previas.

Figura 49

Esquema interno de los diámetros en un cilindro neumático



Cálculo del diámetro de pistón del cilindro neumático 1

$$\phi_p [mm] = \sqrt{\frac{4 * f_s * \Sigma F}{\pi * 0.6 [N/mm^2]}}$$

$$\phi_{p1} [mm] = \sqrt{\frac{4 * 2 * (40)[N]}{\pi * 0.6 \left[\frac{N}{mm^2}\right]}} = 13.03$$

Cálculo del diámetro de vástago del cilindro neumático 1

$$\phi_v [mm] \geq \sqrt[4]{\frac{\Sigma F * (f_p * L_{vástago})^2}{24223.65}}$$

$$\phi_{v1} [mm] \geq \sqrt[4]{\frac{(40) * (2 * 100)^2}{24223.65}} = 2.85$$

Si consideramos al diámetro de pistón 13.03 [mm] y su posible diámetro de vástago de 4 [mm], estaremos seguros de que no sufrirá efectos de pandeo, aunque comercialmente el cilindro calculado no se fabrica por lo que se opta por el inmediato superior el cual se detalla a continuación.

- Diámetro de pistón $\phi_{p1} = 16 [mm]$
- Diámetro de vástago $\phi_{v1} = 6 [mm]$

- Longitud de carrera de $L = 100$ [mm]
- Código: X-MA-16x100-S Marca: XCPC
- Cantidad: 2 [unidades]

Figura 50

Cilindro neumático 16x100 XCPC

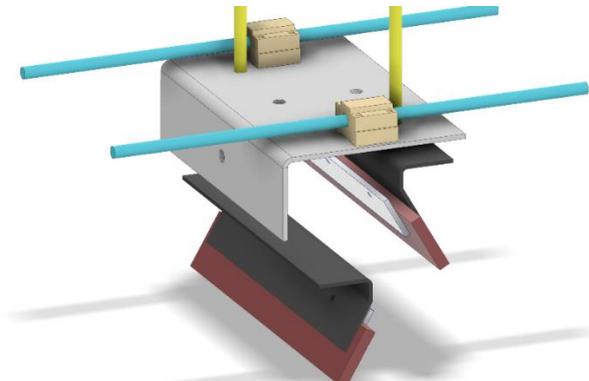


Diseño mecánico carril de rastrillos

Se propone el diseño que se muestra en la Figura 51 el cual posee una placa principal en forma L que sirve de base-soporte para los cilindros neumáticos calculados anteriormente, cabe recalcar que la placa en forma de L considera el mismo material usado en el diseño de la base angular del rastrillo, además posee ejes verticales (ejes amarillos) a fin de eliminar efectos de rotación.

Figura 51

Ensamble del carril de impresión



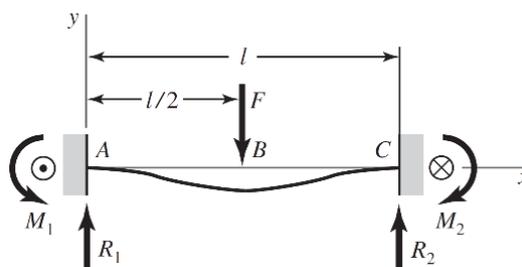
Nota. Para el posterior diseño se consideran los ejes celestes horizontales que estarán sujetos a flexión.

En esta sección los elementos mecánicos más importantes son los ejes transversales (ejes celestes) como se ve en la Figura 51 que permiten el desplazamiento horizontal de todo el sistema del carril, esto resulta en un análisis mecánico de rigidez para determinar el diámetro mínimo del eje en cuestión.

Si consideramos un eje de longitud $L = 534 [mm]$ fijo en ambos extremos con una carga en el centro como muestra la Figura 52, podemos calcular su desplazamiento máximo con la siguiente ecuación.

Figura 52

Ecuación de deformación máxima en un eje doblemente empotrado



Nota. Fuente: (Budynas & Nisbett, 2008).

$$y_{max} = \frac{Fl^3}{192EI}$$

Siendo una figura simétrica respecto a su área transversal y $E = 2 \times 10^5$ [MPa] (Acero Plata)

$$I_y = I_z = \frac{\pi r^4}{4}, \text{ para } r_1 = 5 \text{ [mm]}$$

$$y_{max} = \frac{\left(\frac{40}{2}\right) [N] * (534 - 2 * 14)^3}{192 * 2 \times 10^5 \left[\frac{N}{mm^2}\right] * \frac{\pi r^4}{4}}$$

$$y_{max}(r = 5 \text{ [mm]}) = 0.137. \text{ [mm]}$$

Dado la baja deformación obtenida en el eje de radio $r = 5$ [mm] y considerando condiciones estáticas debido a la baja y constante velocidad de movimiento se opta por el este eje liso en acero AISI Plata.

Figura 53

Acero plata rectificado brillante



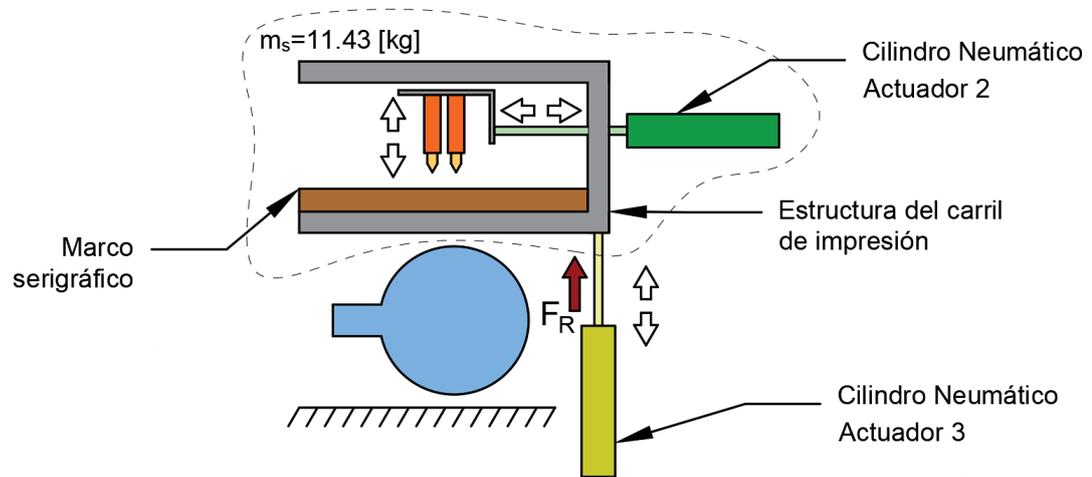
Nota. Fuente: (Bohman, 2021)

Diseño CAD carril de impresión

Esta sección resulta ser una estructura que da soporte y permite el movimiento del sistema de carril de rastrillos, además sostiene al marco de serigrafía todo ello como muestra el esquema de la Figura 54.

Figura 54

Esquema de los elementos actuadores 2 y 3

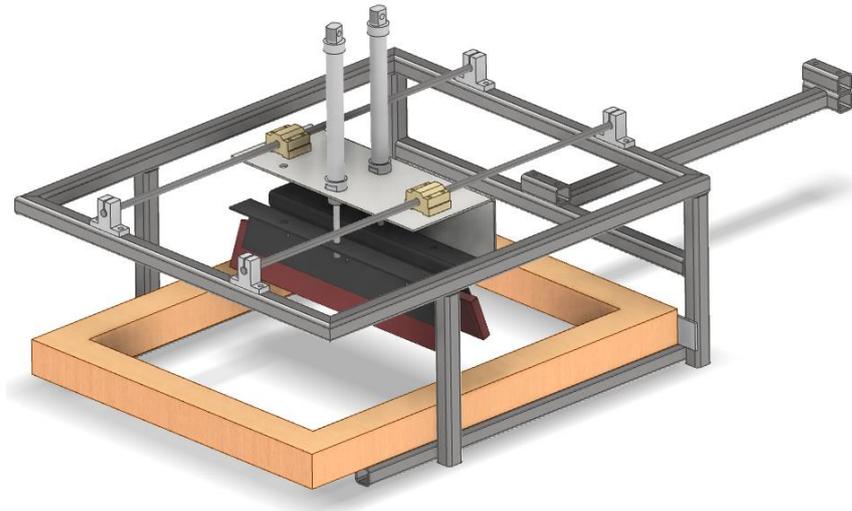


Nota. Los elementos actuadores 2 y 3 permitirán el movimiento de raseado y el aplastamiento del globo respectivamente.

Se propone el diseño que se muestra en la Figura 55 que consiste en una estructura de perfil cuadrado de 20 [mm] por lado y 1.5 [mm] de espesor (su uso es debido a la generalización del perfil en toda la estructura), en la parte superior están fijados 4 soportes de la varilla fija de 10 [mm] de diámetro para guiar el movimiento, mientras que en la parte inferior posee un marco de metal del mismo perfil que sirve de soporte para el marco de pantalla serigráfico, al posterior se observa un perfil que permite dar soporte a la base del cilindro neumático que empujará al carril de rastrillos generando un movimiento de vaivén.

Figura 55

Diseño CAD del carril de impresión



Nota. El diseño incluye la ubicación del marco serigráfico y de las palas que contienen los rastrillos de goma, ensamble realizado en el software Autodesk Inventor Nastran 2021.

Cálculo de parámetros del cilindro neumático 2

El movimiento del actuador número 2, implica el movimiento del sistema que engloba a los actuadores número 1 incluido el peso del sistema de la Figura 51 más los efectos de rozamiento producto de la fuerza de aplicación sobre la tela.

Datos

- Masa del sistema carril de rastrillos $m_1 = 3.18 [kg]$
- Masa de cilindro neumático (actuador 1) $m_2 = 0.128 [kg]$
- Fuerza debido al rozamiento $F_r = 10 [N]$
- Longitud de carrera $L_1 = 330 [mm]$

Dado que el cilindro 2 debe vencer los efectos inerciales debido al conjunto de masas, estas se consideran en la ecuación del cilindro para calcular el diámetro del pistón.

$$\phi_p [mm] = \sqrt{\frac{4 * f_s * \sum F}{\pi * 0.6 [N/mm^2]}}$$

$$\phi_{p2} [mm] = \sqrt{\frac{4 * 2 * [(3.18 + 0.128 * 2) * 9.81 + 10][N]}{\pi * 0.6 \left[\frac{N}{mm^2} \right]}} \approx 13.6$$

Cálculo del diámetro de vástago del cilindro neumático 2

$$\phi_v [mm] \geq \sqrt[4]{\frac{\sum F * (f_p * L_{vástago})^2}{24223.65}}$$

$$\phi_{v2} [mm] \geq \sqrt[4]{\frac{(43.71) * (2 * 330)^2}{24223.65}} = 5.3$$

De igual manera si consideramos el 30% del diámetro de pistón como diámetro de vástago el resultado es 3.6 [mm], por lo cual no habría problema con un diámetro de vástago de esas medidas, del mismo modo comercialmente se optó por el modelo de diámetro de pistón que se detalla a continuación.

- Diámetro de pistón $\phi_{p2} = 16 [mm]$
- Diámetro de vástago $\phi_{v2} = 6 [mm]$
- Longitud de carrera de $L_2 = 330 [mm]$
- Código: SSTRE001 Marca: XCPC
- Cantidad: 1 [unidad]

Figura 56

Cilindro neumático 16x330 XCPC

**Cálculo de parámetros del cilindro neumático 3**

Como se observa en la Figura 55 el conjunto de la fuerza del cilindro 1 y la fuerza debido a la masa del sistema carril de impresión deben generar la fuerza resultante F_R , dado que el cilindro neumático 3 debe tener la capacidad de mover la masa total del conjunto se considera para efectos de diseño usar el valor de la fuerza debido a la masa para calcular el diámetro de pistón requerido, pues la fuerza para la compresión del globo es el mismo peso de la estructura.

Parámetros de diseño cilindro 3

- Longitud de carrera $L = 330$ [mm]
- Fuerza de compresión en globos $F_1 = 10$ [kg]
- Masa del conjunto Figura 55 $m = 11.43$ [kg]

Cálculo del diámetro de pistón del cilindro neumático 3

$$\phi_p [\text{mm}] = \sqrt{\frac{4 * f_s * F_R}{\pi * 0.6 [\text{N/mm}^2]}}$$

$$\phi_{p3} [mm] = \sqrt{\frac{4 * 2 * (11.43 * 9.8)[N]}{\pi * 0.6 \left[\frac{N}{mm^2} \right]}} \approx 22$$

Cálculo del diámetro de vástago del cilindro neumático 2

$$\phi_v [mm] \geq \sqrt[4]{\frac{\sum F * (f_p * L_{vastago})^2}{24223.65}}$$

$$\phi_{v3} [mm] \geq \sqrt[4]{\frac{(11.43 * 9.8) * (2 * 330)^2}{24223.65}} = 6.7$$

De igual manera el 30% del diámetro de pistón es 6.6 resulta un valor muy justo para este diseño por lo que optaremos por el inmediato superior en cuanto al diámetro de pistón.

Comercialmente se optó por el modelo de diámetro de pistón que se detalla a continuación.

- Diámetro de pistón $\phi_{p3} = 25 [mm]$
- Diámetro de vástago $\phi_{v3} = 10 [mm]$
- Longitud de carrera de $L_3 = 330 [mm]$
- Código: SSTRE001 Marca: XCPC
- Cantidad: 1 [unidad]

Figura 57*Cilindro neumático 25x330 XCPC***Selección de válvulas electroneumáticas**

Para la selección de las válvulas se estudiará al cilindro neumático que consumen mayor cantidad de aire y por ende requiere de mayor caudal, este es el cilindro neumático 3, teniendo los siguientes datos:

- Diámetro de pistón $d_p = 25 [mm]$
- Longitud de carrera $L = 330 [mm]$
- Presión de trabajo $P = 6 [bar]$
- Ciclos 5 [*veces/min*] (considerando la mejora requerida de 40%)

Se calcula el volumen normal del aire a través de la ley de los gases ideales

$$V_{normal} = \frac{(6 + 1.013)[bar]}{1.013[bar]} * V_{comprimido}$$

$$V_{normal} [m^3] = 6.923 * \frac{\pi d_p^2}{4 \times 10^9} * 330 = 1.1214 \times 10^{-3}$$

Si la velocidad de raseado deseada es de 250 [mm] en 1 [s] para la longitud de carrera $L = 330 [mm]$ demoraría un tiempo de $t = 1.32 [s]$.

El caudal requerido es

$$k_v \left[\frac{m^3}{h} \right] = V_{normal} * \frac{60 * ciclos}{min}$$

$$k_v = 0.336 [m^3/h]$$

O en unidades del sistema inglés

$$c_v = 0.39 \left[\frac{gal}{min} \right]$$

El modelo de válvula seleccionado es 4V110-06 electroválvula 5/2 – 1/8” monoestable con retorno de muelle de la marca XCPC Figura 58 y se usará el mismo modelo para el resto de los cilindros neumáticos.

Figura 58

Electroválvula 5/2 XCPC



Nota. Las características técnicas detalladas se encuentran en: (XCPC, 2021)

Las especificaciones técnicas de la válvula describen una capacidad de caudal nominal $C_v = 0.67$ (ROME, 2021) (XCPC, 2021)

Complementos del sistema neumático

Dentro del circuito neumático se encuentran elementos que permiten un mejor ajuste de los parámetros de funcionamiento de los actuadores neumáticos, dentro de los cuales están

Tabla 22

Elementos complementarios del circuito neumático

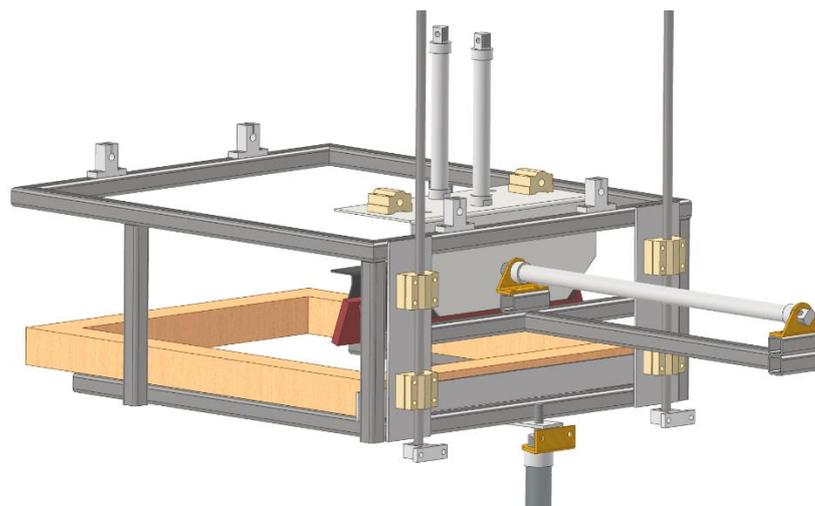
Elemento	Cantidad	Características
Regulador de caudal	8	Conexión M5 y conexión 1/8 [in]
		
Racor codo	12	1/8 [in] x 6 [mm]
		
Silenciador de bronce	8	Superficie plana y sinterizado
		
Manguera neumática $\varnothing 6$ [mm]	1	6x4 [mm] y 20 [m] de largo
		
Unidad de mantenimiento	1	Conexión de 1/4 [in] con filtro lubricador
		
Distribuidor 5 salidas	2	Conexión de 1/4 [in]
		
Racor tipo T	2	Conexión de 1/4 [in]
		

Cálculo del eje – movimiento vertical

En la Figura 59 la placa posterior posee rodamientos lineales por los cuales pasan un par de ejes que permiten a la estructura desplazarse verticalmente, dado que es un sistema dinámico y debido a la aplicación de fuerzas que deforman al globo para generar una superficie plana de impresión se espera que existan variaciones de carga, por lo que optaremos por un diseño por la teoría de resistencia mecánica ante cargas variables, además de una simulación completa con la estructura soporte de la Sección 3 de impresión y así conocer la estabilidad elástica de la estructura conociendo las deformaciones que se presenten.

Figura 59

Ensamble sección impresión y ejes verticales

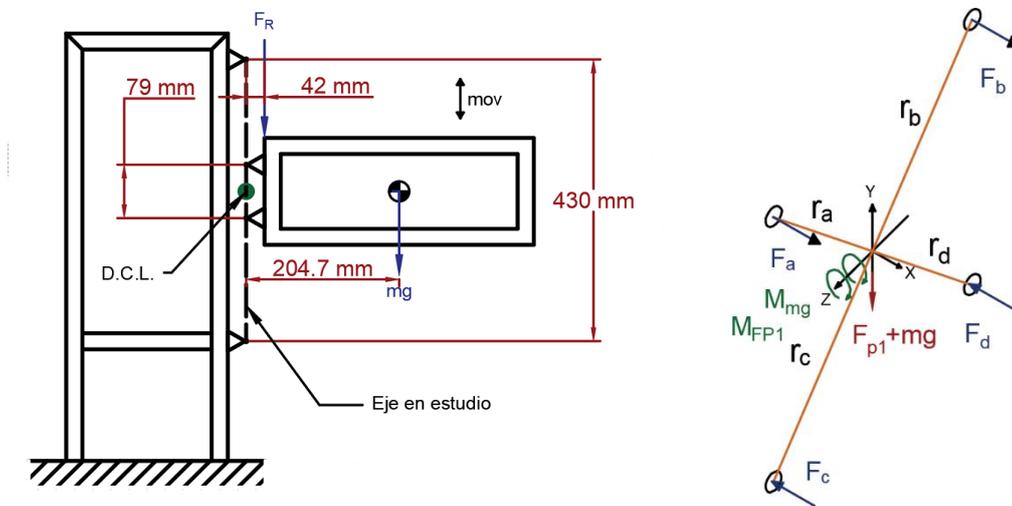


Nota. Los ejes verticales estarán sometidos a esfuerzos fluctuantes de carácter flector debido al aplastamiento del globo.

