





Planta piloto para compactación de cartón Cardboard compaction pilot plant

U. A. Hernández-González ^a, F. D. Mirelez-Delgado ^{a,*}, M. F. Delgado-Pamanes ^a, A. M. Perales-Avila ^a,
L. A. Ramírez-García ^a

^aIngeniería Mecatrónica, Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería Campus Zacatecas, 98160, Zacatecas, Zacatecas, México.

Resumen

El diseño y la construcción de un prototipo de compactadora de cartón son detallados en este documento. En comparación con los modelos comerciales actuales, se busca reducir notablemente el costo de producción y permitir un buen volumen de trabajo. Se contará con un sistema de potencia hidráulico y un armazón que la hará adecuada para uso en exteriores. La compactadora será controlada mediante una interfaz humano-máquina que mostrará en todo momento las variables de interés, como el peso actual en el prototipo y el tiempo de operación, así como la presión aplicada haciendo uso de instrumentación adecuada. Finalmente, el bloque comprimido podrá ser eyectado mediante un sistema de cadenas. El desarrollo del proyecto se basa en la metodología de diseño mecatrónico y se describen las pruebas realizadas al sistema, así como los resultados y las conclusiones.

Palabras Clave: Automatización, cartón, cartón compactado, control, máquina de estados, reciclaje.

Abstract

The design and construction of a prototype cardboard compactor is detailed in this document. Compared to current commercial models, it is intended to significantly reduce the cost of production and allow a good volume of work. It will have a hydraulic power system and a frame that will make it suitable for outdoor use. The compactor will be controlled by a human-machine interface that will display at all times the variables of interest, such as the current weight in the prototype and the operating time, as well as the pressure applied using appropriate instrumentation. Finally, the compressed block can be ejected by means of a chain system. The development of the project is based on the mechatronic design methodology and the tests carried out on the system are described, as well as the results and conclusions.

Keywords: Automation, cardboard, cardboard compacted, control, state machine, recycling.

1. Introducción

La creciente generación de residuos marca una grave problemática para la sociedad y para el ambiente (Lara Corro, 2019), por ejemplo en (Odriozola, 2010) se analiza el impacto ambiental de la producción de papel. Por otro lado el desarrollo de medidas de reducción y reutilización de desechos otorgan una infinidad de ventajas, afectando de manera positiva a sectores económicos, logísticos, de salud, cuidado del medioambiente e incluso de relaciones sociales en una región (Yuste, 2014). Los principales métodos de reducción de residuos que existen actualmente involucran herramientas de escala industrial con un alto coste, limitando mucho su alcance, especialmente para empresas pequeñas o que no manejan volúmenes tan elevados de

desecho para encontrar asequible dicha inversión, las cuales se ven obligadas a buscar alternativas menos amigables tanto para el medioambiente como para la sociedad y la propia empresa (Celis, 2018; Flores López, 2021).

Por otro lado, la excesiva producción de residuos por procedimientos industriales y la vida cotidiana es un problema importante en el estado de Zacatecas, debido a que generan cantidades enormes de cartón cada año, mediante procesos como la elaboración de cerveza, pisos cerámicos, distintos procesos de empaquetado, etcétera. Zacatecas es una de las principales exportadoras de cerveza a nivel internacional, teniendo un impacto significativo en la economía regional y nacional. La creación de herramientas y maquinaria que faciliten, no solo la creación, sino el aprovechamiento de recursos por parte de empresas re-

* Autor para correspondencia: fmirelezd@ipn.mx

Correo electrónico: uahernandez@ipn.mx (Umanuel Azazael Hernández-González), fmirelezd@ipn.mx (Flabio Darío Mirelez-Delgado), mfdelgadop@ipn.mx (Miguel Fernando Delgado-Pamanes), aperalesa1700@alumno.ipn.mx (Anel Madai Perales-Avila), iramirezg1708@alumno.ipn.mx (Luis Antonio Ramírez-García).

Historial del manuscrito: recibido el 27/06/2023, última versión-revisada recibida el 21/08/2023, aceptado el 07/08/2023, publicado el 30/11/2023. **DOI:** <https://doi.org/10.29057/icbi.v11iEspecial4.11337>



gionales es importante para el desarrollo económico del estado. En la planta de Zacatecas de Grupo Modelo se producen 24 millones de hectolitros al año, de los cuales 30 % son para exportación (Celis, 2018). La excedente producción que se tiene ocasiona la generación de desechos, por ejemplo, solo en el 2017, la empresa Grupo Modelo generó un millón, veintitrés mil quinientos ochenta y dos toneladas de residuo, el cual se componía principalmente de bagazo, plástico, vidrio y cartón (Sierra, 2013).

Los problemas ambientales en el área metropolitana de Zacatecas-Guadalupe son complejos y, a menudo, un factor de inestabilidad social y ecológica. El estado de Zacatecas genera aproximadamente 370,000 toneladas de residuos sólidos al año, de los cuales el 56 % se concentra en la zona metropolitana de Zacatecas-Guadalupe (Gobierno del Estado, 2017).

A un nivel nacional no se debe despreciar tampoco la enorme producción de basura que produce cada individuo de manera cotidiana (Fernández Arvizu, 2011). De acuerdo con proyecciones de 2015, cada habitante produce 1.040 kg diarios de basura, lo que representa 46 millones de toneladas al año, siendo el cartón y el PET las principales (Robles, 2007). Entre las causas principales está la incipiente cultura de separación y el reducido número de plantas tratadoras, esto debido a la práctica inexistencia de un mercado de reciclaje en el país (IPN, 2017). Esto se traduce en que diariamente cada hogar genera un promedio de 4 pesos, lo que para ciudades grandes como Guadalajara equivale a 5.6 millones de pesos diarios de residuos, de éstos un 41 % podría aprovecharse, cada kg de residuo contiene aproximadamente un 34 % de papel y cartón (Rodríguez, 2016).

La generación de empresas locales es una de las principales fortalezas económicas en cualquier región. El hecho de que pequeñas productoras puedan aprovechar el cartón desechado por multinacionales beneficia a la economía tanto del país, como familiar (Mendezcarlo Silva, 2011). Estas empresas recicladoras conforman un sector importante dentro de la industria, por lo que la entrega y procesamiento de materiales es clave (Tapia Ibarra *et al.*, 2020). Dentro de la variedad de desechos se encontró el cartón, el cual debe ser compactado antes de su posterior transporte y procesado. Las compactadoras juegan un rol esencial, puesto que su utilidad es la forma más eficiente para el manejo de materiales como el cartón. Sin embargo, las que se encuentran en el mercado suelen ser muy costosas rondando cerca de los 130 mil pesos mexicanos y no suelen adaptarse a las necesidades de las empresas.