El estado de fuerzas de la estructura como muestra la Figura 60 incluye a la fuerza F_R debido a la acción del pistón, más la fuerza debido a la masa total de la estructura soporte del marco de pantalla, además se indica el punto de estudio donde se ubicará el sistema de referencia del D.C.L.

Figura 60

DCL de las fuerzas intervienientes en los ejes



Nota. El efecto de las fuerzas F_R y mg generan reacciones en el par de ejes verticales teniendo su punto de deformación máxima cuando se aplican cerca del centro geométrico.

Siendo un elemento "simétrico" los módulos de las fuerzas son iguales $F_a = F_b = F_c = F_d$ al igual que sus radios, luego la fuerza resultante $F_{p1} + mg$ no se toman en cuenta dado que el elemento estaría en movimiento en ese eje coordenado.

$$F_a = \frac{(M_{FP1} + M_{mg}) * r_a}{r_a^2 + r_b^2 + r_c^2 + r_d^2}$$

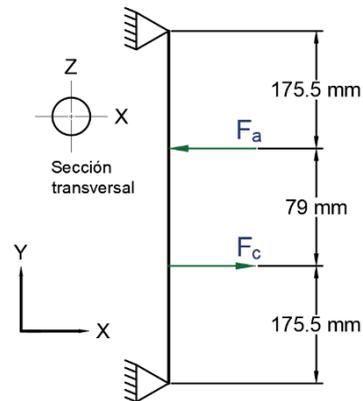
$$F_a$$

$$= \frac{\left(\left(0.6 * \frac{\pi * (25)^2}{4} \right) [N] * 0.042 [m] + 112.13 [N] * 0.205 [m] \right) * \sqrt{\left(\frac{79}{2000} \right)^2 + \left(\frac{349.5}{2000} \right)^2} [m]}{4 * \left[\left(\frac{79}{2000} \right)^2 + \left(\frac{349.5}{2000} \right)^2 \right]}$$

$$F_a = 49.33 [N]$$

Figura 61

DCL de un eje vertical mostrando las fuerzas de reacción resultantes



Por sumatoria de fuerzas y momentos

$$\sum F_x = 0$$

$$R_A + F_a - F_c + R_B = 0$$

$$\sum M_A = 0$$

$$F_a * 175.5 - F_c * (175.5 + 79) + R_B * 430 = 0$$

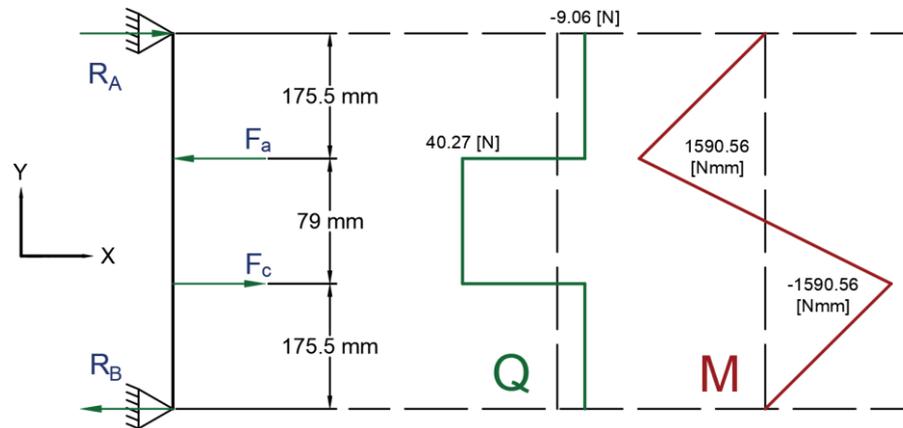
Los resultados de las ecuaciones anteriores son

$$R_A = -R_B = 9.06 [N]$$

Y presentan los diagramas correspondientes de cortante y momento flector

Figura 62

Diagramas de cortante y momento flector



Nota. El diagrama de momento flector determinará el punto de interés del estudio.

Dada su simetría en momentos, podemos seleccionar cualquier punto de estudio, el cual se considera a una carga fluctuante de entre $M_{min} = 0 [Nmm]$ y $M_{max} = 1590.56 [Nmm]$.

Esfuerzo flector

$$\sigma_{max} = \frac{Mc}{I} = \frac{1590.56 [Nmm] * \frac{d}{2}}{\frac{\pi}{64} d^4}, \quad d \text{ es el diámetro del eje}$$

$$\sigma_{max} = \frac{16\,201.31}{d^3}$$

Esfuerzos medios y alternantes

$$\sigma_m = \sigma_a = \frac{\sigma_{max}}{2} = \frac{8100.65}{d^3}$$

Considerando al Acero plata que se caracteriza por su alta resistencia al desgaste (Bohman, 2021) Tabla 23 podemos obtener el límite de resistencia a la fatiga, considerando además los factores que lo modifican (Factores de Marín).

Tabla 23*Características técnicas del acero plata*

Propiedad	Valor
Resistencia a la tracción	730 – 770 [MPa]
Resistencia a la fluencia	580 [MPa] (mín.)
Módulo de elasticidad	200 [GPa]
Relación de Poisson	0.26
Densidad	7.87 [g/cm ³]
Dureza	180 – 285 (HB)

Nota. Fuente: (Ferrocortes, 2020)

$$S_e = 0.5 * K_a * K_b * K_c * K_d * K_e * K_f * S_{ut}$$

Factor de superficie, dado que el eje es pulido se puede asemejar a un material rectificado fino y pulido, la Figura 63 muestra valores útiles para este tipo de acabados considerando la dureza Brinell y la resistencia última, obtenemos.

$$K_a = 0.90$$

Factor de tamaño, tomando que se espera un diámetro menor a 51 [mm] (Budynas & Nisbett, 2008)

$$K_b = 1.24 d^{-0.107}$$

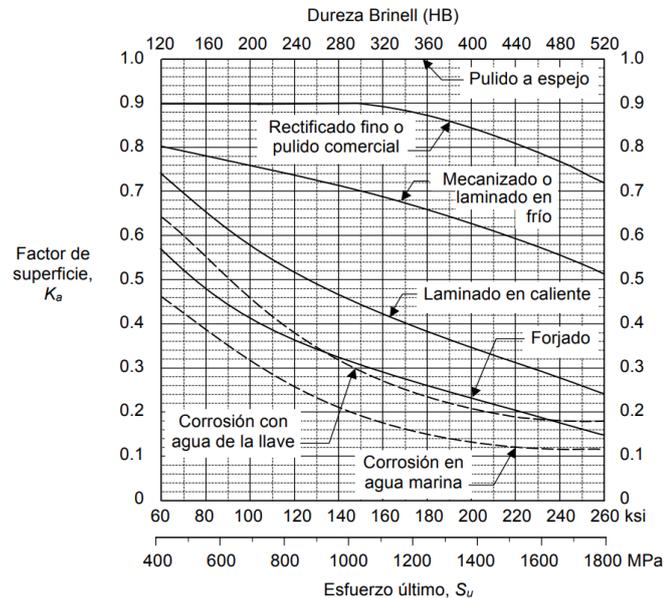
Factor de carga, debido a que es flexión pura $K_c = 1$

Factor de temperatura, considerando una temperatura ambiente $K_d = 1$

Factor de confiabilidad, al 95% $K_e = 0.868$

Figura 63

Factores de superficie del acero



Nota. Son los resultados de ensayos realizados sobre probetas de acero con diferentes acabados superficiales (Vanegas, 2018)

En cuanto a concentradores de esfuerzos no se toman en cuenta ya que el eje mantiene su geometría completa.

Dado las cargas fluctuantes y la ausencia de muescas o cambios de sección, se utiliza un criterio optimista de falla, por lo que usaremos Goodman modificado para conocer si el elemento falla.

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}} = \frac{1}{n}$$

$$\frac{8100.65}{353.57 d^{2.893}} + \frac{8100.65}{630 * d^3} = \frac{1}{n}, \quad \text{para un eje de } 10 \text{ [mm] de diámetro}$$

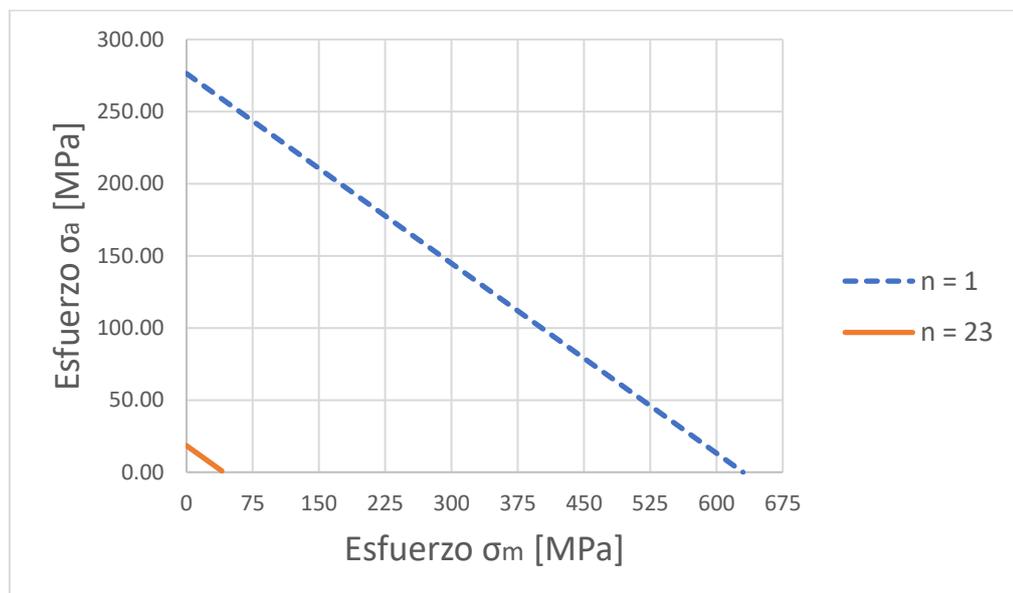
$$n_{10mm} = 23$$

El resultado de n muestra que el eje se encuentra trabajando en vida infinita ya que como muestra la Figura 64 la recta $n=1$ indica el límite de trabajo del

elemento pues es inevitable su falla a su vez que todos los puntos debajo de su recta son puntos seguros de trabajo, luego dado el factor de seguridad obtenido de $n=23$ su correspondiente recta se encuentra en la zona segura de trabajo, estableciendo confianza al no fallar debido a las cargas actuantes, aun cuando el eje se encuentre sobredimensionado se debe establecer que las deformaciones sufridas no sean consideradas peligrosas por lo que a continuación se realizará un análisis de deformaciones.

Figura 64

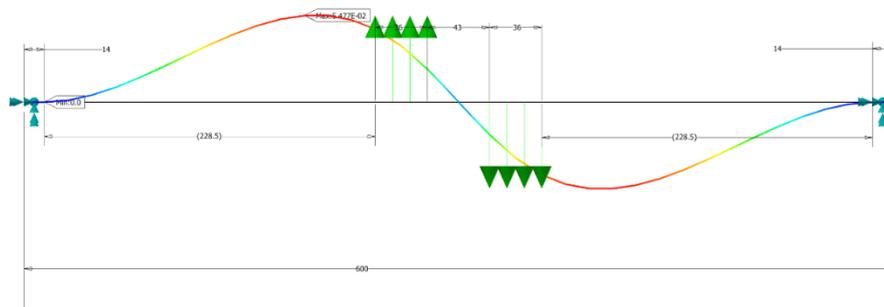
Recta Goodman modificada para $n=1$ y $n=23$



Como se mencionó anteriormente hay que considerar deformaciones, dado que se espera que el elemento sea rígido y dichas deformaciones sean las mínimas posibles, el uso de elementos finitos es necesario nuevamente, mostrando los siguientes resultados Figura 65 para los ejes de 8 y 10 [mm] de diámetro resultando que en los al usar un eje M8 las deformaciones pueden llegar hasta 1.038 [mm] mientras que al usar un eje M10 la deformación máxima es de 0.569 [mm].

Figura 65

Deformaciones máximas del eje



Nota. La deformación máxima obtenida fue de 0.569 [mm] para el eje de diámetro de 10 [mm], siendo un valor útil para el diseño, dichos resultados se obtuvieron en el software Autodesk Inventor Nastran 2021.

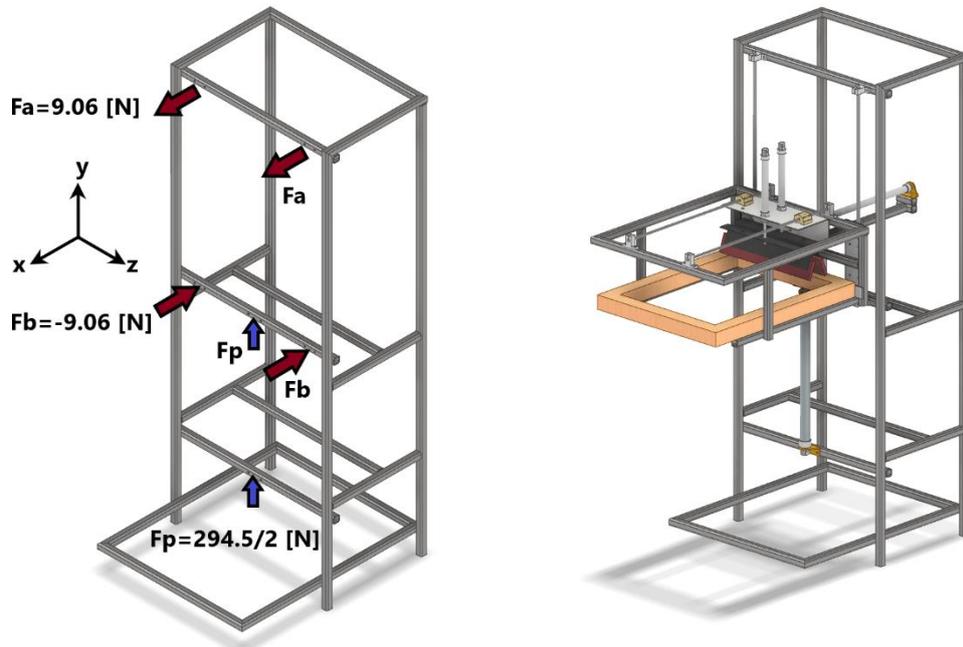
Diseño mecánico estructura soporte sección impresión

La estructura que soporta a todos los componentes anteriores debe mantenerse firme pues existen muchos componentes actuadores que generan fuerzas, como se observó en análisis anteriores, todas estas cargas actúan en el eje M10 y se transmiten a la estructura en los anclajes al principio y final del eje, además del cilindro neumático 3, dando resultado fuerzas de tipo reacción.

Para ello se ha planteado el siguiente modelo CAD que muestra la Figura 66 el cual muestra a una estructura construida en con el mismo perfil cuadrado de 20 [mm] de lado en el cual también muestran a los diferentes componentes ensamblados, para la simulación se observa el DCL de la Figura 66.

Figura 66

Distribución de fuerzas en la estructura y ensambla de componentes

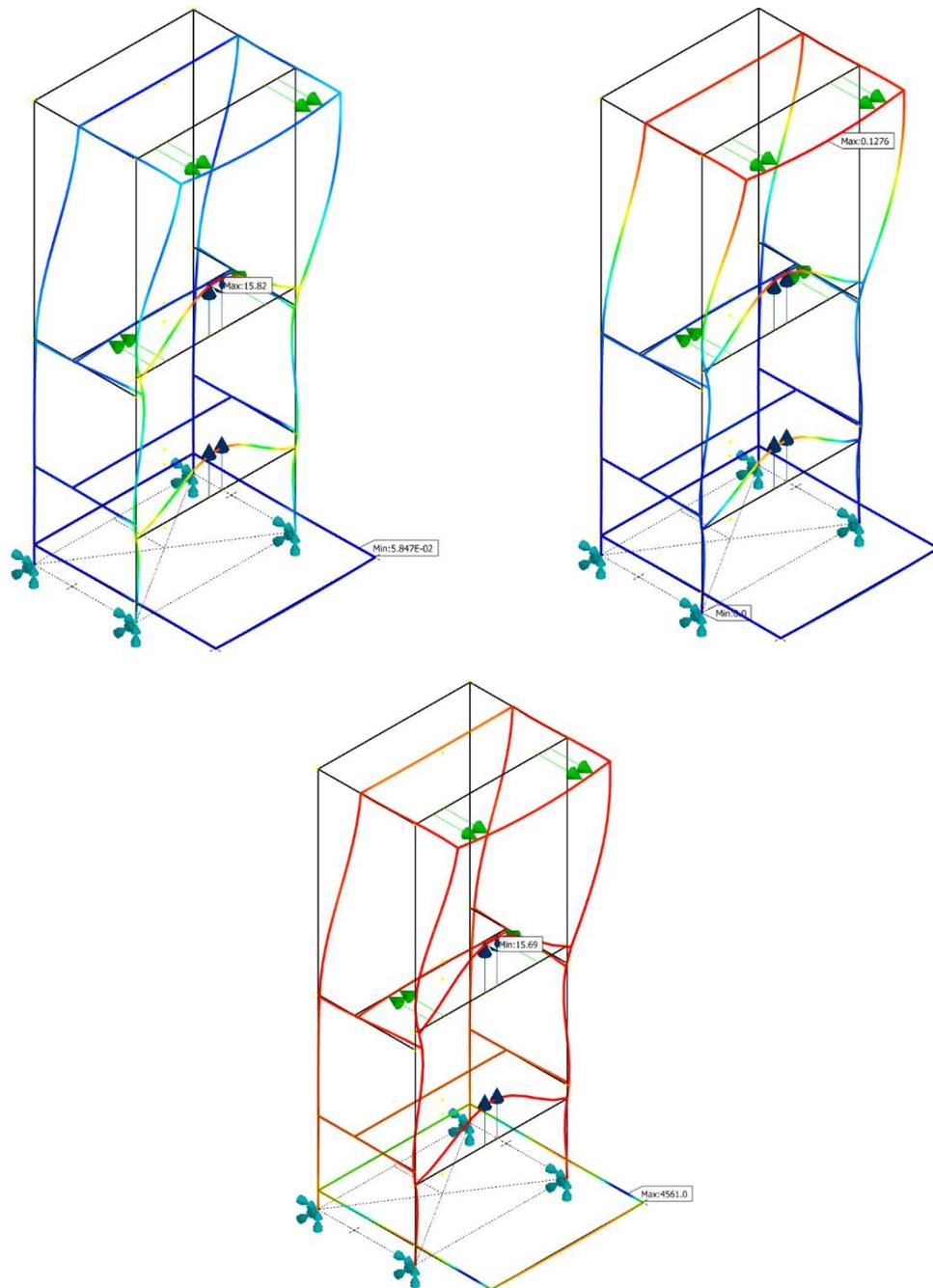


Nota. Las fuerzas son reacciones debido al cilindro neumático y reacciones en los ejes perpendiculares.

Del análisis por elementos finitos obtenemos los siguientes resultados, para una estructura construida de perfil cuadrado de acero estructural ASTM A36 de 20 [mm] de lado y 1.5 [mm] de espesor con sus cargas Figura 66 da un esfuerzo máximo de 15.85 [MPa], con una deformación máxima de 0.127 [mm] y un factor de seguridad mínimo de 15.69; reducir las dimensiones perfil a su próximo inferior (1/2 [in]) genera una caída drástica principalmente en el factor de seguridad dando un valor mínimo de 3.15 Tabla 24.

Figura 67

Resultados de la simulación FEM de la estructura



Nota. La simulación indica en que posibles lugares se van a encontrar deformaciones máxima, para ello se usó el software Autodesk Inventor Nastran 2021.

Tabla 24*Resultados de la simulación FEM de la estructura*

Perfil [mm]	Deformación máxima [mm]	Esfuerzo máximo [MPa]	Factor de seguridad (mínimo)
20x1.5	0.127	15.85	15.69
½"x1.5	1.32	78.73	3.15

Nota. Los resultados de la simulación FEM permitirán tener una idea de la geometría del perfil óptimo.

Sección 4 Electrónica y control

Toda esta sección implica el diseño electrónico y parte desde que tipos de elementos actuadores eléctricos se encuentran en incluidos en esta sección y los elementos que gobiernan dichos actuadores, la sección en cuestión está compuesta por un conjunto de entradas, un conjunto de salidas y un elemento de procesamiento de las señales tanto de control como de potencia, cabe recalcar que la mayoría de elementos que se encontrarán corresponden a accionamientos electromecánicos y bobinas electromecánicas para actuadores Tabla 25, esto permite una gran flexibilidad de control con la ayuda del controlador digital.

Tabla 25*Elementos electrónicos intervinientes*

Tipo	Denominación	Cantidad
	Final de carrera electromecánico	5
Entrada	Sensor infrarrojo detector	3
	Pulsadores	5

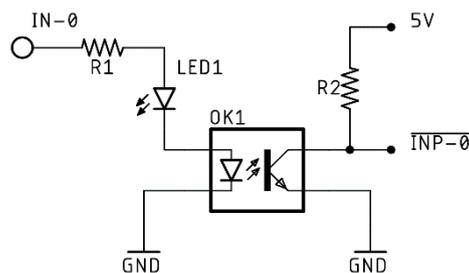
Tipo	Denominación	Cantidad
	Bobina de válvula electropneumática 5/2 con retorno de muelle	4
Salida	Bobina de electroválvula 2/2 NC	2
	Luz indicadora 12 [V]	3
	Motor a pasos NEMA 17	1

Entradas digitales

El conjunto de entradas digitales se estandarizará a 12 [V] y deben ser transformados a tensiones menores admisibles para el controlador digital, el uso de esta tensión permitirá evitar pérdida de datos debido a la presencia de ruidos eléctricos que interfieran la señal, para ello se plantea el circuito que muestra la Figura 68, cabe recalcar que también se espera tener entradas de 5 [V] debido a módulos que manejen esas tensiones y estén muy cerca del controlador digital.

Figura 68

Circuito entrada digital opto aislada



Para el diseño de este circuito se ha optado por el optoacoplador PC817 de cuya hoja técnica se pueden obtener los siguientes datos (Sharp, 2021).

- Corriente útil del fototransistor $I_F = 20 [mA]$
- Voltaje del diodo $V_F = 1.25 [V]$

Luego $V_{Led} = 2.4 [V]$

Se forma la siguiente suma de tensiones de nodo a partir del punto IN-0 (considerando 12 [V] - ON)

$$12 [V] = R_1 * I_F + 2.4 [V] + 1.25 [V]$$

Despejando R_1 y resolviendo la ecuación

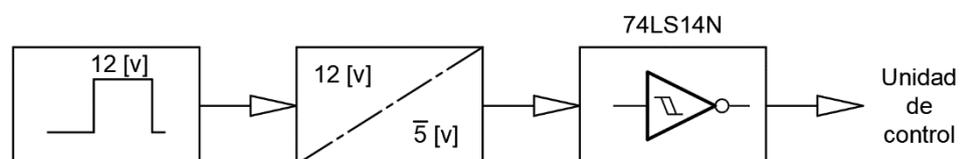
$$R_1 = 417 [\Omega] \rightarrow 430 [\Omega] \text{ (Valor comercial)}$$

Del lado del colector se usará con una resistencia $R_2 = 10 [k\Omega]$ y así trabajar en modo conmutación pues la corriente resulta $I_c = 0.5 [mA]$ muy por debajo del máximo que puede brindar la ganancia hFE .

Como se observa en la Figura 68 la salida del optoacoplador está negada, esto debido al comportamiento del fototransistor y la conexión pull-up, para obtener el valor real de la señal de entrada de potencia únicamente se requiere de una compuerta lógica NOT que permitirá este cambio, el esquema final se muestra en la Figura 69.

Figura 69

Composición de la entrada digital opto aislada



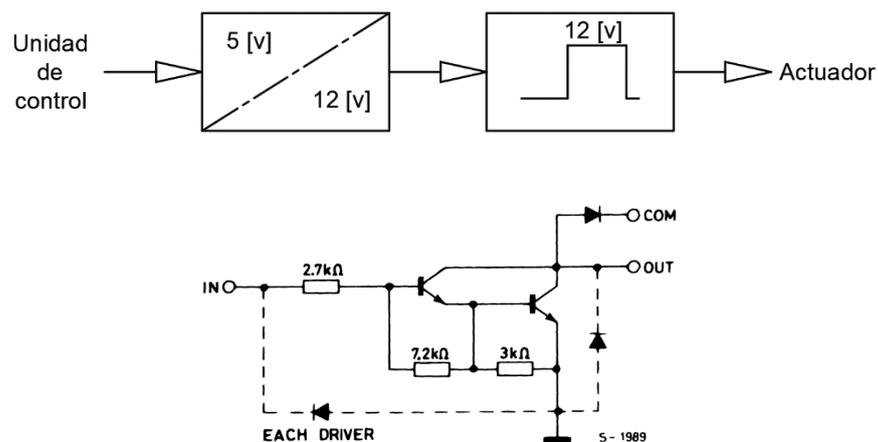
Nota. Un paso antes de la salida la señal sale negada por lo que se requiere de una compuerta NOT para revertir la señal, además ayuda en la eliminación de ruidos eléctricos protegiendo a la unidad de control.

Salidas de potencia

En cuanto a las salidas de potencia ocurre lo contrario se requiere de una conversión de 5 [V] a 12 [V], para ello se usará una conversión por medio de un arreglo de transistores par Darlington como muestra la Figura 70.

Figura 70

Esquema de las salidas de potencia pseudo aisladas



Nota. La salida tiene conexión a 12V útil para los actuadores y elementos de potencia dentro del sistema con una configuración Darlington.

Ventajosamente, esta configuración ya se encuentra embebida en el integrado ULN2003, que provee 7 salidas de control de potencia con las siguientes características (ST, 2021).

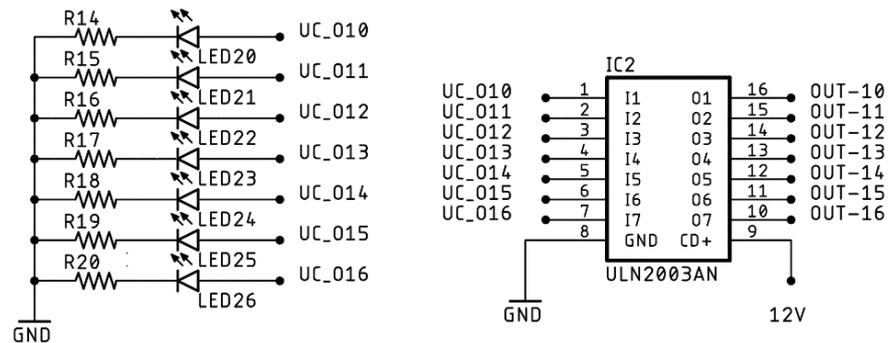
- Input current (ON) $I_I = 1.35 [mA]$
- Input voltage (ON) $V_I = 5 [V]$
- Corriente de colector $I_c = 500 [mA]$ que son suficientes para accionar la bobina de la electroválvula de potencia 2.5 [W] a 12 [V].

Finalmente, esta parte del circuito estará enfocada principalmente al manejo de las electroválvulas y luces indicadoras, cabe recalcar que por una parte la

entrada de la configuración Darlington debe estar direccionada a GND y a través de una resistencia de 330 [Ω] y un led que indicarán el estado de la salida como muestra la Figura 71.

Figura 71

Conexiones de leds indicadores al ULN2003A

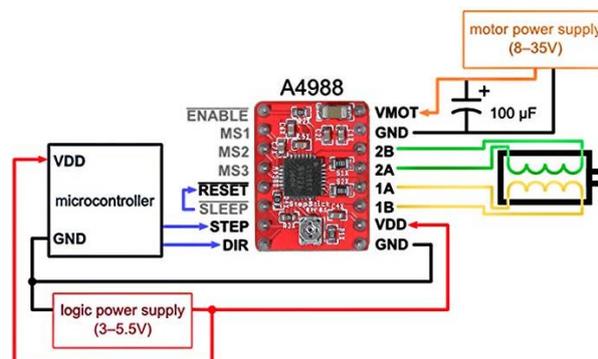


Control de motor a pasos

Existen innumerables drivers que controlan este tipo de motores, dado que la corriente máxima del motor es $I_b = 1.7$ [A] optamos por el controlador A4988 de Pololu (Pololu, 2021) Figura 72 cuyas características se listan a continuación.

Figura 72

Esquema de conexiones motor a pasos A4988



Nota. Fuente: (Pololu, 2021).

Características:

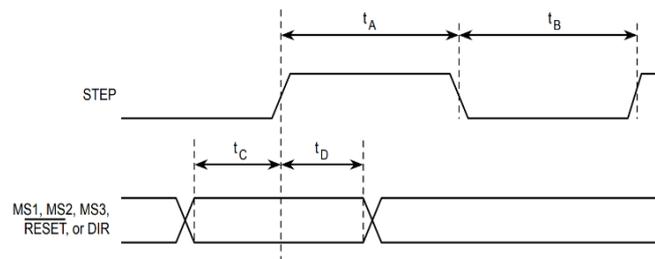
- Rango de voltaje de operación de carga $V_m = 8 - 35 [V]$
- Máxima corriente de salida continua por fase $I_m = 2 [A]$
- Resolución de micro pasos admitidos: *full*, 1/2, 1/4, 1/8 y 1/16 Tabla 27
- Limitador de corriente a través de la ecuación

$$I_{tripMAX} = V_{REF}/(8xR_S)$$

Considerando una corriente máxima del motor de $I_{tripMAX} = 1.7 [A]$ y una resistencia de calibración de corriente $R_S = 0.1 [\Omega]$, dando un voltaje de calibración de $V_{REF} = 1.36 [V]$.

Figura 73

Diagrama de tiempos de pulsos A4988



Nota. Fuente: (Pololu, 2021)

Tabla 26

Valores de tiempos de pulsos mínimos A4988

Time Duration	Symbol	Value	Unit
STEP mínimo, HIGH pulse width	t_A	1	μs
STEP mínimo, LOW pulse width	t_B	1	μs

Time Duration	Symbol	Value	Unit
Setup time, input change to STEP	t_C	200	ns
Hold time, input change to STEP	t_D	200	ns

Nota. Fuente: (MicroSystems, 2021)

Tabla 27

Configuración de la fracción del paso y resolución A4988

MS1	MS2	MS3	Resolución Micro paso	Modo de operación
L	L	L	Full Step	2 Phase
H	L	L	Half Step	1-2 Phase
L	H	L	Quarter Step	W1-2 Phase
H	H	L	Eigth Step	2W1-2 Phase
H	H	H	Sixteenth Step	4W1-2 Phase

Nota. Fuente: (MicroSystems, 2021)

Controlador digital, visualización y otros

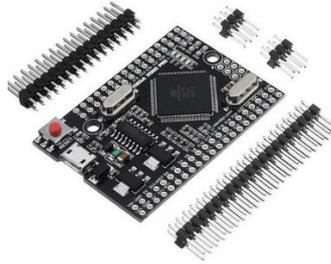
Un punto importante dentro del desarrollo de la máquina como los diferentes componentes electromecánicos se comunicarán entre ellos, esto resulta en el uso de un controlador digital, dispositivo que también le permitirá interactuar al usuario con la máquina durante el proceso.

En cuanto al controlador digital existe una amplia variedad dentro del mercado, desde modelos ya complejos como un PLC hasta la base de ellos como lo es un microcontrolador, se prefiere ir por una variante de controlador Arduino, específicamente el Arduino mega Pro mini Figura 74 dada su ventaja con la gran cantidad de entradas y salidas digitales que posee y su amplia documentación; se

ha desestimado el usar controladores tipo PLC dado a su alto coste y bajas prestaciones en cuanto a cantidad de entradas y salidas.

Figura 74

Arduino Mega pro mini



La interacción entre máquina y operador es de gran importancia para el manejo, control y visualización de parámetros y características, que se puede llevar a cabo durante el proceso o para iniciar este, por lo que se requerirá de una interfaz visual que ayude en este cometido, dado que solo se requiere mostrar información simple y controles básicos, se da preferencia al uso de una pantalla LCD de 128x64 Figura 75.

Figura 75

LCD 128x64ZW DIGOLE



Regulador de Voltaje

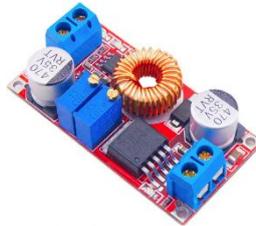
Regulador de voltaje DC-DC Stepdown XL4015 Figura 76 nos servirá para transformar la fuente de 12 [V] a 5 [V] útiles para el Arduino Mega ya que es capaz

de conducir una carga de 5 [A] de baja ondulación y presenta las siguientes características (Xlsemi, 2021).

- Voltaje de entrada: 8 [V] – 36 [V]
- Voltaje de salida: 1.25 [V] – 32 [V]
- Corriente de salida: máximo ajustable 5 [A]
- Eficiencia de conversión: 95%
- Regulación de voltaje: $\pm 2.5\%$
- Temperatura de funcionamiento: -40 [°C] a +85 [°C]

Figura 76

Módulo DC-DC regulador de voltaje XL4015



Módulo codificador rotativo

Dicho módulo KY-040 KEYES Figura 77 es un dispositivo de entrada rotativo que proporciona información de pulsos al girar la perrilla, la dirección de giro y dispone de un pulsador, esto es muy útil a la hora de desplazarse por un menú de control, ingresar datos, seleccionar dentro de un menú de opciones, etc.

Figura 77*Encoder rotativo KY-040*

Nota. Fuente: (Epitran, 2021)

Consumo eléctrico

Todos los dispositivos anteriormente mencionados requieren de una fuente de energía que pueda proveer la corriente necesaria para un correcto funcionamiento, como muestra la Tabla 28.

Tabla 28*Listado de elementos electrónicos y consumo eléctrico*

Denominación	Cantidad	Consumo
Final de carrera electromecánico	5	12 [V], 5 [mA] (digital)
Sensor infrarrojo detector	3	5 [V], 5 [mA]
Pulsadores	5	12 [V], 5 [mA] (digital)
Bobina de válvula electroneumática 5/2	4	12 [V], 210 [mA]
Bobina de electroválvula 2/2 NC	2	12 [V], 0.51 [A] (máx.)
Luz indicadora 12 [V]	3	12 [V], 6 [mA]
Motor a pasos NEMA 17	1	12 [V], 0.8 [A] (máx.)
Módulo RTC DS1307	1	5 [V], 2.4 [mA]
Display LCD de 128x64	1	5 [V], 10 [mA]
Tarjeta PCB junto con Arduino	1	5 [V], 200 [mA]

De la tabla anterior podemos calcular la potencia que consumen todos los dispositivos, cabe recalcar que no siempre van a estar funcionando todos al mismo tiempo, pero por seguridad se calculará si así lo fuese, dando como resultado 23.79 [W] para una fuente de 12 [V] que como mínimo debe suministrar una corriente de 2 [A], por seguridad se ha optado por una fuente eléctrica de 12 [V] que puede suministrar 5 [A] como muestra la Figura 78.

Figura 78

Fuente de alimentación 12 [V] 5 [A]



Diseño esquemático y diseño CAD

El diseño esquemático esta referenciado en la sección de planos Anexos en la que se despliega toda la información concerniente a las conexiones electrónicas, en la Figura 79 se muestra un resultado previo final de la placa y en la Figura 80 se muestra un esquema general de las conexiones físicas, cabe recalcar que el ancho de pista mínimo es de 0.8 [mm] lo que permite un flujo de corriente máximo de 1.25 [A] considerando una placa de 0.5 [oz] o 17.5 [μ m] de espesor de cobre a temperatura ambiente.

Figura 79

Diseño CAD electrónico y resultados finales

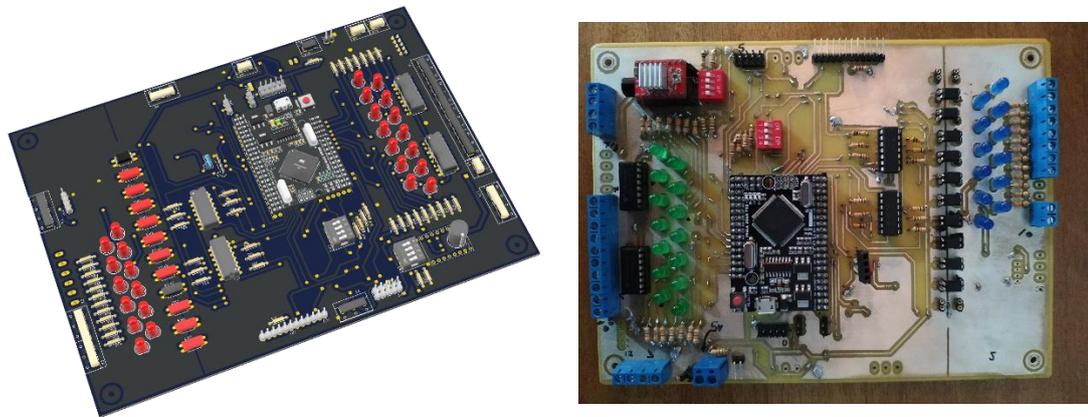
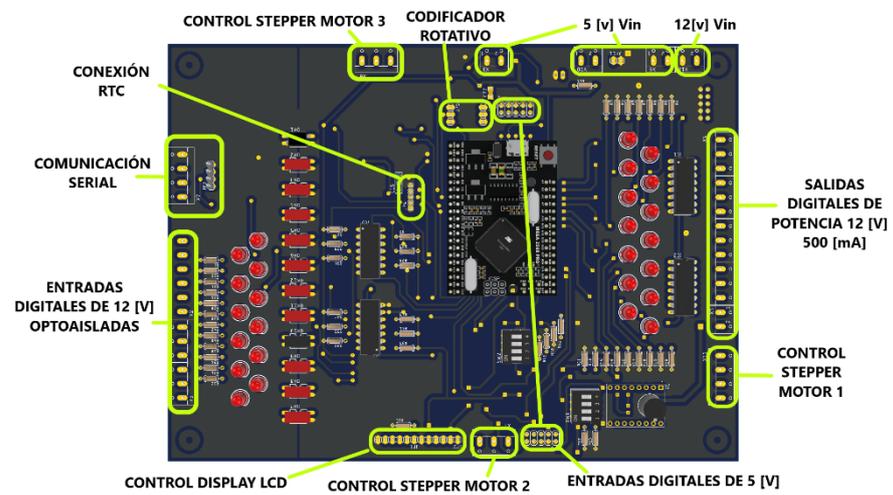


Figura 80

Conexiones de entrada y salida de la placa



Capítulo IV

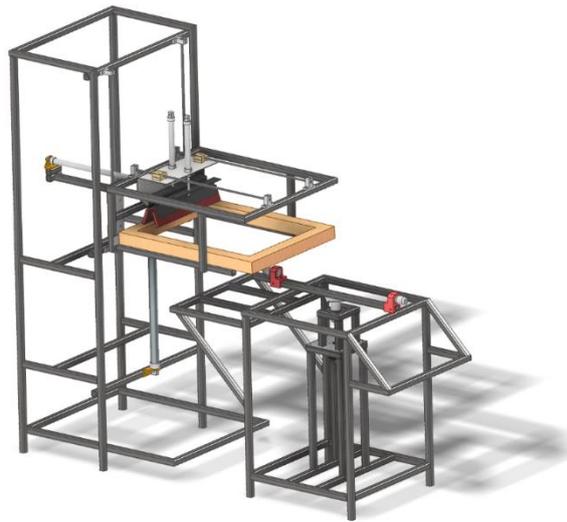
Integración de sistemas y automatización

Secciones fabricadas

El ensamblaje Figura 81 muestra a todas las secciones diseñadas en el capítulo anterior, los planos mecánicos correspondientes a todos los componentes y secciones mencionadas en dicho capítulo están referenciados en la sección de planos Anexos en el que se puede observar todos los detalles útiles para la fabricación de las partes mecánicas de la máquina, a continuación, se observan las secciones finalmente construidas detallando cuestiones de fabricación.