En el presente documento se expone el diseño y construcción de una planta piloto de compactación capaz de comprimir hasta 20 kg de cartón y agruparlos en pequeños bloques; esta solución, además de facilitar el reciclaje del material, facilita su transporte, pues desechos como el cartón son difíciles de reciclar por el gran espacio que ocupan, pudiendo sus contenedores llevar hasta un 65 % de aire (Recytrans, 2014).

2. Metodología

Para el desarrollo de este proyecto se decidió usar la metodología de diseño mecatrónico ya que además de obtener buenos resultados en proyectos de robótica como en (Dutra *et al.*, 2008; Carvajal Rojas y Téllez Garay, J. P., 2010; Carvajal Rojas

et al., 2013; Ortiz Dominguez *et al.*, 2019) también se ha aplicado a proyectos de índole ambiental como en (Leyes Sánchez y Penuela Meneses, 2022; Gallegos, 2021). Las etapas de esta metodología aplicadas al desarrollo de una compactadora piloto se detallan a continuación.

2.1. Identificación de necesidades

En la industria, los residuos de cartón son un gran problema pues cada día se generan toneladas de estos por comunidad, esto origina la necesidad de desarrollar tecnologías asequibles para una mayor parte de población. De igual manera, dada su baja densidad, el cartón en particular siempre ha sido un residuo difícil de transportar. Para el desarrollo de la compactadora se lograron identificar las principales necesidades como un bajo costo, un tamaño aproximado de 70 cm de ancho, 180 cm de alto y 80 cm de fondo, así como la posibilidad de generar bloques fácilmente transportables; todo esto de manera repetible para mayor eficiencia, manteniendo en todo momento medidas de seguridad.

2.2. Análisis del problema

De acuerdo con la identificación de necesidades y requerimientos de la máquina, se identifican las funciones que se deben diseñar para un correcto desempeño. Para ello, siguiendo la metodología de diseño mecatrónico, se utilizó el lenguaje de modelado IDEF0, que permite definir el comportamiento de la planta.

Necesidades de la planta piloto:

1. Compactación de cartón: que la máquina pueda compactar el cartón introducido en cada ciclo de trabajo, hasta un límite de 20 kg.
2. Sistema de eyección: poder eyectar el material de la máquina una vez finalizado el ciclo de trabajo.
3. Medición de presión: poder mantener un constante monitoreo del nivel de presión ejercido por la máquina.
4. Control de encendido y apagado: a través de un interruptor.
5. Garantizar la seguridad: que tenga medidas de seguridad, como un indicador verde cuando es seguro introducir el material. Un pulsador de acción sostenido, deteniéndose la maniobra al liberar el mando. Además, se requiere una alarma sonora ejecutándose durante la operación, así como colocar pictogramas de prohibido el paso en las zonas cercanas al área de compactación. Finalmente implementar en la máquina un botón de paro de emergencia de fácil acceso para el usuario.
6. Diseño y componentes de interfaz: la máquina debe contar con una interfaz que dé retroalimentación visual al operador, además de permitir el control de ésta.

2.3. Diagramas IDEF-0

Basado en las necesidades identificadas y el problema planteado, haciendo seguimiento a la metodología de diseño mecatrónico, se diseñaron los diagramas IDEF-0 que describen el comportamiento de la planta (véase Figura 1).

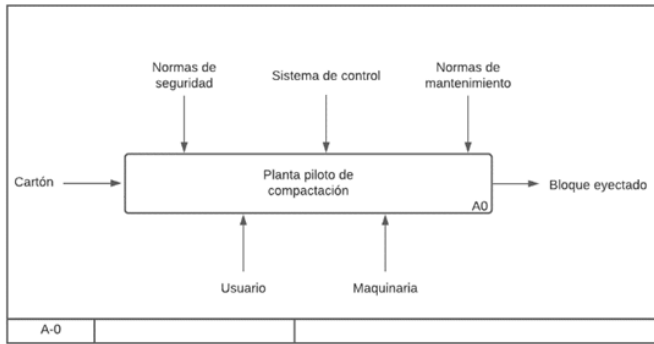


Figura 1: Planta piloto de compactación, diagrama A-0.

El proceso se dividió en cuatro subprocesos, que implican el encendido de la máquina, la introducción del cartón, el compactado y finalmente la eyección del bloque (véase Figura 2).

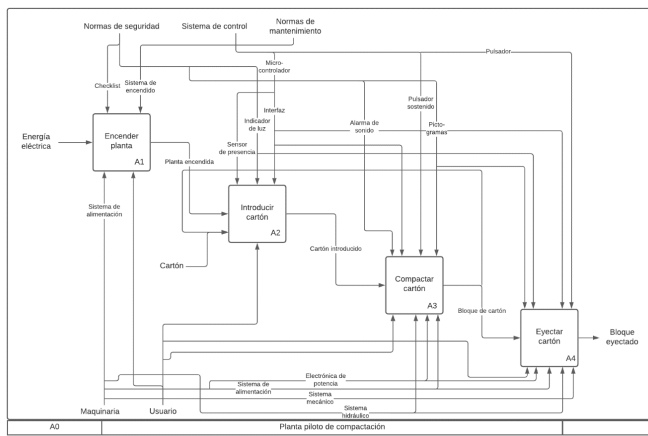


Figura 2: Planta piloto de compactación, diagrama A0.

De manera similar, el primer bloque del diagrama A0 “encender planta” (bloque A1), se dividió en la revisión de un checklist por cuestiones de seguridad y mantenimiento; y el propio encendido de la planta.

El bloque A2 consiste en la introducción del cartón, dividido en la apertura de la puerta y el propio ingreso del cartón, ambos por parte del usuario.

El bloque A3 “compactar cartón”, consiste en la pulsación de un interruptor que acciona el mecanismo y el compactado que comprime el material. Este bloque se repite en conjunto con el bloque A2 hasta que se llena el espacio interior de la compactadora.

Finalmente, el bloque A4 “eyectar cartón”, expulsa el bloque de cartón, esto mediante dos bloques “abrir compuerta” y “expulsar bloque”.

2.4. Especificaciones de diseño

En la Tabla 1 se enlistan las necesidades del proyecto, ponderado con 1 la de mayor importancia y con 5 la de menor importancia.

Tabla 1: Especificaciones de diseño.

No.	Necesidad	Importancia relativa
1	La planta Tiene una interfaz intuitiva.	3
2	La planta Es robusta.	1
3	La planta Tiene un ciclo de trabajo rápido.	2
4	La planta Es escalable.	2
5	La planta Es fácil de usar.	3
6	La planta Es de uso seguro.	1
7	La planta Refleja mediciones precisas.	2
8	La planta Tiene una larga vida útil.	3
9	La planta Requiere poco mantenimiento.	4
10	La planta Comprime a una alta densidad.	1
11	La planta Expulsa bloques pequeños.	1
12	La planta Es fácil de instalar.	4
13	La planta Es barata.	1

En la Tabla 2 se listan las métricas requeridas para cubrir las especificaciones de diseño encontradas.

Tabla 2: Lista de métricas.

No. de métrica	No. de necesidad	Métrica	Importancia	Unidades
1	1, 5, 6	Ergonomía	3	Subjetivo
2	2, 8	Vida útil	4	No. de ciclos
3	3	Tiempo de compactado	1	Segundos
4	3	Tiempo de eyección	1	Segundos
5	4	Escalabilidad	2	Subjetiva
6	7	Tolerancia de medición	1	Porcentual
7	9, 12	Tiempo de instalación y mantenimiento	4	Minutos
8	10, 11	Tamaño del bloque	1	cm ²
9	13	Costo de los materiales	1	Pesos mexicanos

Finalmente, en la Tabla 3 se definen los valores marginales e ideales de las métricas establecidas.

Tabla 3: Lista de métricas con valores marginales e ideales.

No. de métrica	No. de necesidad	Métrica	Imp.	Unidades	Valor marginal	Valor ideal
1	1, 5, 6	Ergonomía	3	Subjetivo	>3	>5
2	2, 8	Vida útil	4	No. de ciclos	>5,000,000	>10,000,000
3	3	Tiempo de compactado	1	Segundos	<90	<30
4	3	Tiempo de eyección	1	Segundos	<90	<30
5	4	Escalabilidad	2	Subjetiva	>3	>4
6	7	Tolerancia de medición	1	Porcentual	±10	0
7	9, 12	Tiempo de instalación y mantenimiento	4	Minutos	<60	<40
8	10, 11	Área de la base del bloque	1	cm ²	>1,600 - <3,600	2,500
9	13	Costo de los materiales	1	Pesos mexicanos	<18,000	<12,000

2.5. Propuesta de posibles soluciones

En la Tabla 4 se adjuntan las diversas variantes buscando cumplir las especificaciones de diseño planteadas, de aquí se obtendrán los diseños conceptuales.

Tabla 4: Combinaciones conceptuales.

Material para la estructura	Material del armazón de la interfaz	Mecánica de fluidos	Microcontrolador	Sistema de eyección	Interfaz	Sistema de encendido	Orientación
Acero	PLA	Neumática	Arduino	Cadenas	Instrumentación virtual	Interruptor	Horizontal
Aluminio	Aluminio	Hidráulica	Raspberry PI	Pistón	Digital	Push button	Vertical

Basado en la tabla de combinaciones (Tabla 4) se realizaron tres diseños conceptuales, con los que se podrán profundizar las ventajas y desventajas de las distintas opciones disponibles (Tabla 5).

Tabla 5: Diseños conceptuales.

Especificación	Diseño conceptual 1	Diseño conceptual 2	Diseño conceptual 3
Material para la estructura	Acero	Aluminio	Aluminio
Material del armazón de la interfaz	Aluminio	PLA	Aluminio
Mecánica de fluidos	Hidráulica	Neumática	Hidráulica
Microcontrolador	Arduino	Raspberry PI	Raspberry PI
Sistema de eyección	Cadenas	Pistón	Pistón
Interfaz	Digital	Instrumentación virtual	Digital
Sistema de encendido	Interruptor	Push button	Interruptor
Orientación	Vertical	Horizontal	Vertical

2.5.1. Diseño conceptual 1

La Figura 3 muestra el primer diseño conceptual, el material principal es acero para una larga vida útil, la orientación vertical es favorable para la reducción de espacio. Un sistema de potencia hidráulico que se encontrará en la parte superior ejerciendo la fuerza necesaria para compactar mediante los pistones, un Arduino será suficiente para ayudar a controlar y mostrar en la pantalla digital las indicaciones de presión, el sistema de eyección será mediante cadenas las cuales ayudan a la extracción del bloque de cartón compactado.

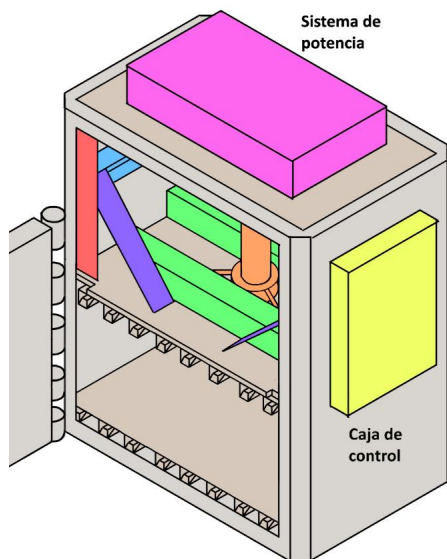


Figura 3: Diseño conceptual 1, Compactadora vertical

2.5.2. Diseño conceptual 2

La Figura 4 muestra el segundo diseño conceptual, el cual se basa en una orientación horizontal, en este caso el material es aluminio y el sistema de potencia es neumático. De manera análoga al primer diseño se propone como material de la estructura el acero, finalmente, el bloque se expulsa por la parte superior y se desliza a través de la pendiente.

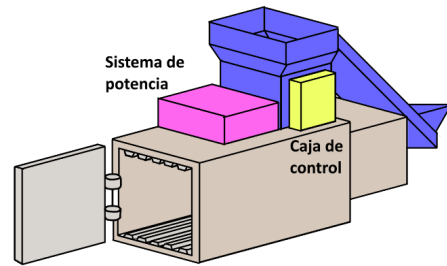


Figura 4: Diseño conceptual 2, Compactadora horizontal

2.5.3. Diseño conceptual 3

La Figura 5 muestra el tercer diseño conceptual, con una orientación vertical, la diferencia más notable a comparación del primer diseño es que éste en vez de requerir cadenas de eyección usa en la parte trasera otro pistón accionado hidráulicamente.

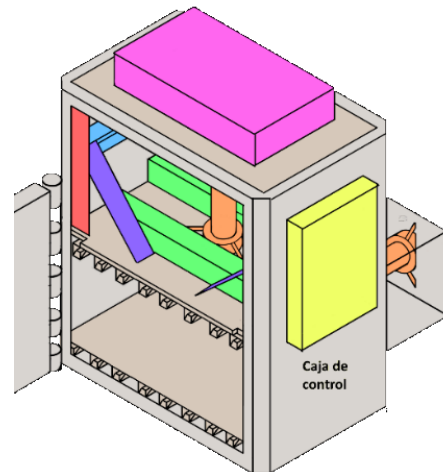


Figura 5: Diseño conceptual 3.

2.6. Selección de la solución adecuada

En la Tabla 6 se aprecian los puntos considerados para el diseño y construcción de la planta piloto de compactación de cartón, identificando los puntos con mayor influencia para la elección de la solución.

Tabla 6: Tabla de pertenencia.