Figura 81

Ensamble completo de la máquina



Nota. Realizado en el software Autodesk Inventor 2021.

Las secciones que contienen el perfil cuadrado de acero estructural ASTM A36 de 20 [mm] de lado y 1.5 [mm] de espesor, fueron fabricadas bajo el proceso de soldadura MIG con alambre sólido de 0.8 [mm] de diámetro recubierto de cobre ER70S – 2 con los parámetros de 18 [V] y 30 [A] Figura 82, luego, todo agujero taladrado que mantenga relación con elementos que generen movimientos

presentan holguras con una tolerancia dimensional máxima de $+0.25$ [mm] en diámetro, esto con el fin de:

- Mantener el paralelismo y coaxialidad entre pares de ejes
- Evitar disturbios y vibraciones durante los movimientos
- Mejorar la vida útil de los rodamientos intervinientes

También se consideró el uso de escuadras magnéticas, calibradores y niveles esto con el fin de asegurar paralelismo y perpendicularidad en las estructuras soldadas.

Figura 82

Construcción de elementos estructurales principales



Nota. Las estructuras corresponden al carril de impresión, la mesa de trabajo y la estructura soporte.

Ensamblaje estructural

Figura 83

Fijación de ejes e instalación de carril de impresión



Nota. Ejes M10 verticales y soportes de aluminio con junta empernada.

Figura 84

Instalación de rodamientos lineales del carril de impresión



Nota. Rodamientos lineales SC10UU fijados a platina por junta empernada.

Figura 85

Instalación de cilindros neumáticos $\varnothing 16 \times 330$ y $\varnothing 25 \times 330$

**Figura 86**

Instalación de ejes guía y rodamientos lineales del carril de rastrillos



Nota. Importante conservar paralelismo de ejes la altura queda por defecto dado por los soportes de aluminio.

Figura 87

Fijación del par de cilindros neumáticos $\varnothing 16 \times 100$



Nota. Los cilindros tienen una sección roscada externa M16 para sujetarlo con la chapa metálica con una tuerca.

Figura 88

Instalación de los rastrillos de goma y sus respectivos ejes guía



Nota. La altura de los rastrillos es regulable gracias a dos tuercas que se fijan a disposición del operador.

Figura 89

Instalación de válvulas electroneumáticas y conexiones neumáticas



Figura 90

Fijación y conexión neumática de la unidad de mantenimiento

**Figura 91**

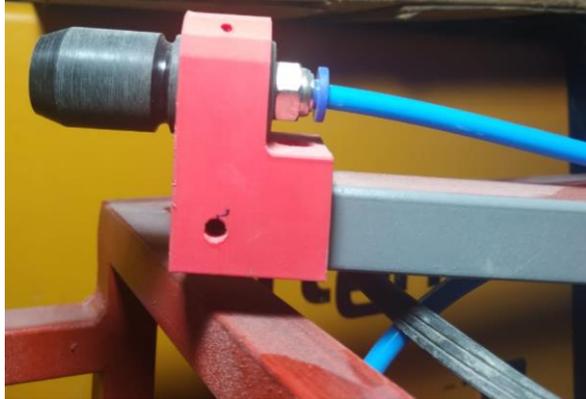
Instalación del motor a pasos con su acople flexible



Nota. La sujeción del rodamiento M30 es por medio de un pasador de apriete a fin de mantener coaxialidad con los demás elementos además fijación de la base y brazo porta material.

Figura 92

Instalación de las boquillas de inserción y sus acoples base

**Figura 93**

Conexiones neumáticas hacia las electroválvulas NC



Figura 94

Conexiones circuito de control, electroválvulas y otras

**Figura 95**

Instalación de botones y luces indicadoras



Figura 96

Sistema completamente construido



Tablero neumático

Se presentan los esquemas de conexión neumática que representan al tablero de control neumático, en la Figura 97 y Figura 98 se observan las válvulas de control de los cilindros neumáticos los cuales se instalarán en la parte posterior de la estructura soporte de la sección impresión.

Figura 97

Esquema de elementos electroneumáticos del tablero de control

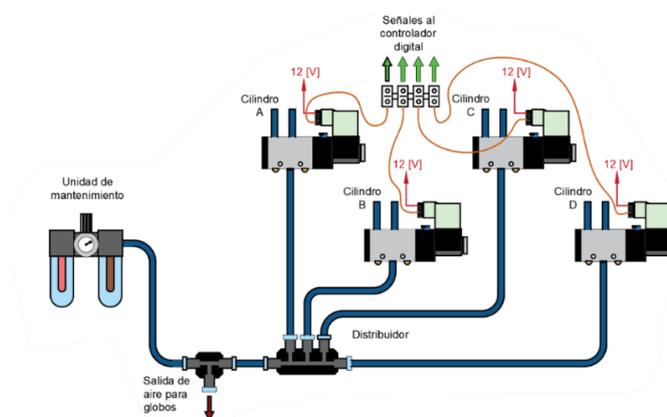


Figura 98

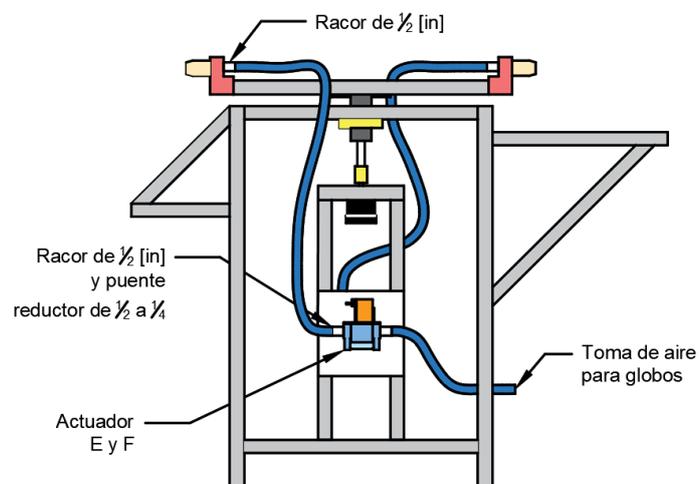
Conexiones físicas



En cuanto a la sección de inflado de globos en la mesa de trabajo Figura 99 dichos componentes se encuentran en la parte interior de la mesa de trabajo y su función es la del inflado de globos, dado que solo son esquemas representativos estos son complementados con los esquemas de control y potencia presentes en la sección de planos Anexos.

Figura 99

Conexiones neumáticas en la mesa de trabajo



Nota. Conexiones de boquillas de inflado hacia las electroválvulas NC.

Datos referentes a la automatización

Del análisis realizado en el Capítulo 3 – Diseño se obtienen datos relevantes que permitirán posteriormente configurar los parámetros de funcionamiento de la máquina, tales datos se describen a continuación:

- El material base del cual la máquina tomará para realizar el proceso de serigrafía es el globo de látex N.º 12.
- Las dimensiones máximas de impresión son de 20 [cm] x 26 [cm] en ancho y largo respectivamente.
- El ingreso y extracción del globo en la boquilla de inserción es completamente manual.
- La velocidad de producción mínima esperada de 3 [u/min] y la meta es de 3.5 [u/min] considerar que la persona a cargo de la máquina debe estar previamente entrenada para manejar dicha velocidad.
- El inflado del globo debe cumplir con el 70% de su capacidad máxima esto es cuando alcanza un radio aproximado de 10.45 [cm] en aproximadamente 3 [s] gracias a los actuadores E y F (válvulas solenoides NC).
- La tecnología usada en general corresponde a componentes electroneumáticos, para la generación de los distintos movimientos lineales, y el uso de un motor eléctrico para generar movimiento circular.
 - Los actuadores Cilindro A y Cilindro B son de diámetro $dp = 16$ [mm] y carrera $L = 100$ [mm] con una velocidad lineal aproximada de $v = 20$ [mm/s].
 - El actuador Cilindro C de diámetro $dp = 16$ [mm] y carrera $L = 330$ [mm] con una velocidad lineal aproximada de $v = 250$ [mm/s].

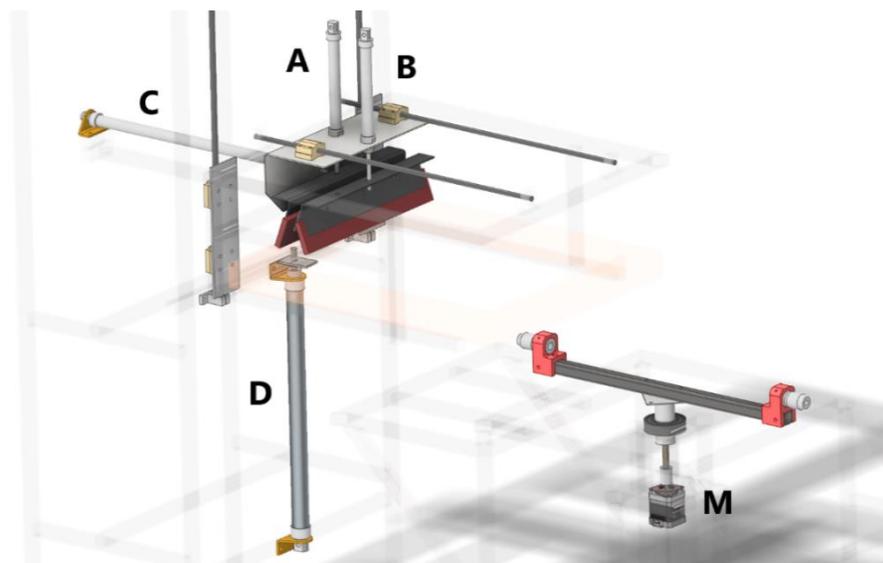
- El actuador Cilindro D de diámetro $dp = 25 [mm]$ y carrera $L = 330 [mm]$ con un tiempo de actuación de $t = 2 [s]$.
- El motor – actuador M con un torque de $T = 1.6 [kgf\ cm]$ con una velocidad de $\omega = 0.79 \left[\frac{rad}{s} \right]$.

Esquema de situación

La Figura 100 muestra la colocación de los diferentes actuadores descritos en el ítem anterior, esto para comprender mejor la acción de cada uno y en conjunto de estos elementos actuadores y proyectar su funcionamiento tal que, los actuadores A y B producen un movimiento vertical de los rastrillos y en conjunto con el actuador C permiten transferir la tinta, mientras el actuador D permite generar la superficie plana al presionar el globo, el actuador M desplazara al globo desde el operador hasta la zona de impresión, los actuadores E y F mostrados en la Figura 99 permiten el inflado del globo.

Figura 100

Disposición de actuadores dentro del sistema



Características de la automatización

Los ítems descritos a continuación muestran el funcionamiento en general del control sobre el proceso de toda la máquina.

- La máquina al encenderla prepara a sus actuadores colocándolos en sus posiciones iniciales.
- Una vez configurado los parámetros necesarios y seleccionada la opción “Inicio de proceso” del menú, el ciclo iniciará con la colocación manual del globo.
- Para iniciar un ciclo de trabajo se debe accionar el pulsador P1.
- Existe la opción iniciar el ciclo automáticamente el cual ya no requeriría accionar P1, a no ser que se requiera detener el proceso como explica el siguiente ítem.
- Al accionar el pulsador P2 el ciclo queda en modo espera, hasta reanudar nuevamente el proceso con el accionamiento de P1.
- Los finales de carrera de los cilindros neumáticos permiten conocer el estado de estos, además de medir los tiempos de recorrido.
- El sensor detector localizado en la sección de impresión determina la existencia de un globo al momento de inflarlo.
- Al accionar el pulsador P3 se da por finalizado todo el proceso, retornando los actuadores a su posición inicial y mostrando datos relevantes del proceso ejecutado.
- En caso de requerir reiniciar el proceso se debe elegir la opción marcada en la pantalla.

- Existe el pulsador Paro de Emergencia que cumple el mismo rol que el pulsador P2, pero además bloquea todas las opciones controlables dentro de la pantalla y panel de control.
- Otros:
 - Se tiene el interruptor de encendido.
 - Botón RESET direccionado al pin del mismo nombre de Arduino.
 - La visualización de datos y el menú de control se realiza en una pantalla LCD 128x64.
 - Un encoder rotativo tipo perilla permite la navegación por el menú de control.
 - Luces indicadoras y botones extra por futuras adiciones en el funcionamiento.

Panel de control

El panel que permitirá ejercer control sobre la máquina Figura 101 consta de siete diferentes componentes, cada uno presenta una función en específico como se detalla a continuación.

1. Pulsador paro de emergencia
 - a. Tipo hongo con enclavamiento normalmente cerrado
 - b. Parámetros máximos de operación: $V_{ac} = 240 [V]$, $I = 3 [A]$
 - c. Marca CGC ZB2-BE 102
 - d. IEC60947-5-1
2. Interruptor Switch de palanca
 - a. Paso de corriente admitido máximo $I=6[A]$ a 110 [V]

3. Leds 5mm
 - a. Indican los estados: encendido, paro de emergencia, modo espera y esperando instrucción, esta última visualizará en pantalla que pulsador debe accionar para seguir con un proceso específico.
4. Display LCD 128x64
 - a. Marca DIGOLE 12864ZW
5. Pulsadores
 - a. De 13 [mm] con retorno de muelle
 - b. De derecha a izquierda son P1, P2, P3, P4
6. Pulsadores
 - a. De 6 [mm] con retorno de muelle
 - b. Funcionalidades únicas para el control del menú en pantalla
7. Encoder rotativo
 - a. Funcionalidad única de navegación por el menú en pantalla

Figura 101

Panel de control de la máquina



Secuencia de trabajo

De manera general se muestra la serie de pasos requeridos para realizar una impresión serigráfica en la maquina desarrollada, para raseado único y doble raseado, considerar que se omitió el funcionamiento de pulsadores, finales de carrera y el accionamiento o mando "START" que inicia un ciclo, finalmente se observará en los diagramas que tanto la válvula E como la F se activan en la misma fase esto es debido a que no se establece en que válvula se encuentra el globo en ese instante.

Raseado único

1. Ingresar el globo en la boquilla de inserción (Sujetar) - Manual
2. Mover del globo a la sección de impresión (Rotar)
3. Preparar el globo inflándolo (Inflar)
4. Generar una superficie plana en el globo (Aplastar)
5. Bajar el rastrillo 1 previo al raseado (Posicionar)
6. Mover el rastrillo paralelo a la superficie de impresión "raseado" (Desplazar)
7. Subir el rastrillo 1 (Retornar)
8. Retirar la presión ejercida en el globo (Retornar)
9. Retirar el globo (Manual) y repetir la secuencia considerando que se debe usar el rastrillo 2.

Tabla 29

Tabla de secuencia de actuadores único raseado

Secuencia	Cilindro A	Cilindro B	Cilindro C	Cilindro D	Válvula E	Válvula F	Motor M
2	-	-	-	-	-	-	Rotar
3	-	-	-	-		Inflar	-
4	-	-	-	Aplastar	-	-	-
5	Posicionar		-	-	-	-	-
6	-	-	Desplazar	-	-	-	-
7	Retornar		-	-	-	-	-
8	-	-	-	Retornar	-	-	-
9	Repetir						

Doble raseado

1. Ingresar el globo en la boquilla de inserción (Sujetar) - Manual
2. Mover del globo a la sección de impresión (Rotar)
3. Preparar el globo inflándolo (Inflar)
4. Generar una superficie plana en el globo (Aplastar)
5. Bajar el rastrillo 1 previo al raseado (Posicionar)
6. Mover el rastrillo paralelo a la superficie de impresión "raseado" (Desplazar)
7. Subir el rastrillo 1 (Retornar)
8. Bajar el rastrillo 2 previo al segundo raseado (Posicionar)

9. Mover el rastrillo paralelo y en dirección contraria a la superficie de impresión “raseado” (Retornar)
10. Subir el rastrillo 2 (Retornar)
11. Retirar la presión ejercida en el globo (Retornar)
12. Retirar el globo (Manual) y repetir la secuencia.

Tabla 30

Tabla de secuencia de actuadores doble raseado

Secuencia	Cilindro A	Cilindro B	Cilindro C	Cilindro D	Válvula E	Válvula F	Motor M
2	-	-	-	-	-	-	Rotar
3	-	-	-	-	Inflar	-	-
4	-	-	-	Aplastar	-	-	-
5	Posicionar	-	-	-	-	-	-
6	-	-	Desplazar	-	-	-	-
7	Retornar	-	-	-	-	-	-
8	-	Posicionar	-	-	-	-	-
9	-	-	Retornar	-	-	-	-
10	-	Retornar	-	-	-	-	-
11	-	-	-	Retornar	-	-	-
12	Repetir						

Diagrama de funcionamiento

En esta sección se pretende desarrollar el diagrama funcional de espacio-fase y mando y así ver los cambios de estado de los diferentes elementos

actuadores en un ciclo de funcionamiento, luego en el diagrama de mando se registrarán los estados de los elementos detectores y generadores de señales.

Para el caso del raseado único Figura 102 es un diagrama resumido ya que se debe tomar en cuenta las fases de los cilindros A, B y C, pues si al inicio del ciclo el mando c_0 se encuentra en alto el funcionamiento de la fase $A \text{ xor } B$ debe corresponder únicamente al cilindro A y en caso contrario cuando inicialmente c_1 se encuentra en alto la fase $A \text{ xor } B$ corresponde al cilindro B.

Luego, en la Figura 103 se muestra el caso de doble raseado considerando un ciclo completo, para ambos diagramas se encuentra ausente los pulsadores Paro de emergencia, P2 y P3 pues estos en las conexiones eléctricas están direccionados a interrupciones por hardware permitiéndose actuar en cualquier instante, finalmente la fase $E \text{ xor } F$ implica que solo una de las válvulas se activará es decir en la que se encuentre el globo.