Criterio de selección	A	B	C	D	E	F	G	H	I	Total	Pertenencia
A. Ergonomía	X	1	0	0	0.5	0.5	1	0	0	3	0.0833
B. Vida útil	0	X	0	0	0	0	0.5	0	0	0.5	0.0139
C. Velocidad de compactado	1	1	X	0.5	1	0.5	1	0	1	6	0.1667
D. Velocidad de eyección	1	1	0.5	X	1	0.5	1	0	0.5	5.5	0.1528
E. Escalabilidad	0.5	1	0	0	X	0	1	0	0	2.5	0.0694
F. Tolerancia de medición	0.5	1	0.5	0.5	1	X	1	0	0.5	5	0.1389
G. Tiempo de instalación y mantenimiento	0	0.5	0	0	0	0	X	0	0	0.5	0.0139
H. Tamaño del bloque	1	1	1	1	1	1	1	X	1	8	0.2222
I. Costo de los materiales	1	1	0	0.5	1	0.5	1	0	X	5	0.1389
Total										36	1

Una vez presentados los tres diseños conceptuales, se procede con la elección del más adecuado según la ponderación de cada métrica, lo cual se presenta en la tabla de objetivos ponderados (Tabla 7) que evalúa y compara los diseños propuestos dándoles una calificación. La ponderación es de: Malo = 0.25, normal = 0.5, bueno = 0.75, ideal = 1, respecto al desempeño en cada objetivo.

Tabla 7: Tabla de selección por objetivos ponderados.

Objetivo	DC1	DC2	DC3	Pertenencia
A. Ergonomía	1	0.75	1	0.0833
	0.0833	0.0625	0.0833	
B. Vida útil	1	0.75	0.75	0.0139
	0.0139	0.0104	0.0104	
C. Velocidad de compactado	1	1	1	0.1667
	0.1667	0.1667	0.1667	
D. Velocidad de eyección	1	0.75	0.5	0.1528
	0.1528	0.1146	0.0764	
E. Escalabilidad	0.75	0.75	0.75	0.0694
	0.0521	0.0521	0.0521	
F. Tolerancia de medición	1	1	1	0.1389
	0.1389	0.1389	0.1389	
G. Tiempo de instalación y mantenimiento	0.75	0.5	0.75	0.0139
	0.0104	0.0069	0.0104	
H. Tamaño del bloque	1	1	1	0.2222
	0.2222	0.2222	0.2222	
I. Costo de los materiales	1	0.75	0.75	0.1389
	0.1389	0.1042	0.1042	
Total	0.9792	0.8785	0.8646	

De modo que el diseño conceptual 1 es el ideal para el desarrollo de la planta piloto de compactación de cartón.

2.7. Diseño detallado

2.7.1. Diseño hidráulico

El diseño conceptual seleccionado contempla un actuador hidráulico, por ende es necesario calcular la presión y fuerza necesaria para compactar el cartón. Como densidad promedio del cartón se tomó la del cartón corrugado, por ser uno de los más resistentes, la cual oscila entre 30 y 90 [kg/m³] dependiendo del espesor de la onda entre las láminas (como se muestra en la Figura 6).

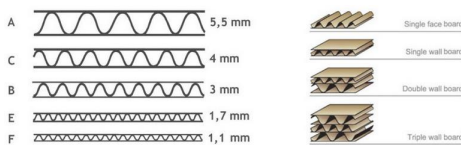


Figura 6: Ancho de onda del cartón corrugado (Sánchez et al., 2002).

Se determinó experimentalmente la presión necesaria para compactar el cartón según su densidad, se aprecia que en ausencia de presión la densidad ronda los [90kg/m³] (Sánchez et al.,

2002). Para el diseño se aplicó una razón de compactado de 1:2, con una presión de aproximadamente 1 [kg/cm²], pues a partir de dicha presión presenta un incremento considerable con poco beneficio. Conociendo la presión necesaria, así como el área de aplicación se puede calcular la fuerza requerida del pistón:

$$F = A \cdot P \tag{1}$$

$$P = 1 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$F = A \cdot P = (50 \text{ cm} \cdot 50 \text{ cm}) \cdot \left(1 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}\right) = 2500 \text{ kg}_f = 24.51 \text{ kN}$$

La longitud de carrera necesaria se determina a partir de la altura máxima y la mínima que alcanza la placa móvil, comenzando a una altura de 50 cm y finalizando en una altura de 25 cm. Considerando la gráfica de la Figura 7 (Sánchez et al., 2002), se logró encontrar dentro del diámetro mínimo recomendado de 16 mm para el vástago (esquina inferior derecha), por tanto, se toma como diámetro normalizado.

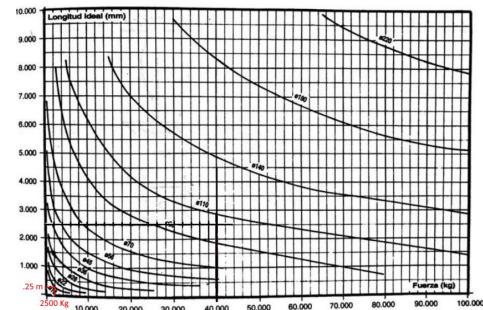


Figura 7: Diámetros mínimos del vástago para evitar el pandeo (Roldan Viloria, 2001).

Para la carga admisible se considera (2):

$$F_{adm} = S \frac{\pi^2 \cdot I \cdot E}{L^2} \tag{2}$$

Donde; F es la máxima fuerza a soportar, I es el momento de inercia mínimo para secciones transversales, E es el módulo de elasticidad, L es la longitud sometida a pandeo ($Lc \cdot k$) y S es un coeficiente que depende del tipo de fijación. El coeficiente k se determina de acuerdo con una Tabla mostrada en (Roldan Viloria, 2001), considerando fijación con patas traseras y delanteras se tendría un valor de 0.5. Posteriormente se calcula el momento de inercia mínimo:

$$I = \frac{D^4 \pi}{64} = 3,217 \text{ mm}^4 \tag{3}$$

Continuando con el procedimiento y teniendo en cuenta que el módulo de elasticidad (E) del acero es de 22 Kg/mm^2 y un coeficiente S de 4 se tiene que:

$$F_{adm} = S \frac{\pi^2 \cdot I \cdot E}{L^2} = 4 \frac{\pi^2 \cdot 3,217 \text{ mm}^4 \cdot 22 \text{ kg/mm}^2}{(250 \text{ mm} \cdot 0.5)^2} = 7,114.98 \text{ kg}_f = 69,774.11 \text{ N}$$

De acuerdo con (Dey, 2021) y (Ashby y CEBON, 1993), dividiendo la carga admisible entre la carga aplicada se puede obtener el factor de seguridad del sistema:

$$FS = \frac{F_{adm}}{F} = \frac{69.77 \text{ kN}}{24.51 \text{ kN}} \approx 2.85$$

Obteniendo un factor de seguridad de 2.85, lo cual se encuentra dentro de un margen de seguridad aceptable. Con los cálculos obtenidos se puede seleccionar el cilindro hidráulico WCT 1.5x10 (Figura 8), con calibre de 1.5 pulgadas, carrera de 10 pulgadas (25.4 cm) y una presión de hasta 3500 psi (24,131.65 $[kN/m^2]$).