Figura 102

Diagrama de fases actuadores único raseado

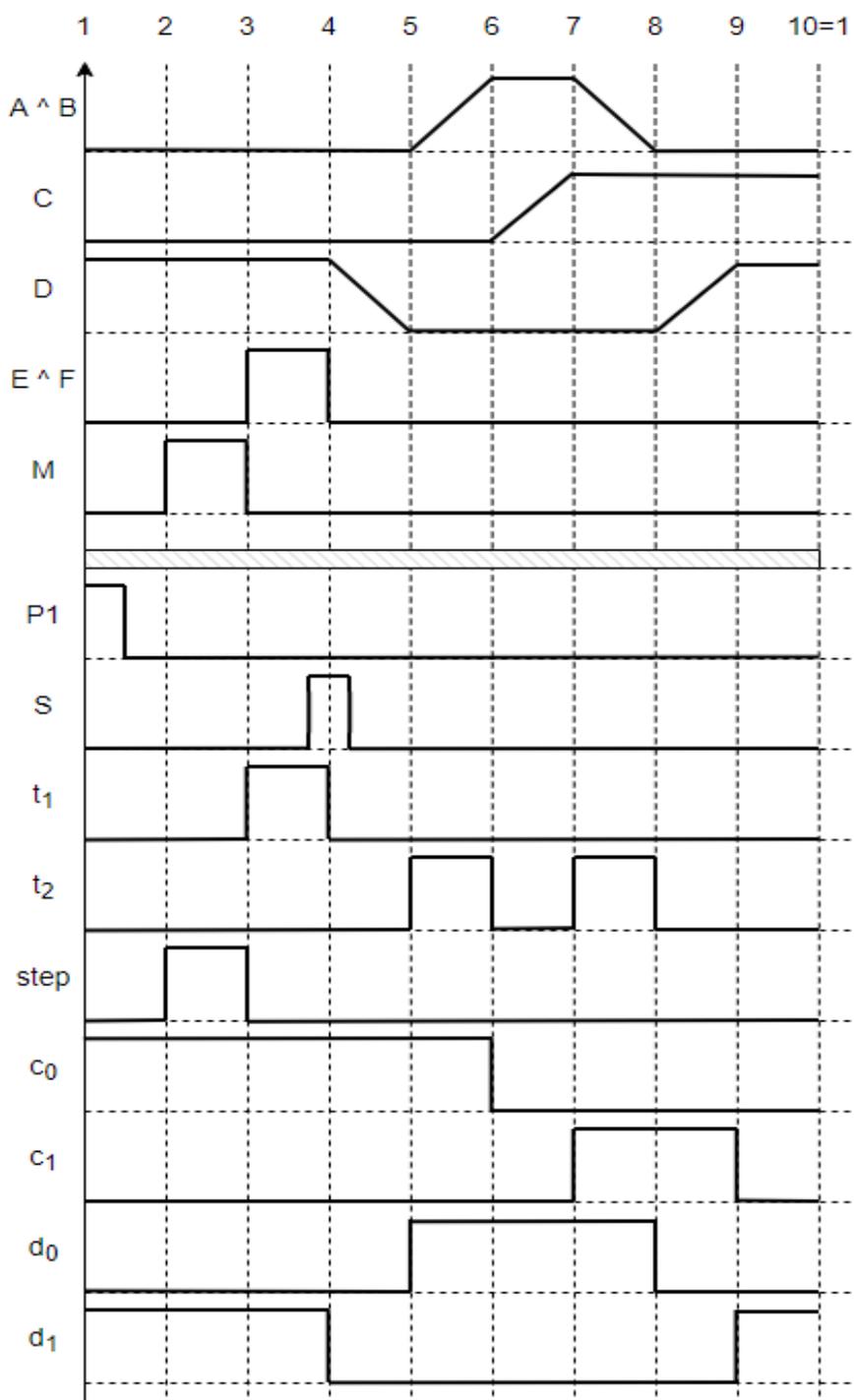
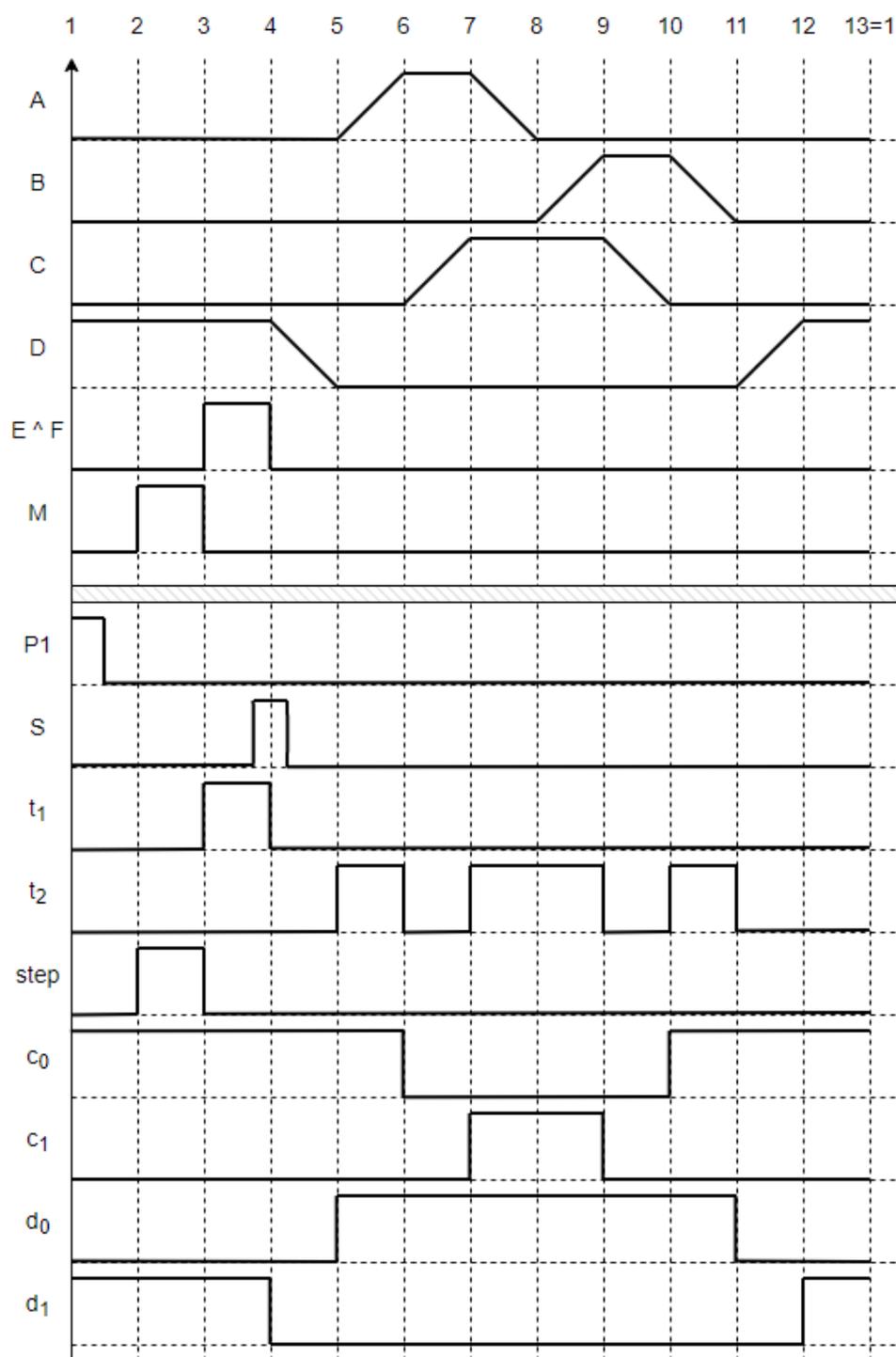


Figura 103

Diagrama de fases actuadores doble raseado



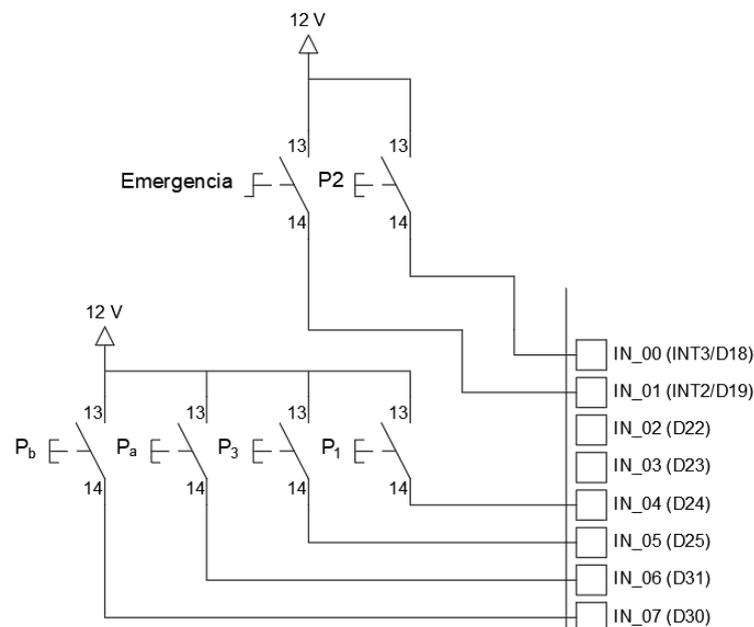
En cuestiones de algoritmos de programación, gracias a los diagramas anteriormente desarrollados ya podemos tener un planteamiento base de la estructura del programa.

Diseño del circuito de control

Como se puede observar en la Figura 104 el conjunto de pulsadores (entradas) están alimentadas por 12 [V_{cc}] y direccionadas directamente al controlador digital, un punto importante del esquema son las conexiones Emergencia y P2 pues estas están direccionadas a puertos de interrupción pues esto les permitirá actuar en cualquier instante durante la ejecución del programa.

Figura 104

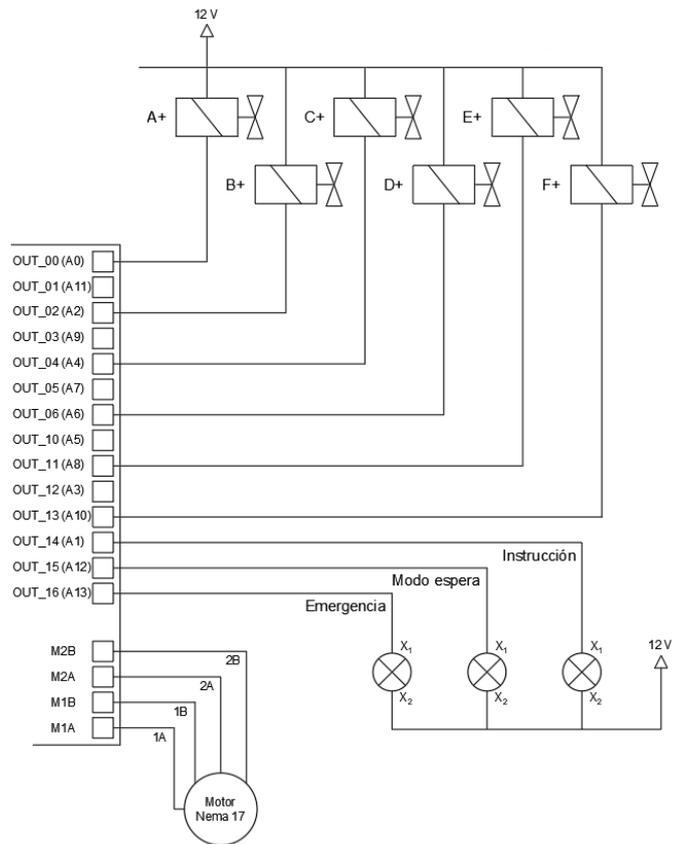
Esquema de conexiones de pulsadores



Luego en la Figura 105 se muestran las electroválvulas solenoide, cada conexión deja libre una salida de potencia, esto debido a que si se tiene algún inconveniente con el puerto de salida se pueda cambiar al siguiente puerto y no parar la producción, luego se muestran las conexiones a luces indicadoras y la conexión al motor NEMA 17.

Figura 105

Esquema de conexiones de salidas de potencia



Nota. Conexiones hacia solenoides de electroválvulas, motor a pasos y luces indicadoras.

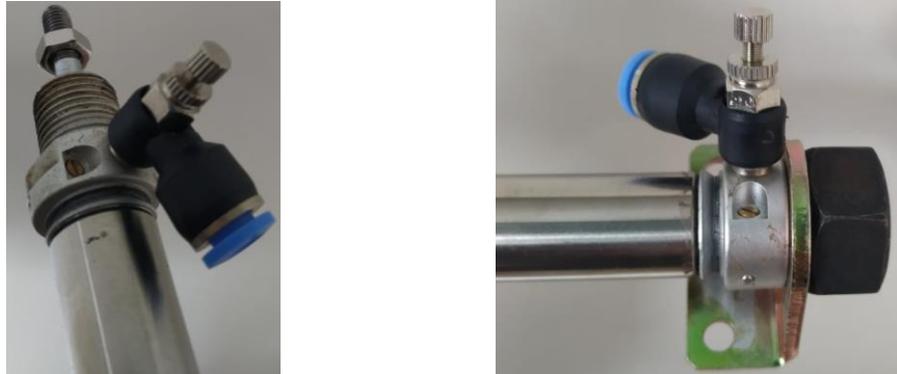
El plano completo y en detalle se encuentran en la sección de Anexos.

Manejo de actuadores

En todo el sistema actúan 2 tipos de actuadores, los cilindros neumáticos y el motor a pasos, como muestra la Figura 106 para el primer caso este cuenta con reguladores de caudal cuya función principal es controlar la velocidad de movimiento del vástago del cilindro, además se observa una cabeza de tornillo plana, su función es generar amortiguamiento al movimiento del cilindro al llegar tanto al inicio como al final de la carrera y así generar una desaceleración.

Figura 106

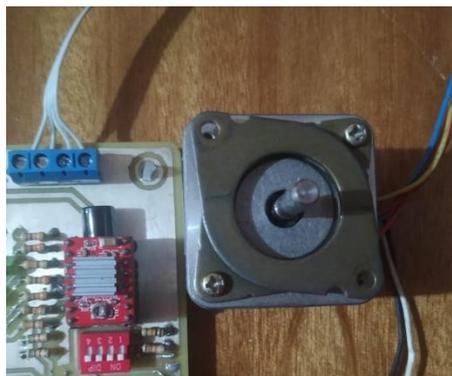
Conexiones de reguladores de caudal y amortiguador



Luego en la Figura 107 se muestra la conexión del motor a pasos, a la derecha se encuentra el controlador que es el responsable de gestionar los pulsos de potencia hacia el motor, acompañado del software es capaz de controlar la cantidad de pulsos, la razón de velocidad y aceleración, además de permitir el control en lazo abierto de la posición.

Figura 107

Motor a pasos y controlador A4988

**Menú de control**

Como se observa en la Figura 108 el menú constará de cinco componentes principales para un funcionamiento básico, la calibración del motor permitirá

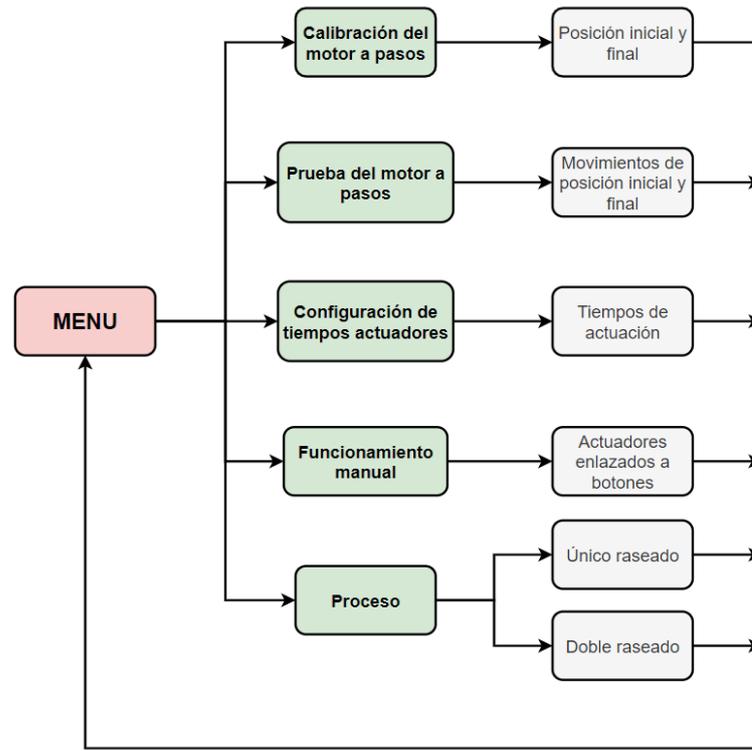
gestionar la posición cero del brazo porta material (donde el usuario ingresa el globo) y la posición final que es la zona de impresión.

La opción de prueba del motor a pasos activa el motor moviéndolo desde su posición inicial hasta la final continuamente esto para comprobar que los brazos porta-material llegan al destino solicitado.

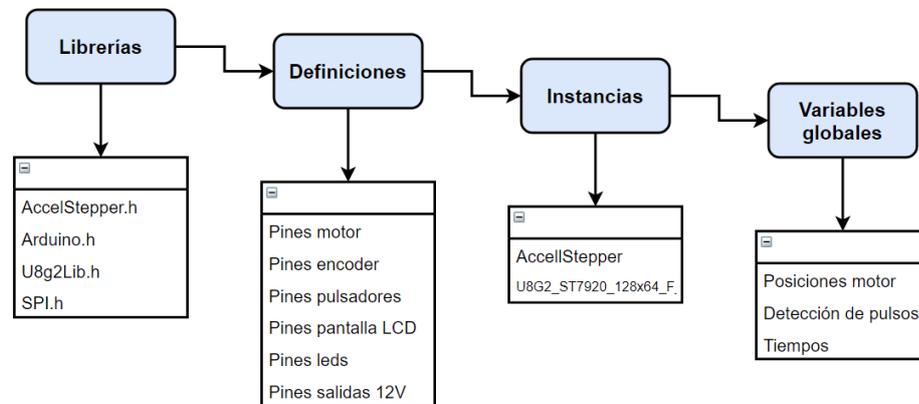
La configuración de tiempos de actuadores permite gestionar la duración de activación de un actuador, esto para cumplir la meta solicitada de producción, además nos sirve para regular las velocidades de los actuadores para cumplir dicha meta.

Una vez calibrado los tiempos, la opción de funcionamiento manual, permitirá observar si se están cumpliendo dichos tiempos además de detectar que el panel de control funciona correctamente ya que cada pulsador estaría asociado a un actuador.

Finalmente la opción proceso permitirá iniciar la operación de serigrafía cumpliendo según la opción requerida, todos las secuencias establecidas sea para único o doble raseado como se desarrolló en la Tabla 29 y la Tabla 30 respectivamente.

Figura 108*Esquema del menú de control***Algoritmo de control**

A continuación se muestran diagramas de flujo de secciones importantes del código desarrollado en la plataforma Arduino, cabe recalcar que el código completo se encuentra en la sección Anexos.

Figura 109*Encabezado del programa*

Nota. Las definiciones hacen referencia a los pines físicos del controlador ATmega 2560.

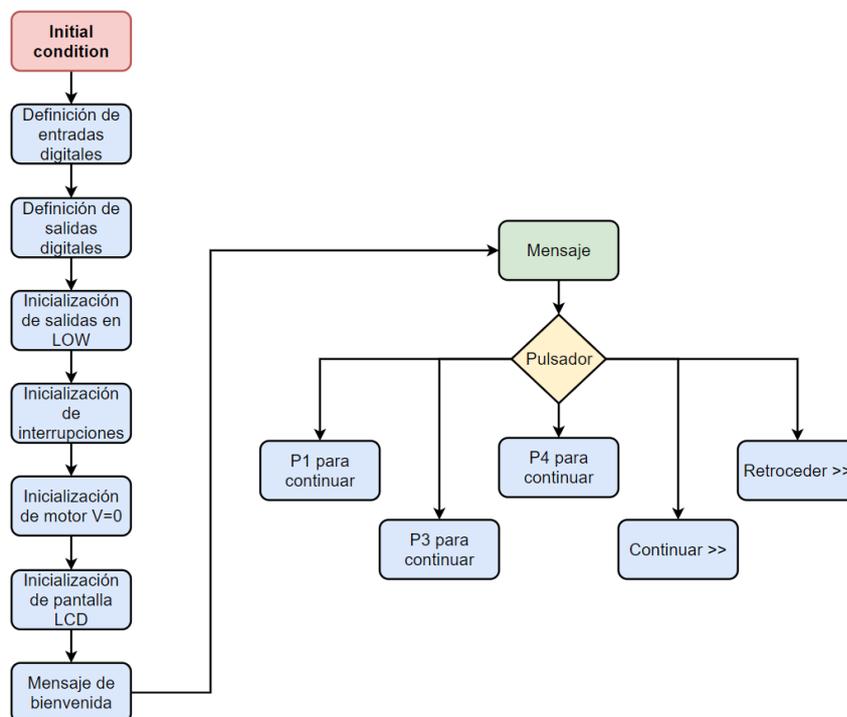
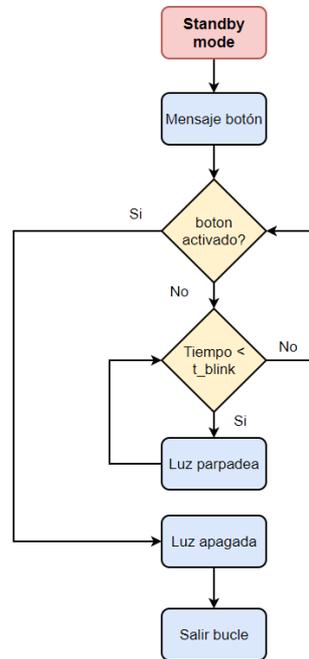
Figura 110*Función de configuración de condiciones iniciales*

Figura 111*Función de modo espera*

Nota. El sistema detiene su funcionamiento hasta accionar el pulsador indicado.

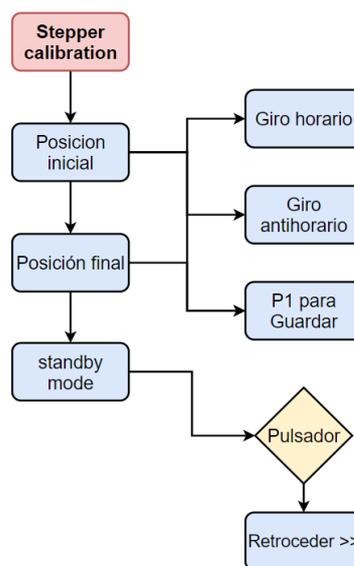
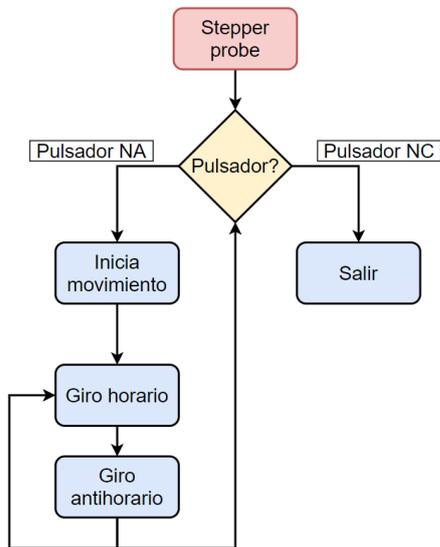
Figura 112*Función de calibración de posiciones del motor*

Figura 113

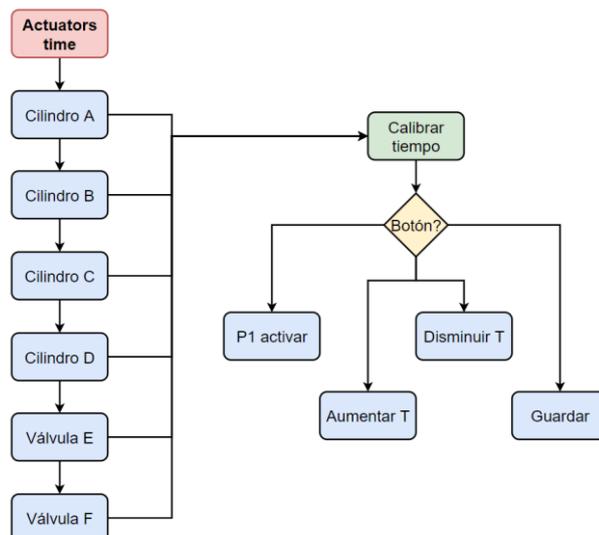
Función prueba de funcionamiento del motor



Nota. Una vez configuradas las posiciones del motor, esta función realiza movimientos de ida y vuelta respecto a las posiciones.

Figura 114

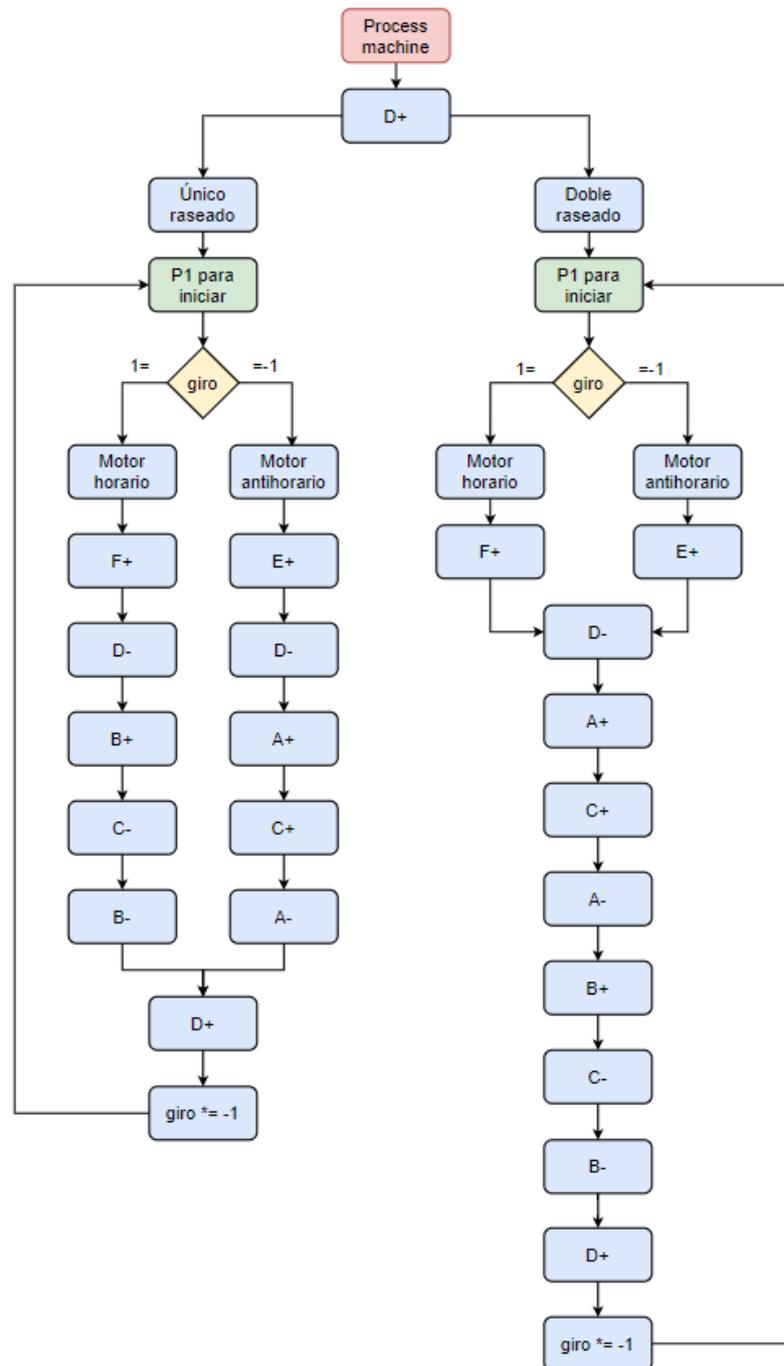
Función configuración de tiempos de funcionamiento



Nota. Los tiempos referentes a la activación de los actuadores neumáticos.

Figura 115

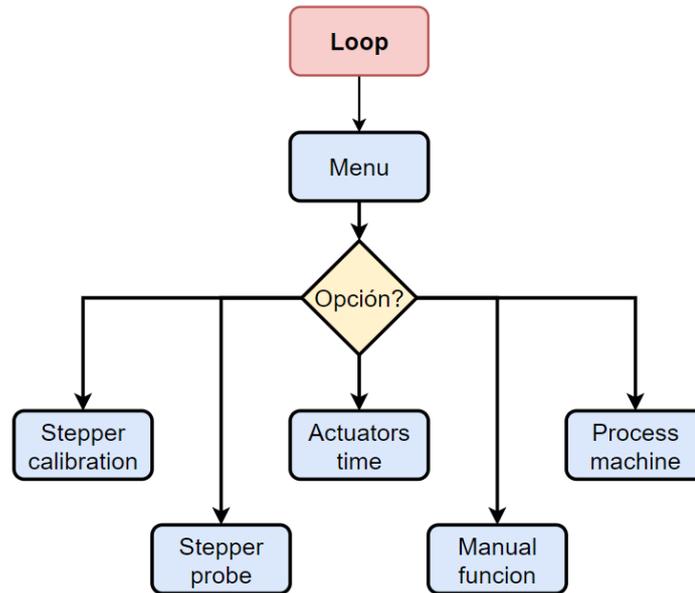
Función proceso de la máquina



Nota. Contiene al funcionamiento del proceso de serigrafía a único y doble raseado.

Figura 116

Función principal bucle infinito



Nota. En esta función se despliega el menú de opciones.

Capítulo V

Pruebas y resultados

El análisis que se presenta a continuación inicia con calibración de los elementos actuadores con el objetivo de cumplir la meta solicitada respecto al nivel de mejora en la producción, esto permitirá realizar mediciones de tiempos de producción que puede lograr la máquina.

Para esto se inicia con unas pruebas de calibración tomando como datos 40 medidas, posterior a ello se partirá de una muestra de cuarenta unidades de globo calibre N°. 12 de látex natural divididos en dos grupos de los cuales el primer grupo servirá para la para la medición del tiempo de proceso de único raseado y el segundo grupo se utilizará en la medición del tiempo de proceso del raseado doble y además de comprobar el funcionamiento en general.

Los datos y valoraciones numéricas se encuentran en la sección de Anexos.

Calibración de parámetros de actuadores

Actuador cilindros A y B – $\varnothing 16 \times 100$

Figura 117

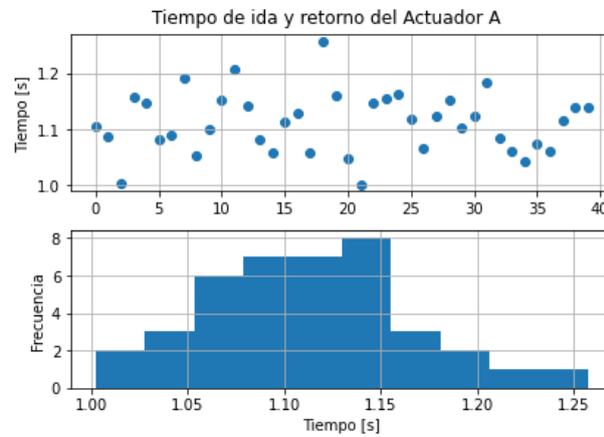
Estudio de movimientos de los elementos actuadores A y B



Nota. Las mediciones correspondientes permitirán conocer el tiempo de acción que posee cada actuador.

Figura 118

Histograma de las mediciones del tiempo de acción actuador A

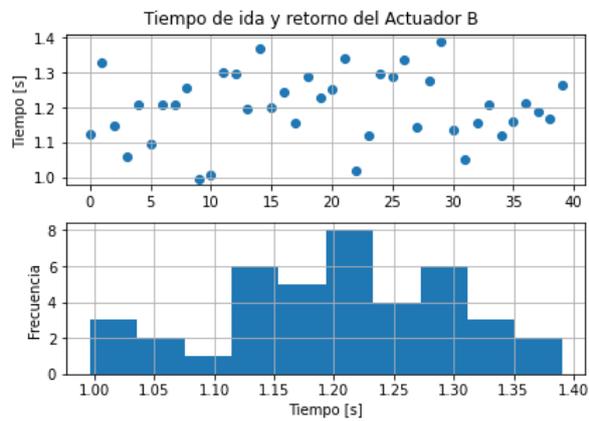


$$\text{Valor medio} = 1.11 \text{ [s]}$$

$$\text{Desviación estándar} = 0.05 \text{ [s]}$$

Figura 119

Histograma de las mediciones del tiempo de acción actuador B



$$\text{Valor medio} = 1.2 \text{ [s]}$$

$$\text{Desviación estándar} = 0.11 \text{ [s]}$$

Actuador cilindro C – $\varnothing 16 \times 330$

Figura 120

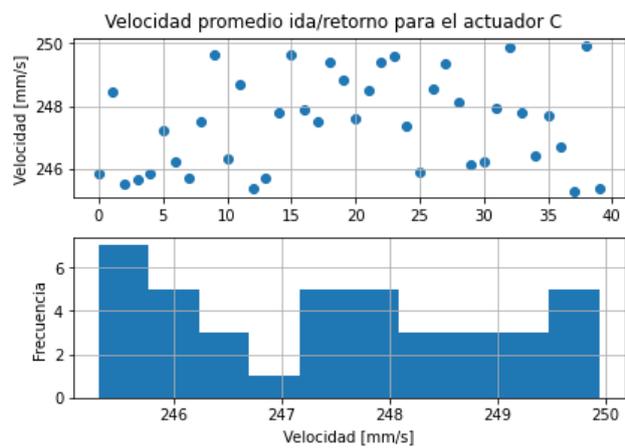
Estudio actuador C – parámetro velocidad de actuación



Nota. La velocidad queda comprendida desde su posición inicial hasta finalizar la carrera y viceversa cuando el movimiento es de retorno.

Figura 121

Histograma de las mediciones de la velocidad del actuador C



Valor medio = 247.47 [mm/s]

Desviación estándar = 2.3 [mm/s]

Actuador cilindro D – $\varnothing 25 \times 330$

Figura 122

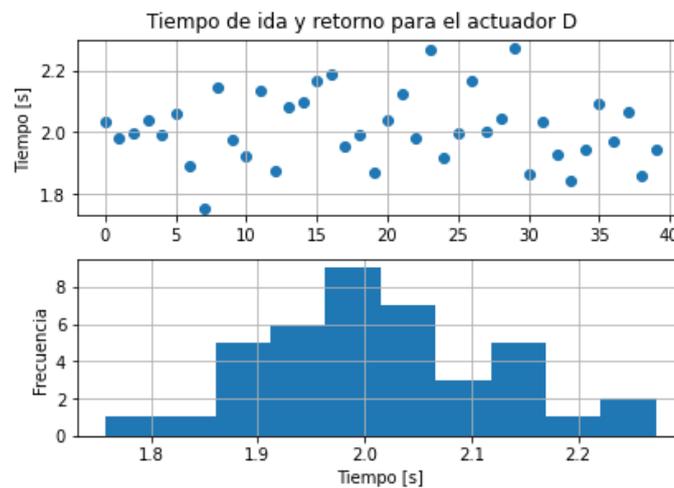
Estudio del tiempo de acción del actuador D



Nota. El tiempo medido corresponde a la medición del tiempo de movimiento tanto de ida como retorno del actuador.

Figura 123

Histograma de las mediciones de tiempo de acción del actuador D



$$\text{Valor medio} = 2.01 \text{ [s]}$$

$$\text{Desviación estándar} = 0.12 \text{ [s]}$$

Válvulas de paso E y F

Figura 124

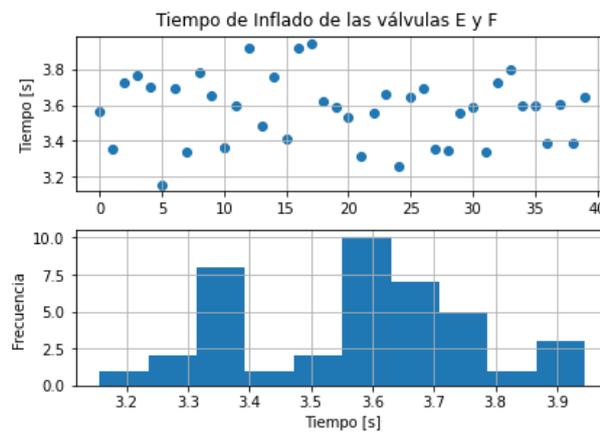
Electroválvulas normalmente cerradas inflando un globo



Nota. La medición corresponde al tiempo de inflado del globo hasta alcanzar el diámetro óptimo de impresión 70% del diámetro máximo.

Figura 125

Histograma medición tiempos de inflado de electroválvulas E y F



$$\text{Valor medio} = 3.5 \text{ [s]}$$

$$\text{Desviación estándar} = 0.17 \text{ [s]}$$

Pruebas de funcionamiento y tiempos de producción

De las pruebas realizadas anteriormente se puede establecer que sumado los tiempos totales Tabla 31 y considerando el modo de impresión de doble raseado se obtiene el resultado que se muestra a continuación.

Tabla 31

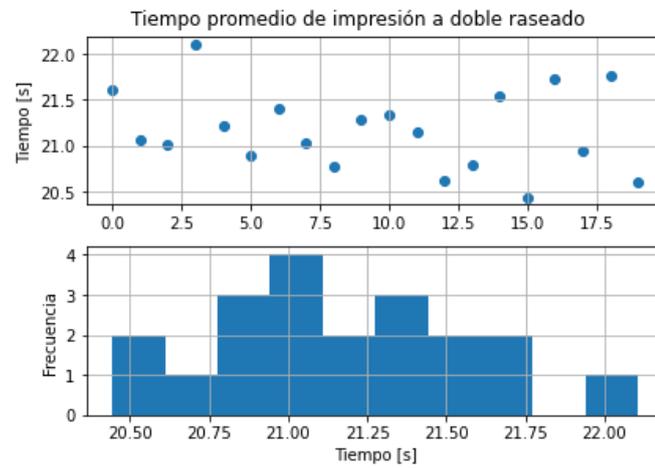
Tiempos de activación por secuencia doble raseado

Secuencia	Tiempo [s]
Ingreso y extracción de globo (manual)	5
M	3
E+ o F+	3.5
D-	2.01
A+	1
C+	1.3
A-	1.11
B+	1.2
C-	1.3
B-	1.2
D+	2.01
TOTAL	22.63

Si se esperaba un nivel de producción de 3 – 3.5 [*u/min*] que equivale que un globo debe estar listo en 20 [s] máximo.

Figura 126

Histograma mediciones tiempos de producción doble raseado



Valor medio = 21.16 [s]

Desviación estándar = 0.43 [s]

Luego al considerar el raseado de única pasada Tabla 32

Tabla 32

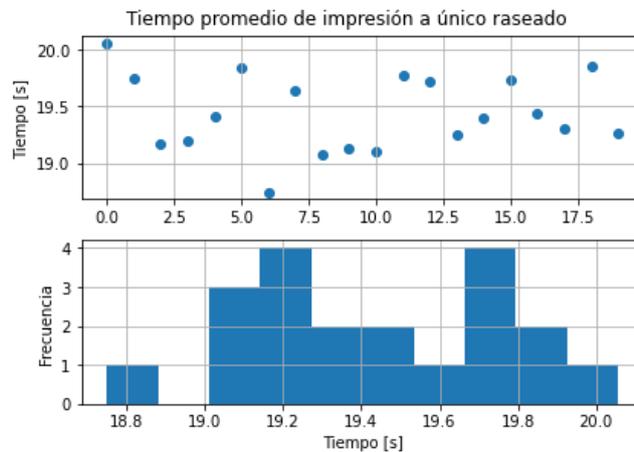
Tiempos de producción por secuencia único raseado

Secuencia	Tiempo [s]
Ingreso y extracción de globo (manual)	5
M	3
E+ o F+	3.5
D-	2
A+	1.11
C+	1.3
A-	1.11

Secuencia	Tiempo [s]
D+	2
TOTAL	19.02

Figura 127

Histograma mediciones tiempos de producción a único raseado



$$\text{Valor medio} = 19.44 \text{ [s]}$$

$$\text{Desviación estándar} = 0.34 \text{ [s]}$$

Pruebas de operación y productividad

Los tiempos medidos anteriormente están muy cerca de la meta de 20 [s] por unidad en el caso del único raseado y superan la meta en el caso de doble raseado, esto da indicio que el nivel de producción aun no es el esperado, pero se puede optimizar permitiendo el funcionamiento paralelo de algunas fases de las secuencias.