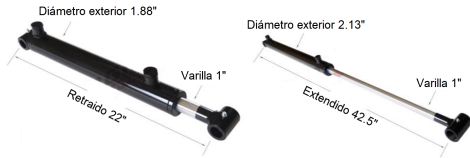


Figura 8: Cilindro hidráulico de doble efecto WCT 1.5x10.

2.7.2. Diseño de la interfaz de control

Con el objetivo de mostrar el comportamiento de la máquina a lo largo de todo su proceso de funcionamiento, se elaboró un diagrama de estados que hace uso de todos los parámetros pertinentes (Figura 9).

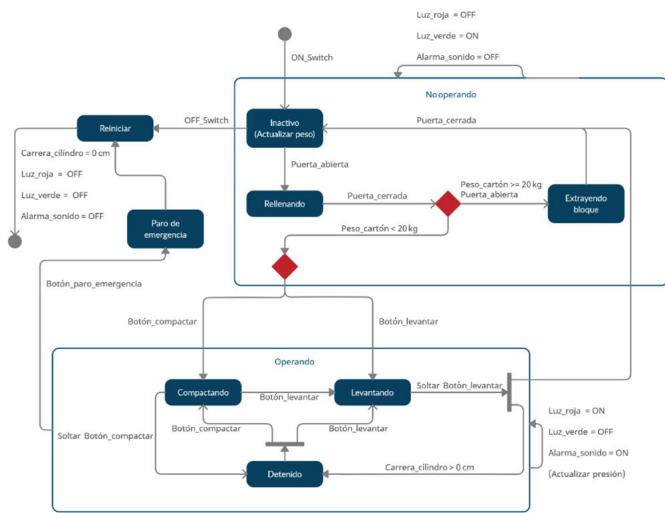


Figura 9: Máquina de estados de la compactadora.

Para llevar a cabo el control de la máquina se utilizará una interfaz humano-máquina a través de una pantalla LCD táctil, permitirá ver en todo momento las variables de interés y el estado actual de la máquina como se puede apreciar en la Figura 10. En conjunto con la pantalla se tendrán los dos pulsadores que controlarán el cilindro hidráulico (uno en cada sentido). Finalmente se tendrá un tercer pulsador que actuará como el paro de emergencia de la máquina.



Figura 10: Prototipo de interfaz de control para pantalla táctil

2.7.3. Diseño estructural

Se elaboró el diseño de un ensamble para la planta piloto de acuerdo con la selección de características y componentes propuestos en el diseño conceptual. El diseño estructural de la Planta Piloto de Compactación (Figura 11), será mayormente de acero, cuenta con una base en la cual se fijarán las paredes y la prensa inferior. La base superior está fija a los laterales que sirve también como base para el cilindro y la prensa.

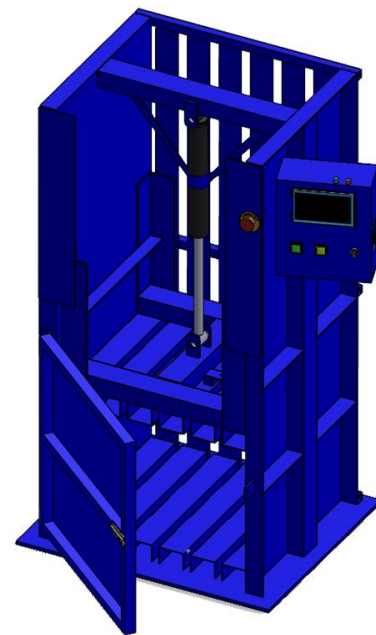


Figura 11: Diseño estructural de Planta Piloto de Compactación, vista isométrica.

La vista isométrica explosionada de la planta piloto de compactación de cartón se puede observar en la Figura 12, así como la Tabla 8 muestra los componentes de marcados en la misma Figura.

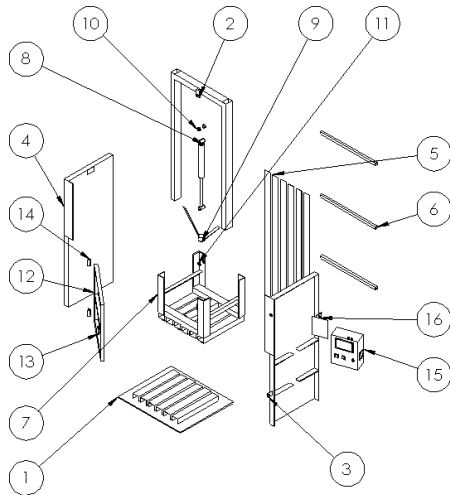


Figura 12: Vista explosionada de ensamble planta piloto de compactación.

Tabla 8: Componentes del ensamble de la planta piloto de compactación.

No. de elemento	Pieza	Descripción
1	Base y prensa inferior	Acero ASTM A36 espesor 1/4 y PTR 2X3" cal. 14
2	Soporte para cilindro y paredes laterales	PTR 2X3" cal. 14 y solera 1/4"
3	Pared lateral derecha	Lámina galvanizada cal. 16, solera 1/8x2in
4	Pared lateral izquierda	Lámina galvanizada cal. 16, solera 1/8x2"
5	Pared trasera	Lámina galvanizada cal. 16
6	Soporte pared trasera	Perfil tubular 1X1" cal. 18
7	Prensa superior	PTR 2X3" cal. 14 y ángulo 1/8x1.5"
8	Cilindro de doble efecto	WTC 1.5X10
9	Guía cilindro	Solera 1/8x1.5"
10	Rondana cilindro	Rondana plana 3/4"
11	Rondana prensa inferior	Rondana plana 3/4"
12	Puerta	Lámina galvanizada cal. 16 y perfil tubular 1X1" cal. 18
13	Pasador	Pasador de acero negro 3"
14	Bisagra	Bisagra para soldar acero 3"
15	Caja de control	Lámina galvanizada cal. 16
16	Soporte caja de control	Soporte de monitor articulado

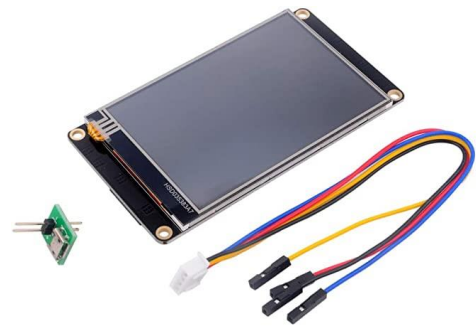


Figura 13: Pantalla táctil de 7 pulgadas NX8048K070.