En el caso de único raseado se puede unir la secuencia D- y A+ Tabla 32 reduciendo el tiempo a $t_{1r} = 18.44 \text{ [s]}$, de la misma manera en el caso de doble raseado se pueden unir las fases (D- A+), (A- B+) y (B- D+) Tabla 33 obteniendo una

mejora mayor al reducir 3.31 [s] a la secuencia teniendo un tiempo final $t_{2r} = 17.85$ [s], dichos valores siguen siendo hipotéticos.

Para medir el nivel de productividad que la máquina puede lograr se considera a tres factores fundamentales: la calidad, el rendimiento y el tiempo de producción que darán una idea general de las capacidades de la máquina en cuestión y que están detallados en el capítulo II.

Para lo cual se planifica una producción con las siguientes consideraciones

- 2 personas intervinientes en la prueba
- Se considera una muestra de 200 unidades impresas las cuales se dividen en dos, siendo la primera para el proceso de único raseado y la segunda muestra para el proceso de doble raseado
- Si $t_{1r} = 18.44$ [s]/[u] en 100 [u] se espera que la prueba dure 30 [min] y 44 [s] en el caso de único raseado, luego si $t_{2r} = 17.85$ [s]/[u] en 100 [u] se espera que la prueba dure 29 [min] y 45 [s], tiempos que permitirán medir el rendimiento de la máquina.
- Se excluye el tiempo de preparación esto es, colocación del marco y de tinta

Entre los recursos a utilizar para las pruebas:

- 250 [gr] de tinte a base de solvente marca BUESTÁN.
- Tamaño de la impresión 15×9 [cm]
- Rastrillo de goma de 2 [cm] de espesor y 20 [cm] de largo con dureza shore A de 70.
- Globo de látex N.º 12

Figura 128

Materiales para prueba de producción



Rendimiento

Para el caso único raseado Tabla 47 de las mediciones se observó que del total de 100 unidades planificadas se logró fabricar totalmente las unidades dado que la producción se realizó en un tiempo de 29 minutos y 57 segundos siendo menor al establecido en las consideraciones anteriores.

$$Rendimiento_{1r} = \frac{100 [u_{fabricadas}]}{100 [u_{planificadas}]} * 100\%$$

$$Rendimiento_{1r} = 100 \%$$

Luego en el caso de doble raseado para un total de 100 unidades planificadas se logró producir 94 unidades esto debido a que el tiempo de producción real resultó en 29 minutos y 33 segundos y no se alcanzó a producir las unidades planificadas.

$$Rendimiento_{2r} = \frac{94 [u_{fabricadas}]}{100 [u_{planificadas}]} * 100\%$$

$$Rendimiento_{2r} = 94 \%$$

Calidad de producto

De las pruebas único raseado del total de 100 unidades producidas 7 unidades mostraron fallas de impresión, luego en el estudio de doble raseado en el

del total de 94 unidades fabricadas únicamente fallo una unidad obteniendo así los siguientes resultados.

$$Calidad_{1r} = \frac{(100 - 7) [u_{buenas}]}{100 [u_{total}]} * 100\%$$

$$Calidad_{1r} = 93 \%$$

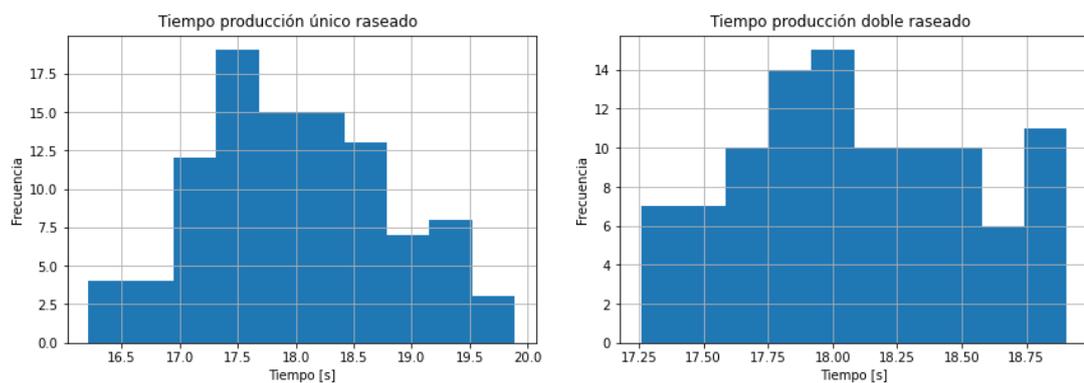
$$Calidad_{2r} = \frac{(94 - 1) [u_{buenas}]}{94 [u_{total}]} * 100\%$$

$$Calidad_{2r} = 98.94 \%$$

Finalmente, los tiempos de producción reales obtenidos de las mediciones muestran los comportamientos de la Figura 129 que indican un tiempo promedio en raseado único de $t_{1r} = 17.96 \pm 0.82[s]/[u]$ y en el caso de doble raseado $t_{2r} = 18.37 \pm 0.49 [s]/[u]$ de promedio de tiempo de producción, esto implica que en un minuto se pueden realizar completamente 3 unidades tanto en único como en doble raseado.

Figura 129

Histograma tiempos de producción único y doble raseado



Nota. Datos obtenidos de la Tabla 47.

A continuación algunas muestras de impresiones realizada por la máquina desarrollada.

Figura 130

Impresión fallida debido a exceso de presión de los rastrillos



Nota. Otro factor que intervino el defecto fue la baja viscosidad de la tinta utilizada.

Figura 131

Impresión fallida incompleta



Nota. Esto debido a una mala posición del globo frente al marco de pantalla.

Figura 132

Impresión con manchas de tinta



Nota. Debido a una falta de limpieza en la cara inferior del marco.

Figura 133

Impresión mejorada



Figura 134

Impresión en globo resultante

**Figura 135**

Resultados de los ensayos de producción



Capítulo VI

Análisis Financiero

Gastos generados

El análisis a continuación muestra cómo se maneja la empresa actualmente en el ámbito económico cuando dos artesanos intervienen en la labor de impresiones serigráficas de globos, luego se propone una proyección en el que el proceso serigráfico intervendría únicamente una persona que estaría a cargo de la máquina, para ello inicialmente en la Tabla 33 mostramos los gastos que incurren en la mano de obra.

Tabla 33

Gastos debido a pago de empleados

Mano de obra	Valor
Sueldo básico	\$420.00
IESS (11.15%)	\$46.83
Décimo tercero (1/12)	\$35.00
Décimo cuarto (1/12)	\$35.00
Vacaciones	\$17.50
Fondos de reserva (9.33%)	\$39.19
Total	\$593.52

Nota. Fuente: SIBELL.

Luego, en la Tabla 34 se describen los gastos mensuales debido a servicios públicos y privados que usan el ente empresarial.

Tabla 34*Gastos debido a servicios utilizados*

Gastos	Valor
Gastos de arriendo	\$450.00
Gastos servicios básicos	\$60.00
Gastos internet	\$35.00
Gastos telefonía fija	\$25.00
Total	\$570.00

Nota. Fuente: SIBELL 2019.

El análisis requerirá añadir también de los costos que genera la producción serigráfica de globos, como muestra la Tabla 35 se describe los costos promedios en tres casos: el promedio de los meses de producción normal, el promedio de los meses en los que la producción es baja y el promedio de los meses cuando existe una alta demanda y por ende una alta producción.

Tabla 35*Gastos debido a producción serigráfica en globos*

Insumo y materia prima	Costo unitario	Cantidad promedio	Costo total
Globos	\$0.02	41000	\$820.00
Tintes	\$8.50	300	\$2 550.00
Rastrillos de goma	\$9.00	4	\$36.00
Marco grabado	\$10.00	20	\$200.00
Total de un mes de producción normal			\$3 606.00
Globos	\$0.02	31000	\$620.00
Tintes	\$8.50	250	\$2 125.00

Insumo y materia prima	Costo unitario	Cantidad promedio	Costo total
Rastrillos de goma	\$9.00	4	\$36.00
Marco grabado	\$10.00	20	\$200.00
Total de un mes de producción baja			\$2 981.00
Globos	\$0.02	51000	\$1 020.00
Tintes	\$8.50	400	\$3 400.00
Rastrillos de goma	\$9.00	8	\$72.00
Marco grabado	\$10.00	30	\$300.00
Total de un mes de producción alta			\$4 792.00

Nota. Fuente: SIBELL 2019.

Como muestra la Tabla 36 se realiza una hoja de trabajo que indica la máxima producción que pueden realizar los dos empleados.

Tabla 36

Producción mensual de SIBELL

Consideración	Valor
Tasa de producción por minuto	2
Tasa de producción por hora	120
Tasa de producción en el día laboral	960
Producción mensual	21120
Número de empleados	2
Máxima cantidad de producción	42240

Nota. Fuente: SIBELL 2019.

Estado de resultados actuales

Si la unidad (globo serigrafiado) tiene un precio de venta final de \$ 0.15 se estima que las ventas en una producción normal (40000 unidades) genera un valor de ventas de \$6 000, en un mes de baja producción (30000 unidades) genera un valor de ventas de \$4 500 y en los meses de mayores ventas (50000 unidades) genera un valor de \$7 500 luego, en la Tabla 37 se muestra un desglose en meses de las utilidades después de impuestos generadas en cada mes.

Tabla 37

Estado de resultados mensuales 2019

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Ventas	\$4,500.00	\$6,000.00	\$4,500.00	\$4,500.00	\$6,000.00	\$6,000.00	\$4,500.00	\$4,500.00	\$4,500.00	\$6,000.00	\$6,000.00	\$7,500.00
Costo de venta	\$2,981.00	\$3,606.00	\$2,981.00	\$2,981.00	\$3,606.00	\$3,606.00	\$2,981.00	\$2,981.00	\$2,981.00	\$3,606.00	\$3,606.00	\$4,792.00
Utilidad bruta	\$1,519.00	\$2,394.00	\$1,519.00	\$1,519.00	\$2,394.00	\$2,394.00	\$1,519.00	\$1,519.00	\$1,519.00	\$2,394.00	\$2,394.00	\$2,708.00
Gastos operativos	\$1,130.51	\$1,130.51	\$1,130.51	\$1,130.51	\$1,130.51	\$1,130.51	\$1,130.51	\$1,130.51	\$1,130.51	\$1,130.51	\$1,130.51	\$1,130.51
Utilidad operativa	\$388.49	\$1,263.49	\$388.49	\$388.49	\$1,263.49	\$1,263.49	\$388.49	\$388.49	\$388.49	\$1,263.49	\$1,263.49	\$1,577.49
Gasto servicios	\$570.00	\$570.00	\$570.00	\$570.00	\$570.00	\$570.00	\$570.00	\$570.00	\$570.00	\$570.00	\$570.00	\$570.00
Utilidad antes de impuestos	\$-181.51	\$693.49	\$-181.51	\$-181.51	\$693.49	\$693.49	\$-181.51	\$-181.51	\$-181.51	\$693.49	\$693.49	\$1,007.49

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Régimen microempresas 2%	\$90.00	\$120.00	\$90.00	\$90.00	\$120.00	\$120.00	\$90.00	\$90.00	\$90.00	\$120.00	\$120.00	\$150.00
Utilidad real	\$-271.51	\$573.49	\$-271.51	\$-271.51	\$573.49	\$573.49	\$-271.51	\$-271.51	\$-271.51	\$573.49	\$573.49	\$857.49

Nota. Fuente: SIBELL 219.

Flujo de caja actual

En resumen el flujo de caja mensual actual relacionado a los ingresos generados de la venta de globos serigrafados se desenvuelve de manera como se muestra la Tabla 38 que como se observa hay meses de pérdida debido a la baja demanda los cuales son apoyados por el mes anterior pues compensan esa pérdida.

Tabla 38

Fujo de caja debido al estado de resultados

Flujo de caja	Valor
Enero	- \$271.51
Febrero	\$573.49
Marzo	- \$271.51
Abril	- \$271.51
Mayo	\$573.49
Junio	\$573.49
Julio	- \$271.51
Agosto	- \$271.51
Septiembre	- \$271.51
Octubre	\$573.49

Noviembre	\$573.49
Diciembre	\$857.49
Flujo neto anual	\$2 095.92

Nota. Fuente: SIBELL 2019.

Estado de resultados proyectados

Si consideramos el mismo precio de venta de la unidad (globo serigrafiado), con la misma demanda de producción pero con la intervención de un único empleado que opere la máquina, se establece una nueva hoja ruta de trabajo como muestra la Tabla 39.

Tabla 39

Proyección de producción mensual de SIBELL

Consideración	Valor
Tasa de producción por minuto	3.5
Tasa de producción por hora	210
Tasa de producción en el día laboral	1680
Producción mensual	36960
Número de empleados	1
Máxima cantidad de producción	36960

Se observa que un único empleado podría cubrir gran parte de la demanda mensual promedio normal trabajando en una jornada laboral luego, el estado de resultados Tabla 40 considerará el sueldo de un único empleado que corresponde a \$565.25 (costo total de la empresa) y un incremento del servicio eléctrico de \$40.00 resultando en un gasto total de servicios básicos de \$100.00, finalmente, el equipo

requerirá de mantenimientos y gastos en insumos que se proyecta en \$35.00 mensuales.

Tabla 40

Estado de resultados proyectados

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Ventas	\$4,500.00	\$4,500.00	\$4,500.00	\$4,500.00	\$6,000.00	\$6,000.00	\$4,500.00	\$4,500.00	\$4,500.00	\$6,000.00	\$6,000.00	\$7,500.00
Costo de venta	\$2,981.00	\$3,606.00	\$2,981.00	\$2,981.00	\$3,606.00	\$3,606.00	\$2,981.00	\$2,981.00	\$2,981.00	\$3,606.00	\$3,606.00	\$4,792.00
Utilidad bruta	\$1,519.00	\$2,394.00	\$1,519.00	\$1,519.00	\$2,394.00	\$2,394.00	\$1,519.00	\$1,519.00	\$1,519.00	\$2,394.00	\$2,394.00	\$2,708.00
Gastos operativos	\$565.25	\$565.25	\$565.25	\$565.25	\$565.25	\$565.25	\$565.25	\$565.25	\$565.25	\$565.25	\$565.25	\$565.25
Utilidad operativa	\$953.75	\$1,828.75	\$953.75	\$953.75	\$1,828.75	\$1,828.75	\$953.75	\$953.75	\$953.75	\$1,828.75	\$1,828.75	\$2,142.75
Gasto servicios	\$610.00	\$610.00	\$610.00	\$610.00	\$610.00	\$610.00	\$610.00	\$610.00	\$610.00	\$610.00	\$610.00	\$610.00
Mantenimientos	\$35.00	\$35.00	\$35.00	\$35.00	\$35.00	\$35.00	\$35.00	\$35.00	\$35.00	\$35.00	\$35.00	\$35.00
Utilidad antes de impuestos	\$308.75	\$1,183.75	\$308.75	\$308.75	\$1,183.75	\$1,183.75	\$308.75	\$308.75	\$308.75	\$1,183.75	\$1,183.75	\$1,497.75
Régimen microempresas 2%	\$90.00	\$120.00	\$90.00	\$90.00	\$120.00	\$120.00	\$90.00	\$90.00	\$90.00	\$120.00	\$120.00	\$150.00

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Utilidad real	\$218.75	\$1,063.75	\$218.75	\$218.75	\$1,063.75	\$1,063.75	\$218.75	\$218.75	\$218.75	\$1,063.75	\$1,063.75	\$1,347.75

Flujo de caja proyectado

Como se observa en la Tabla 41 mensualmente los flujos se vuelven positivos, esto genera un gran valor activo pues ya no existen meses de pérdida y por ende los meses que servían de apoyo ya no correrían con ese peso resultando en un incremento en el flujo de caja neto anual.

Tabla 41

Flujo de caja debido al estado de resultados proyectados

Flujo de caja	Valor
Enero	\$218.75
Febrero	\$1 063.75
Marzo	\$218.75
Abril	\$218.75
Mayo	\$1 063.75
Junio	\$1 063.75
Julio	\$218.75
Agosto	\$218.75
Septiembre	\$218.75
Octubre	\$1 063.75
Noviembre	\$1 063.75
Diciembre	\$1 347.75
Flujo neto anual proyectado	\$8 398.96

VAN & TIR

El Valor actual neto (VAN) del proyecto considera los flujos efectivos netos que resultan de la diferencia entre los ingresos y egresos periódicos mensuales, el flujo efectivo en principio debe ser mayor a la inversión que produce el proyecto en cuestión, para esto se hace un desglose de todos los gastos originados por la construcción de la máquina Tabla 42.

Tabla 42

Desglose de gastos en elementos para el desarrollo de la máquina

Cantidad	Descripción	Valor unitario	Valor total
2	Cilindro 16x100	\$ 32.72	\$ 65.44
1	Cilindro 16x330	\$ 59.21	\$ 59.21
1	Cilindro 25x330	\$ 81.02	\$ 81.02
2	Pies D16mm	\$ 3.91	\$ 7.82
2	Pies D25mm	\$ 4.79	\$ 9.58
6	Regulador de flujo M5x6mm	\$ 3.02	\$ 18.12
2	Regulador de flujo 1/8"x6mm	\$ 3.58	\$ 7.16
4	Electroválvula 5/2 1/8"	\$ 25.11	\$ 100.44
2	Electroválvula NC de paso	\$ 11.25	\$ 22.50
12	Racor codo 1/8"x6mm	\$ 0.91	\$ 10.92
8	Silenciador de bronce	\$ 0.88	\$ 7.04
18	Manguera 6x4mm	\$ 0.64	\$ 11.52
1	Unidad de mantenimiento	\$ 32.70	\$ 32.70
1	Distribuidor 5 salidas	\$ 1.80	\$ 1.80
1	Elementos varios neumática	\$ 61.51	\$ 61.51
1	Mini Arduino mega	\$ 13.19	\$ 13.19
1	Modulo XL4015	\$ 4.02	\$ 4.02
2	IC 74LC14	\$ 0.58	\$ 1.16
10	IC PC817	\$ 0.09	\$ 0.89
1	Motor a pasos	\$ 18.00	\$ 18.00
1	Fuente	\$ 14.00	\$ 14.00
4	Ejes M10x600mm	\$ 11.00	\$ 44.00

Cantidad	Descripción	Valor unitario	Valor total
4	SC10UU	\$ 6.25	\$ 25.00
4	SK10	\$ 6.02	\$ 24.08
1	Paro de emergencia	\$ 4.90	\$ 4.90
5	Pulsadores	\$ 1.20	\$ 6.00
1	Interruptor	\$ 1.50	\$ 1.50
1	Zócalo	\$ 0.17	\$ 0.17
3	Pulsadores	\$ 0.50	\$ 1.50
1	Electrónicos varios	\$ 16.20	\$ 16.20
1	Elaboración de placa PCB	\$ 29.00	\$ 29.00
2	Rastrillo de goma	\$ 9.41	\$ 18.82
8	Tubo cuadrado 3/4x1.5	\$ 6.75	\$ 54.00
1	Tornillería	\$ 15.66	\$ 15.66
4	Acople reductor 1/2" - 1/4"	\$ 3.50	\$ 14.00
6	Unión rápida 1/4"	\$ 1.79	\$ 10.74
1	Herramientas	\$ 20.00	\$ 20.00
1	Procesos de torneado	\$ 20.00	\$ 20.00
1	Impresiones de soportes	\$ 5.00	\$ 5.00
1	Filamento de soldadura	\$ 25.00	\$ 25.00
Total			\$ 989.64

También se toma en cuenta la mano de obra para la fabricación, ingeniería entre otros gastos inesperados Tabla 43.

Tabla 43

Desglose de costos debido a mano de obra e ingeniería

Cantidad	Descripción	Valor unitario	Valor total
1	Mano de obra	\$ 220.00	\$ 220.00
1	Ingeniería	\$ 420.00	\$ 420.00
1	Otros	\$ 150.00	\$ 150.00
Total			\$ 790.00

Resultando en una inversión final de \$1 779.64 que deben ser analizados con los resultados del flujo de caja proyectado como se muestra en la Tabla 44,

considerando una tasa del 10% mensual exigido a la inversión, finalmente se observa que en el cuarto mes se puede recuperar la inversión completa, obteniendo así un valor VAN positivo que indica recuperación de la inversión inicial, pago del 10% extra añadido a la inversión y genera beneficios.

Tabla 44

Análisis de la viabilidad del proyecto VAN TIR

Mes	Flujo de caja	Flujo acumulado
0	\$ -1,779.64	\$ -1,779.64
1	\$ 253.75	\$ -1,525.89
2	\$ 1,098.75	\$ -427.15
3	\$ 253.75	\$ -173.40
4	\$ 253.75	\$ 80.35
5	\$ 1,098.75	-
6	\$ 1,098.75	-
7	\$ 253.75	-
8	\$ 253.75	-
9	\$ 253.75	-
10	\$ 1,098.75	-
11	\$ 1,098.75	-
12	\$ 1,382.75	-
VNA	\$ 4,410.64	
VAN	\$ 6,190.28	
TIR	32%	

Finalmente, la Tasa Interna de Retorno (TIR) nos mostrará el valor de interés o tasa de rentabilidad que generará la inversión, en la Tabla 44 el valor resultante es mayor que la tasa de inversión del 10% solicitada al proyecto indicando una aceptación en el proyecto.

Capítulo VII

Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

- Del proceso manual serigráfico que inicialmente manejaba la empresa, con el diseño y construcción de la máquina se logra automatizar gran parte del proceso de raseado, permitiendo reducir la carga laboral del artesano y aumentando la tasa de producción como indican el resultado de las pruebas de funcionamiento, manteniendo la calidad y obteniendo un alto rendimiento de la producción.
- La arquitectura y funcionamiento de la máquina se basó de en gran medida del diseño y las mejores características de máquinas comerciales de bajo costo utilizadas para el mismo fin y también de la replicación de los movimientos de raseado que realizan los artesanos, algunas consideraciones sobre estudios relacionados ayudaron para para el estudio de la dinámica del sistema y concluir que para efectos de altas producciones la mejor opción es el uso de la electroneumática.
- Las pruebas de funcionamiento y la paralelización de algunas fases de las secuencias de activación de los actuadores neumáticos permitieron mejoras en los tiempos de producción obteniendo una media de 17.96 [s] por unidad y 18.37 [s] por unidad en único y doble raseado, siendo valores óptimos mejoran el nivel productivo actual.
- Finalmente, del proceso manual que conllevaba a la producción de 2 unidades por minuto, con el desarrollo de la máquina se pudo superar el nivel de producción promedio de 3.3 unidades por minuto resultando en una mejora del 65% al proceso inicial, siendo un indicio de que los procesos manuales que se manejan en microempresas ecuatorianas pueden ser

tecnificadas resultando en mejoras de rentabilidad, competitividad, expansión comercial entre otros.

Recomendaciones

- Actualmente la máquina maneja una producción de 3.3 unidades por minuto, para mejorar esta tasa de producción se recomienda recalibrar los tiempos de actuación con las funciones incluidas en el programa además de incrementar el flujo de aire a los actuadores y así obtener un mejor rendimiento y mayor productividad.
- La capacidad actual de la máquina es manejar 2 globos a la vez, para admitir más unidades, además de incluir los brazos porta-material se recomienda hacer uso de los slip-ring o anillos rozantes esto con el fin poder generar movimientos circulatorios continuos sin la preocupación del enredamiento de tuberías neumáticas o cables eléctricos.
- Para dar mayor valor agregado al producto final se recomienda incluir una nueva sección de impresión y así obtener impresiones con colores combinados aumentando el precio de venta final.

Referencias

- AAMSA. (2021). *Abastecedora de Aceros y Maquilas* . Obtenido de <http://www.aamsa.com/productos/placa/placa-a-36/>
- Anatol. (5 de mayo de 2017). *Choosing the right squeegees for your screen printing jobs*. Obtenido de <https://anatol.com/choosing-the-right-squeegees-for-your-screen-printing-jobs/>
- AraWorks. (2021). *Cómo comprobar la calidad del mallado en elementos finitos*. Obtenido de <https://araworks.es/como-comprobar-la-calidad-del-mallado-en-elementos-finitos/>
- Bohman. (2021). *Acero plata rectificado brillante barra redonda*. Obtenido de <https://bohman.com.ec/shop/product/acero-plata-rectificado-brillante-barra-redonda-12220?category=202#attr=7645,7657>
- Budynas, R., & Nisbett, K. (2008). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. México: Mc Graw Hill.
- Catspit. (17 de Febrero de 2021). *Catspit productions LLC*. Obtenido de <https://www.catspitproductionsllc.com/framematerials.html>
- Croma. (2020). *Tintas base solvente para serigrafía*. Obtenido de <https://cromaiberica.com/es/130-base-solvente>
- Digital, V. (26 de abril de 2016). *Precisión y resistencia: mallas para serigrafía*. Obtenido de <http://vision-digital.com.mx/2016/04/26/precision-y-resistencia-mallas-para-serigrafia/>
- DIPAC. (2021). *Tubo estructural cuadrado*. Obtenido de <https://www.dipacmanta.com/tubos/tubo-estructural-cuadrado-negro>

- DirectIndustry. (2021). *Automatic screen printing machine GW-BL-2*. Obtenido de <https://www.directindustry.com/prod/dongguan-hoystar-printing-machinery-co-ltd/product-111883-2221849.html>
- doeet. (2021). *Cómo calcular tu productividad OEE*. Obtenido de <https://doeet.es/noticias/documentos-tecnicos/como-calcular-tu-productividad-oe.html>
- Druckfarben, P. (2021). *Balloon printing ink LB for screen printing*. Obtenido de <http://www.gsb-wahl.de/product/balloon-printing-ink-lb-for-screnn-printing.html>
- e-Gizmo. (s.f.). *ZE-4F180*. Obtenido de https://www.microjpm.com/_files/200007504-caba4cbb4b/ZE-4F180%2012V%20Water%20Solenoid%20Valve%20Datasheet.pdf
- Epitran. (2021). *KY-040 Arduino rotary encoder user manual*. Obtenido de <https://www.epitran.it/ebayDrive/datasheet/25.pdf>
- Faine, B. (1991). *The New guide to screenprinting*. London: The Old Brewery.
- Ferrocortes. (2020). *Acero Plata*. Obtenido de <https://www.ferrocortes.com.co/download/FT-03-005-ACERO-PLATA.pdf>
- Fuerte, A., Herrera, M., & Vera, A. (2005). *Construcción, programación y simulación, de una máquina de serigrafía*. México: Instituto Politécnico Nacional.
- Hannifin, P. (2003). *Tecnología Neumática Industrial*. Jacareí.
- HardwareLibre. (2019). *Nema 17*. Obtenido de <https://www.hwlibre.com/nema-17/>
- Horvath, E., Torok, A., Ficzer, P., & Zador, I. (2014). Optimization of computer-aided screen printing design. *Acta Polytechnica Hungarica*, 44.

- Hoystar. (2021). *Automatic screen printing machine GW-BL-4*. Obtenido de <https://www.directindustry.com/prod/dongguan-hoystar-printing-machinery-co-ltd/product-111883-2238755.html>
- iberisa. (s.f.). *El "Aspect Ratio" en el Método de Elementos Finitos*. Obtenido de http://www.iberisa.com/soporte/femap/aspect_ratio.htm
- Jeskova, Z. (2012). Balloons revisited. *Physics Education*.
- Laguna, L. (2009). *Diseño y construcción de una impresora de serigrafía neumática para superficies planas de funcionamiento automático*. Riobamba: ESPOCH.
- López, R. (2019). *Diseño, cálculo y optimización de un sistema de manipulación de velos mediante análisis CFD*. Valencia.
- Macrokun. (27 de Abril de 2020). *Screen printing supplier*. Obtenido de <https://www.macrokun.com/News/screen-printing-frame/123.html>
- Macrokun. (27 de Abril de 2020). *Screen printing supplier*. Obtenido de <https://www.macrokun.com/News/screen-printing-mesh-news/155.html>
- Martí, V., Peñalver, J., & Portolés, J. (s.f.). Study of screen-printing application control variables and their influence on shades in tile. *QUALICER 96*, 13.
- Merritt, D. (1978). The pressure curve for a rubber balloon. *American Journal of Physics*.
- MicroSystems, A. (2021). *DMOS Microstepping Driver with Translator*. Obtenido de A4988: https://www.pololu.com/file/0J450/a4988_DMOS_microstepping_driver_with_translator.pdf
- Pololu. (2021). *A4988 Stepper Motor Driver Carrier*. Obtenido de <https://www.pololu.com/product/1182>

- Renedo, C. (2012). *Neumática Actuadores*. Obtenido de <https://personales.unican.es/reneoc/Trasperecias%20WEB/Trasp%20Neu/04%202%20Actuadores.pdf>
- ROME. (2021). *4V110-06 Electrovalvula neumatica 5/2 Puertos 1/8"*. Obtenido de <https://www.romecoindustrial.com/producto/electrovalvula-neumatica-4v110-06/>
- Sharp. (2021). *PC817X Series*. Obtenido de <https://www.farnell.com/datasheets/73758.pdf>
- Solé, A. (2007). *Neumática e Hidráulica*. Madrid: marcombo.
- ST. (2021). *ULN200X*. Obtenido de <https://www.st.com/resource/en/datasheet/uln2001.pdf>
- Stein, R. (1958). On the inflating of balloons. *Journal of Chemical Education*.
- Vanegas, L. (2018). Diseño de elementos de máquinas. En U. T. Pereira, *Diseño de elementos de máquinas* (pág. 210). Pereira: Editorial UTP.
- Vignola. (s.f.). *Válvulas de solenoide proporcionales*. Obtenido de <http://www.vignola.cl/assets/instrumentacion-04-06-valvulas-solenoide.pdf>
- WebPin. (23 de septiembre de 2019). *Jebes y Marcos*. Obtenido de http://cursodeserigrafia.webpin.com/478079_Jebes-y-Marcos.html
- Will, P., Raphael, A., & Gareth Jones. (2021). *The science of balloons part 1: Under pressure*. Obtenido de Mathematics of waves and materials: <https://www.mwmresearchgroup.org/the-science-of-balloons-part-1.html>
- XCPC. (2021). *4V/3V 100, 4A/3A 100 series*. Obtenido de <http://www.china-pneumatic.com/4V-3V-100-4A-3A-100-Series.html>
- Xlsemi. (2021). *XL4015*. Obtenido de Nota. Fuente: (MicroSystems, 2021)

Anexos

Tabla 45

Calibración de tiempo [s] de activación de actuadores neumáticos

Medición	Actuador A	Actuador B	Actuador C	Actuador D	Válvulas E y F
0	1.10	1.12	245.86	2.03	3.56
1	1.09	1.33	248.46	1.98	3.36
2	1.00	1.15	245.50	2.00	3.73
3	1.16	1.06	245.65	2.04	3.76
4	1.15	1.21	245.87	1.99	3.70
5	1.08	1.09	247.24	2.06	3.16
6	1.09	1.21	246.24	1.89	3.70
7	1.19	1.21	245.70	1.76	3.34
8	1.05	1.26	247.51	2.14	3.78
9	1.10	1.00	249.65	1.98	3.66
10	1.15	1.01	246.32	1.92	3.36
11	1.21	1.30	248.70	2.13	3.60
12	1.14	1.30	245.40	1.87	3.92
13	1.08	1.20	245.70	2.08	3.48
14	1.06	1.37	247.78	2.10	3.76
15	1.11	1.20	249.64	2.17	3.41
16	1.13	1.24	247.90	2.19	3.92
17	1.06	1.15	247.53	1.95	3.94
18	1.26	1.29	249.40	1.99	3.62
19	1.16	1.23	248.85	1.87	3.59
20	1.05	1.25	247.59	2.04	3.53
21	1.00	1.34	248.53	2.13	3.31
22	1.15	1.02	249.39	1.98	3.55
23	1.15	1.12	249.62	2.27	3.66
24	1.16	1.30	247.38	1.92	3.26
25	1.12	1.29	245.92	2.00	3.65
26	1.07	1.34	248.55	2.16	3.69
27	1.12	1.15	249.34	2.00	3.36
28	1.15	1.28	248.14	2.04	3.35

Medición	Actuador A	Actuador B	Actuador C	Actuador D	Válvulas E y F
29	1.10	1.39	246.12	2.27	3.55
30	1.12	1.14	246.22	1.87	3.59
31	1.18	1.05	247.96	2.03	3.34
32	1.09	1.16	249.86	1.93	3.73
33	1.06	1.21	247.78	1.84	3.80
34	1.04	1.12	246.42	1.95	3.59
35	1.07	1.16	247.71	2.09	3.59
36	1.06	1.21	246.72	1.97	3.39
37	1.11	1.19	245.31	2.07	3.60
38	1.14	1.17	249.94	1.86	3.39
39	1.14	1.26	245.36	1.94	3.65
Mean	1.11	1.20	247.47	2.01	3.57
SD	0.05	0.10	1.49	0.12	0.19

Nota. Tiempos medidos por medio de la función *millis()* Arduino y la activación de final de carrera respectivo.

Tabla 46

Tiempos (segundos) del proceso de único y doble raseado

Medición	Doble raseado	Único raseado
0	21.6	20.1
1	21.1	19.7
2	21.0	19.2
3	22.1	19.2
4	21.2	19.4
5	20.9	19.8
6	21.4	18.8
7	21.0	19.6
8	20.8	19.1
9	21.3	19.1
10	21.3	19.1
11	21.2	19.8
12	20.6	19.7

Medición	Doble raseado	Único raseado
13	20.8	19.3
14	21.5	19.4
15	20.4	19.7
16	21.7	19.4
17	20.9	19.3
18	21.8	19.9
19	20.6	19.3
Mean	21.2	19.4
SD	0.4	0.3

Nota. Las mediciones inician al presionar P1 y finalizan al siguiente ciclo de funcionamiento cuando nuevamente se presiona P1.

Tabla 47

Medición indicadores de productividad

	Tiempo 1r	Tiempo 2r	Rendimiento 1R	Rendimiento 2R	Calidad 1R	Calidad 2R
0	17.20	17.62	1	1	1	1
1	19.89	18.20	1	1	1	1
2	17.42	17.74	1	1	1	1
3	17.63	18.17	1	1	1	1
4	18.12	17.54	1	1	1	1
5	17.11	18.89	1	1	1	1
6	19.12	18.04	1	1	1	1
7	17.32	17.76	1	1	1	1
8	18.72	18.32	1	1	1	1
9	17.82	19.56	1	1	1	1
10	16.88	18.79	1	1	1	1
11	17.63	18.38	1	1	1	1
12	18.64	19.23	1	1	1	1
13	18.31	18.37	1	1	1	1
14	18.74	18.39	1	1	1	1
15	18.69	17.94	1	1	1	1

	Tiempo	Tiempo	Rendimiento	Rendimiento	Calidad	Calidad
	1r	2r	1R	2R	1R	2R
16	16.97	17.66	1	1	1	1
17	16.63	18.56	1	1	1	1
18	17.08	18.54	1	1	1	1
19	17.48	18.66	1	1	1	1
20	18.12	18.96	1	1	1	1
21	17.56	18.54	1	1	1	1
22	18.51	18.50	1	1	1	1
23	17.16	18.50	1	1	1	1
24	16.43	18.35	1	1	1	1
25	16.78	18.48	1	1	1	1
26	18.71	17.79	1	1	1	1
27	16.85	17.37	1	1	1	1
28	18.38	17.87	1	1	1	1
29	19.52	18.06	1	1	1	1
30	19.31	18.00	1	1	1	1
31	16.21	18.62	1	1	0	1
32	17.85	19.40	1	1	1	1
33	18.43	18.55	1	1	1	1
34	16.53	18.90	1	1	1	1
35	18.27	19.32	1	1	1	1
36	17.12	17.95	1	1	1	1
37	17.20	18.93	1	1	1	1
38	18.45	18.10	1	1	1	1
39	17.20	18.08	1	1	1	1
40	17.54	17.87	1	1	1	1
41	19.54	18.50	1	1	1	1
42	17.21	17.75	1	1	1	1
43	18.08	18.09	1	1	1	1
44	17.55	18.06	1	1	1	1
45	18.29	18.43	1	1	1	1
46	18.43	18.38	1	1	1	1
47	16.42	17.76	1	1	1	1
48	17.44	17.56	1	1	1	1
49	18.11	18.07	1	1	1	1

	Tiempo	Tiempo	Rendimiento	Rendimiento	Calidad	Calidad
	1r	2r	1R	2R	1R	2R
50	19.89	17.87	1	1	1	1
51	17.77	18.11	1	1	1	1
52	18.80	17.68	1	1	0	1
53	18.65	18.79	1	1	1	1
54	17.56	17.57	1	1	1	1
55	17.36	17.70	1	1	1	1
56	19.41	18.69	1	1	1	1
57	19.17	18.11	1	1	1	1
58	18.79	17.93	1	1	1	1
59	18.37	18.41	1	1	1	1
60	17.26	17.81	1	1	1	1
61	17.96	17.87	1	1	1	1
62	17.35	18.18	1	1	1	1
63	17.82	18.77	1	1	1	0
64	17.79	17.63	1	1	1	1
65	19.06	18.89	1	1	1	1
66	18.57	17.90	1	1	1	1
67	18.85	18.29	1	1	1	1
68	17.77	18.54	1	1	1	1
69	17.44	18.80	1	1	1	1
70	17.49	17.63	1	1	1	1
71	18.11	18.53	1	1	0	1
72	18.76	18.27	1	1	1	1
73	18.18	17.94	1	1	1	1
74	18.85	18.96	1	1	1	1
75	19.24	17.76	1	1	0	1
76	18.52	17.79	1	1	1	1
77	18.20	18.15	1	1	1	1
78	17.53	18.79	1	1	1	1
79	17.98	17.90	1	1	1	1
80	19.18	19.00	1	1	1	1
81	18.21	18.58	1	1	1	1
82	17.48	17.99	1	1	1	1
83	17.19	18.72	1	1	1	1

	Tiempo	Tiempo	Rendimiento	Rendimiento	Calidad	Calidad
	1r	2r	1R	2R	1R	2R
84	18.08	17.82	1	1	1	1
85	17.50	17.29	1	1	1	1
86	17.94	19.10	1	1	1	1
87	17.74	18.90	1	1	1	1
88	17.34	18.45	1	1	1	1
89	19.30	18.82	1	1	1	1
90	19.07	17.95	1	1	1	1
91	18.16	18.27	1	1	0	1
92	17.78	17.87	1	1	1	1
93	17.96	18.27	1	1	1	1
94	19.50	-	1	-	0	-
95	17.96	-	1	-	1	-
96	17.12	-	1	-	1	-
97	17.50	-	1	-	1	-
98	17.95	-	1	-	1	-
99	17.84	-	1	-	0	-
Sum	1796.4	1735.83	100	94	93	93
Medi	17.96	18.37				
SD	0.82	0.49				

Nota. El valor de 1 indica válido y el valor de 0 indica rechazado.