Para medir el peso del bloque se eligió una celda de carga tipo S (Figura 14), la cual se accionará al levantar la prensa.



Figura 14: Celda de carga tipo S de 100 kg.

Para detectar el estado de la puerta (abierta o cerrada) que habilitará o deshabilitará el sistema por seguridad, se utilizará un sensor magnético para puerta (Figura 15), comúnmente utilizado en sistemas de seguridad y alarma.

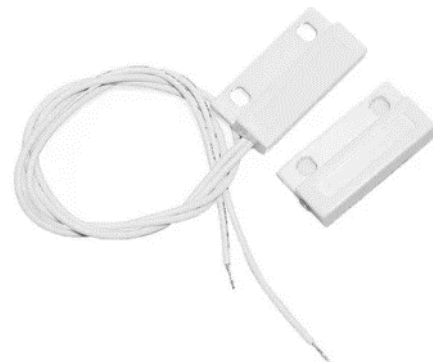


Figura 15: Sensor magnético para puerta.

2.7.4. Selección de componentes

Para controlar todo el sistema, programar su comportamiento, y conectar todos sus sensores y actuadores, se hizo uso del microcontrolador Arduino MEGA 2560 (Figura 28), basado en ATmega2560 debido a la versatilidad que ofrece. Se planteó inicialmente el uso de una placa Arduino UNO, pero los 2 KB, de SRAM se consideraron insuficientes para el diseño.

Para la selección se considera la densidad de información a mostrar, pues esta influirá en el tamaño de la pantalla táctil. Se eligió una pantalla táctil de 7 pulgadas para el desarrollo del proyecto, modelo Nextion NX8048K070 (Figura 13).

2.7.5. Diseño electrónico

Acorde a las conexiones y el tamaño de la caja de control se diseñó un PCB, se utilizaron bloques de terminal para facilitar la realización de las conexiones. A continuación, se adjuntan el etiquetado (Figura 16), enrutado superior (Figura 17), y enrutado inferior (Figura 18) de la placa de circuito impreso.

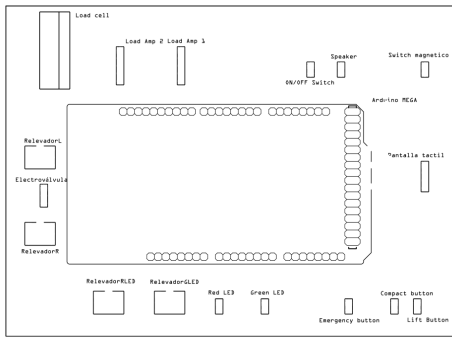


Figura 16: PCB, etiquetado.

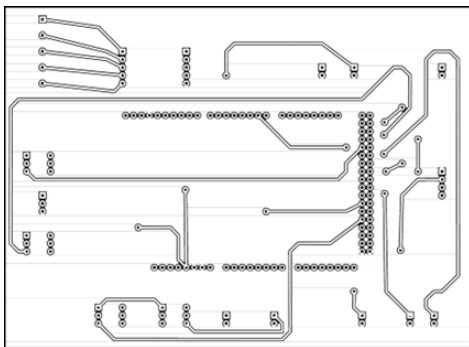


Figura 17: PCB, enrutado superior.

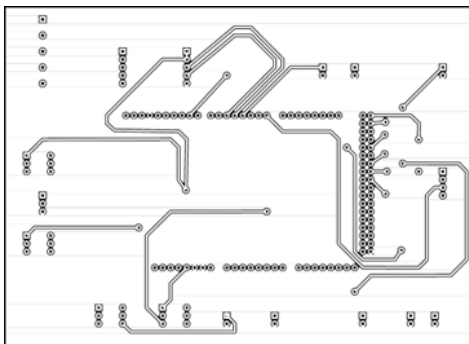


Figura 18: PCB, enrutado inferior.



Figura 19: Ventana principal de la interfaz gráfica.



Figura 20: Ventana de estados.



Figura 21: Ventana de parámetros.

2.7.6. *Diseño de interfaz gráfica y de control*

La interfaz de control, esta se dividió en tres ventanas:

- Pantalla principal: refleja variables de interés y permite ir a las otras dos ventanas de la interfaz (Figura 19).
- Pantalla de estados: refleja el estado actual en tiempo real de la máquina, así como el diagrama completo del sistema (Figura 20).
- Pantalla de parámetros: permite ver y modificar parámetros de interés como el peso esperado a compactar, la frecuencia de la bocina y el paso del cilindro (Figura 21).

En las Figuras 19, 20 y 21 también se puede apreciar en amarillo las etiquetas usadas para la programación de la interfaz gráfica.

2.7.7. *Simulaciones mecánicas*

Para una elección de los materiales apropiada se realizaron análisis estáticos simulando un ciclo de compactación, aplicando una fuerza desde el eje del cilindro hacia la placa de la prensa. Los resultados obtenidos permitieron determinar tanto el esfuerzo máximo von Mises como el factor de seguridad obtenido con los parámetros de diseño aplicados.

El estudio fue realizado únicamente sobre la estructura elaborada con perfil de acero, pues es la única que puede estar comprometida por la presión sometida. Se comenzó con el análisis estático de esfuerzos generado sobre la estructura de la máquina, en el cual se aplicó la fuerza obtenida de los cálculos de compactación del material (25 kN), desde el eje del cilindro hacia la placa. Con la fuerza determinada se aplicaron las cargas correspondientes, insertando relaciones de posición que emulan una soldadura rígida entre las piezas, producto de estos se obtuvieron los resultados adjuntos a continuación. Cabe destacar que, el propio software de diseño exagera aproximadamente 7,000 veces la deformación que ocurriría realmente sobre la pieza. Se puede observar también el desplazamiento del elemento en la Figura 22.

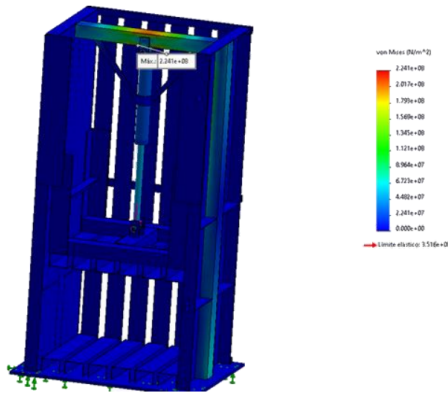


Figura 22: Compactadora, Análisis estático de tensiones (final).

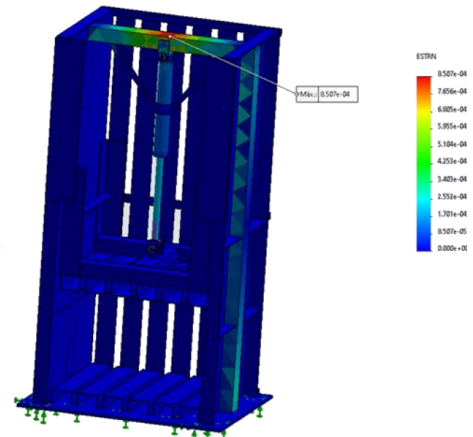


Figura 24: Compactadora, Análisis estático (deformaciones unitarias).

A partir de este mismo análisis se pudo ubicar el punto de esfuerzo máximo de von Mises en caso de aplicar una fuerza no contemplada en el diseño y así observar su comportamiento ante esfuerzos en zonas donde se espera la carga. Dicho punto fue localizado directamente en la zona de central de la base que soporta el cilindro y la prensa, alcanzando un esfuerzo máximo de von Mises de 2.241×10^8 $[N/m^2]$. Además, se determina el factor de seguridad sobre el perfil de acero, que contempla el esfuerzo último del material y el esfuerzo máximo aplicado, traducido como el cociente de ambos, el cual arroja un valor de 1.6, dejando un decente margen de seguridad sobre la carga contemplada (ver Figura 23).

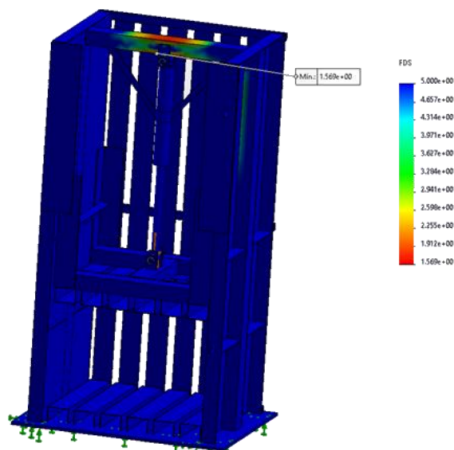


Figura 23: Compactadora, Análisis estático (factor de seguridad).

Finalmente, se simularon las deformaciones unitarias de todo el ensamble, cuyo máximo de nuevo se localiza en el punto de impacto del cilindro, siendo de 8.507×10^{-4} $[cm/cm]$, éste indica el mayor desplazamiento de la máquina, el cual se observa en la Figura 24 que es despreciable.

3. Análisis y validación de resultados

Se probaron varios ciclos de carrera con el cilindro montado sobre la prensa superior, aparentemente mostrando un correcto funcionamiento como se puede observar en la Figura 25.



Figura 25: Pruebas del cilindro en la estructura.

Se procedió a hacer pruebas introduciendo el cartón en la prensa, durante el primer ciclo de compactado, el cual tomó 20 segundos, no hubo problema; sin embargo, al rellenar por segunda vez la máquina se comenzaron a ver vulnerabilidades que comprometían el correcto funcionamiento del sistema, llegando al punto donde el sobreesfuerzo desoldó las guías de la prensa. Debido a esto se aplicaron un par de refuerzos de guía en Y sobre el cilindro, así como un par de vigas transversales entre las guías de la prensa superior (Figura 26).



Figura 26: Refuerzos sobre cilindro y prensa hidráulicos.

Después de aplicar los refuerzos, se realizaron pruebas considerando cantidades mínimas de cartón puestas en vertical para evitar incrementos de esfuerzo bruscos (Figura 27). El incremento en el tiempo de compactación fue de 15 segundos, tomando 35 segundos para que el cilindro complete la carrera si no está sujeta a carga.



Figura 27: Pruebas iniciales sobre refuerzos de la prensa.

Una vez verificado el funcionamiento de los refuerzos se les comenzó a aplicar una mayor carga, con el cartón recostado en horizontal (Figura 28). Tomó cuatro ciclos de compactado para rellenar completamente la máquina, cada uno demorando 35, 40 y 45 segundos, respectivamente.



Figura 28: Primer ciclo de trabajo completo

Una prueba posterior tomó tres ciclos de relleno, con un tiempo de 30 y 40 segundos para cada ciclo de compactado (Figura 29), cabe mencionar que los tiempos menores se debieron a que se reutilizó el cartón de una prueba anterior.



Figura 29: Primera prueba de la integración total del sistema.

La segunda prueba utilizó cartón nuevo, tomando también tres ciclos de relleno, con un tiempo de 40, 45 y 50 segundos, haciendo un ciclo final de trabajo activo (sin considerar relleno y extracción) de 135 segundos (Figura 30).



Figura 30: Segunda prueba con la integración total del sistema.

En la Figura 31 se puede apreciar que el bloque de salida tiene un peso de 20 kg, el bloque inicial tuvo una altura de aproximadamente 80 cm; durante el proceso de compactado alcanzó una altura de 55 cm, sin embargo, tras extraer el bloque

se expandió ligeramente, adquiriendo unas dimensiones finales de 50x50x65 cm.

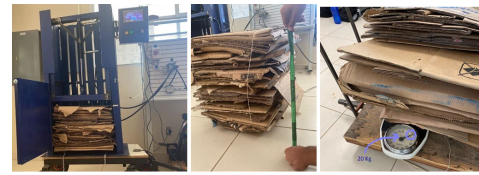


Figura 31: Bloque compactado de salida.

Cabe hacer el comentario de que un ciclo de trabajo son aproximadamente 3 ciclos de compactado, pues se necesita compactar y volver a rellenar la máquina de manera repetida para alcanzar los 20 kg. Se reafirman entonces los resultados de las simulaciones obtenidas durante el proceso de diseño, pues tras varias pruebas se confirma que la máquina no cede ante el esfuerzo aplicado en el ciclo de trabajo.

Durante las pruebas (Figura 32), los sensores, botones, interruptores, celda de carga y el sensor magnético para la puerta, así como la pantalla táctil permitieron controlar el ciclo de trabajo de la máquina. Los actuadores, los diodos LED indicadores y la alarma sonora funcionaron de manera correcta, alertando al usuario para que tomara las medidas de precaución cuando fuera necesario. Por otro lado, la interfaz de control permitió el monitoreo de la presión aplicada sobre el sistema a través del manómetro integrado en el circuito hidráulico.



Figura 32: Pruebas de integración con interfaz de control.

La pantalla refleja de manera eficaz las variables de interés del sistema, como pueden ser el estado de operación actual de la máquina, y el estado de la alarma de trabajo, así como parámetros modificables de interés como el peso requerido y la frecuencia de la alarma sonora implementada.

4. Conclusiones

Mediante la aplicación de la metodología del diseño mecatrónico y diversas disciplinas (mecánica, diseño CAD, simulación y diseño de circuitos electrónicos, programación de sistemas de control y uso de sistemas hidráulicos) se pudo obtener un diseño eficiente, que satisface los objetivos planteados para considerar el proyecto como exitoso; la construcción de una estructura mecánica que compacte 20 kg de cartón por ciclo de trabajo, que mida y monitoree variables de interés como el peso actual sobre la máquina, la presión aplicada y el tiempo

de operación; y finalmente que aplique medidas de seguridad efectivas para el operador, con el uso de simbología pertinente, alarmas gráficas y sonoras, así como un paro de emergencia que interrumpa el sistema.

El prototipo desarrollado no solo contribuye en gran medida a proyectos futuros que implementen el uso de sistemas hidráulicos, interfaces de control, máquinas de estado y procesos de manufactura; sino que genera una nueva solución ante la incipiente generación de desperdicios por parte de la sociedad.

4.1. Trabajo a futuro

- Uso de microswitches limitadores de carrera para determinar la posición actual del cilindro, pues en el proyecto actual se tiene que determinar manualmente el tiempo en la interfaz para que coincida con el de compactación.
- Uso de una pantalla táctil de menores prestaciones, dado que la interfaz no requiere video o audio directo (el audio de la máquina se reproduce a través del Arduino por la bocina), un modelo más básico puede hacer el trabajo, se recomendaría hacer pruebas con la pantalla táctil Nextion nx8048t070.
- Automatización en la expulsión del bloque. Por cuestiones económicas este inciso no se automatizó, utilizando las cadenas manualmente, se plantea la posibilidad de implementar un segundo cilindro que empuje el bloque de cartón compactado tras finalizar el ciclo de trabajo.
- Modificar los indicadores LED de la caja de control con indicadores de panel, pues darían una mayor ergonomía y seguridad al proyecto final.
- Una bocina de mayor potencia, dado que el presente proyecto es una planta piloto se utilizó una bocina pequeña de 10 W, para un proyecto comercial se recomienda una de mayor potencia para mayor eficacia.

Referencias

- Ashby, M. F. y CEBON, D. (1993). Materials selection in mechanical design. *Le Journal de Physique IV*, 3(C7):C7–1.
- Carvajal Rojas, J. H. y Téllez Garay, J. P., Vega Arévalo, C. M. (2010). Diseño Mecatrónico de Robot Móvil para Transporte de Carga en Superficies Irregulares. *ITECKNE*.
- Carvajal Rojas, J. H., Vega Arévalo, C. M., y Téllez Garay, J. P. (2013). Diseño mecatrónico de robot móvil para transporte de carga en superficies irregulares. *ITECKNE*.
- Celis, F. (2018). La planta cervecera más grande del mundo está en zacatecas. <https://www.forbes.com.mx/1a-planta-cerveceras-mas-grande-del-mundo-esta-en-zacatecas/>. Accedido: 2023-6-24.
- Dey, A. K. (2021). Factor of Safety: Definition, Equation, Examples, Calculator (With PDF) ? What Is Piping.
- Dutra, M. A. X. S., Mecánica, I., Mecatrónica, I., Automatización, M. S., y Flexibles, D. S. (2008). Diseño Mecatrónico De Un robot tipo agv ?autonated guided vehicle. *UIS Ingenierías*.
- Fernández Arvizu, J. L. (2011). La basura como recurso energético. Situación actual y prospectivo en México. *Boletín IIE*.
- Flores López, J. L. (2021). Propuesta de una planta para el tratamiento de residuos orgánicos en la ciudad de Tambogrande. *Revista Ingeniería*.
- Gallegos, S. R. R. (2021). diseño conceptual de un desgranador y clasificador de granos de maíz amiláceo por calibre y estado de conservación. *Pontificia universidad católica del Perú facultad de ciencias e ingeniería diseño*.
- Gobierno del Estado, d. Z. (2017). Decreto 180. <http://periodico.zacatecas.gob.mx/visualizar/8e88474c-dc1f-4d76-9bbe-f2ff6f9ceaac;1.0>. Accedido: 2023-6-24.
- IPN (2017). Comunicado de prensa. <https://repositoriodigital.ipn.mx/bitstream/123456789/22575/3/C-209-2017.pdf>. Accedido: 2023-6-24.
- Lara Corro, E. S. (2019). ¿Si tiras basura provocas inundaciones?: Niñas y niños en la construcción de conocimiento ambiental en clases de educación primaria. *Diálogos sobre educación*.
- Leyes Sánchez, M. E. y Penuela Meneses, H. W. (2022). Diseño mecatrónico para una planta de tratamiento de aguas residuales en entornos de industrias textiles con énfasis en tintorerías.
- Mendezcarlo Silva, V. (2011). Instrumentos fiscales para la gestión de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) en los municipios mexicanos. *Letras Verdes, Revista Latinoamericana de Estudios Socioambientales*.
- Odriozola, V. (2010). Impactos de la producción de papel. *Campaña de Tóxicos de Greenpeace Argentina*.
- Ortiz Dominguez, M., Morgado González, I., Cruz Avilés, A., Paredes Rueda, M. A., García Macedo, J. A., Velázquez-Mancilla, R., Flores Rentería, M. A., Zuno Silva, J., y Farfán García, J. M. (2019). Diseño Mecatrónico de un Robot de Tres Grados de Libertad Aplicando la Metodología de Nigel Cross. *Ingenio y Conciencia Boletín Científico de la Escuela Superior Ciudad Sahagún*.
- Recytrans (2014). Reciclaje de cartón en la industria - gestión de residuos - soluciones globales para el reciclaje. <https://www.recytrans.com/blog/reciclaje-de-carton-en-la-industria/>. Accedido: 2023-6-24.
- Robles, G. C. (2007). Guía de reciclaje de residuos sólidos domiciliarios. *La Importancia de Reciclar*.
- Rodríguez, S. (2016). qué desperdicio de basura! <https://www.animalpolitico.com/analisis/organizaciones/sin-competitividad-no-hay-paraiso/que-desperdicio-de-basura>. Accedido: 2023-6-24.
- Roldan Vilorio, J. (2001). *Prontuario de hidráulica industrial - electricidad*. Paraninfo.
- Sierra, J. B. (2013). Reporte anual que se presenta de acuerdo con las disposiciones de carácter general aplicables a las emisoras de valores y a otros participantes del mercado de valores ejercicio terminado el 31 de diciembre de 2013 grupo modelo, s.a.b. de c.v. <https://img.gruporeforma.com/Libre/Offlines/ReporteEmpresarial/img/Reportes/PDF/437.pdf>. Accedido: 2023-6-24.
- Sánchez, S., Colomina, J., Plá, R., y Masiá, J. (2002). Definition of a methodology for compactors and baler presses selection. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 56.
- Tapia Ibarra, A. G., Valencia Ovalle, A. D. C., y Saldaña Durán, C. E. (2020). Impactos ambientales en el sector empresarial de la recolección contratada de residuos sólidos urbanos en la ciudad de tepic, nayarit, méxico. *Hitos de Ciencias económico Administrativas*.
- Yuste, P. S. (2014). Generación de energía a partir de la basura ¿Energía 100 % limpia?