

Diseño, simulación y construcción de un modelo de laboratorio de transporte de pellets

Design, simulation and construction of a pellets transportation laboratory

Juan Fernando Flórez-Ruiz
Universidad Santo Tomás
Bucaramanga, Colombia
juanflorez.11284@gmail.com

Alexander Ramírez-Dueñas
Universidad Santo Tomás
Bucaramanga, Colombia.
alexander0504@hotmail.com

Jorge Guillermo Díaz-Rodríguez
Universidad Santo Tomás
Bucaramanga, Colombia
jorgeguillermo12@ustabuca.edu.co

Félix Antonio Pérez-Rondón
Universidad Santo Tomás
Bucaramanga, Colombia
felix.perez@ustabuca.edu.co

Resumen– Este artículo presenta cómo se diseñaron y construyeron tres modelos a escala de maquinaria industrial, como una forma educativa de mostrar el transporte de material particulado. En la literatura analizada se encontraron modelos de cálculo para equipos a nivel industrial, más no a nivel de laboratorio. Se escogieron los más representativos del transporte comercial: un tornillo transportador, una banda transportadora y un elevador de cangilones. Estos tres equipos se calcularon y fueron construidos en policarbonato para permitir la visualización de su funcionamiento interno. Los tres equipos están controlados por un controlador lógico programable (PLC) y conectados entre sí por una red SCADA. Los equipos son modulares para no alterar el orden de funcionamiento, pudiendo obtener diferentes secuencias de trabajo. Además, se elaboró una interfaz gráfica hombre-máquina (HMI) para supervisar y controlar los equipos diseñados. Los resultados de flujo de transporte y material particulado obtenidos son aproximadamente coincidentes con los calculados, validando el uso de los modelos de cálculo para niveles de trabajo mucho menores. Finalmente, se destaca que el sistema obtenido es un entorno para que los estudiantes implementen técnicas de control usando los sensores y motores presentes.

Palabras claves– Diseño mecatrónico, transporte de pellets, elevación de pellets, SCADA.

Abstract– The article presents how three scaled down industrial machinery models were designed and built as an educational tool to present the transport of particulate material. The literature review showed calculation models for equipment at industrial level, not for laboratory level. There were chosen the most representative means of commercial transport for particulate materials: a conveyor screw, a conveyor belt and a bucket ele-

vator. These three machines were calculated and built in polycarbonate to allow visualization of their internal functioning. The three devices are controlled by a programmable logic controller (PLC) and connected to each other by a SCADA network. The equipment is modular so as not to alter the order of operation, being able to obtain different work sequences. In addition, a man-machine graphic interface (HMI) was developed to supervise and to control the designed equipment. The results of particulate material mass flow obtained are approximately coincident with those estimated, validating the use of calculation models for much lower levels of work. Finally, it is emphasized that the system obtained is an environment for students to implement control techniques using the sensors and motors used in the designs.

Keywords– Mechatronic design, pellets transportation, Pellets elevation, SCADA.

Nomenclatura

- v : velocidad lineal en la banda transportadora, elevador de cangilones y del tornillo sin fin.
- L : longitud de la banda transportadora, tornillo sin fin.
- t : tiempo.
- ω : velocidad angular.
- N_a : potencia en la banda transportadora, elevador de cangilones y tornillo sin fin.
- M : torque actuante.
- F : fuerza actuante en la banda transportadora.
- g : gravedad.

- De*: diámetro externo del tornillo sin fin.
Di: diámetro interno del tornillo sin fin.
N: número de veces mayor al tamaño de la partícula.
T: tamaño de la partícula.
p: paso del tornillo sin fin
#P: número de hélices del tornillo.
S: área de relleno de la camisa del tornillo sin fin.
 λ : coeficiente de relleno del canal del tornillo sin fin.
 ρ : densidad del material.
 \dot{m} : flujo másico de material.
 η : eficiencia.

1. INTRODUCCIÓN

A partir de problemas detallados en [1] se identificaron como problemas de la industria local, que incluyen trillado de café, trigo y arroz; se resalta el aprovechamiento eficiente del espacio, el desconocimiento del diseño de sistemas de transporte y métodos de cálculo que ayuden a optimizar dicho espacio.

Las empresas molineras, mineras y de plásticos son las líderes en el manejo y manipulación de materiales granulados que deben ser transportados para su procesamiento [2-4]. Para esto, se utilizan máquinas, cuya función es la manipulación del material, como por ejemplo el mezclado de materiales o transporte del material sin cambiar su estructura, forma y/o densidad, teniendo en cuenta factores como la gravedad, inclinación del terreno, dirección, tamaño del material, peso, velocidades de caudal y cantidad de material. Según la tarea, se requiere una máquina o un grupo de máquinas para realizar la tarea de transporte [5].

Por lo tanto, este trabajo nace de la necesidad de mostrar el funcionamiento de las máquinas transportadoras de granos más utilizadas en la industria local, con el fin de permitir al estudiante que las conozca, las manipule, las automatice, las mejore, las actualice con elementos nuevos de instrumentación a nivel de laboratorio y que experimente con diferentes materiales granulados, análisis de tiempos, velocidades, densidades de materiales y programación del autómata programable y el sistema SCADA [7, 12].

El proyecto se centra en el diseño y construcción de un sistema de transporte de lazo abierto, el cual consiste en el ingreso y salida sin una retroalimentación de material granulado. La solución planteada consiste de una banda transportadora, un elevador de cangilones y un tornillo transportador.

Los factores que influyeron en la selección del sistema de transporte, entre otros, fueron la resistencia del material, la toxicidad, temperatura del material, costo, oxidación, desgaste, estética, visibilidad durante el proceso, confiabilidad, poco mantenimiento y el bajo consumo de energía. Un transportador de banda de lona, un tornillo y un elevador hechos en acrílico entregan muchas de las propiedades y necesidades enunciadas.

La figura 1 muestra el esquema de la metodología empleada, adaptada de [1, 6, 17, 18]. Se puede apreciar en ella cómo se integró la instrumentación en el dimensionamiento mecánico de los componentes para tener en cuenta sus dimensiones de anclaje y fijación, el volumen ocupado por ellas y las cargas mecánicas inducidas por los actuadores seleccionados.

Fig. 1. ESQUEMÁTICO DE LA METODOLOGÍA USADA



Fuente: Los autores.

Se procuró en todo momento que los materiales y elementos mecánicos utilizados para la construcción de la máquina se encontraran o que pudieran ser fabricados en la región, ya que de esta manera resulta más económico y de fácil reparación. Se seleccionó el policarbonato como material de

construcción por su durabilidad, alta resistencia al impacto, transparencia, tenacidad, fabricabilidad y bajo costo [15] cuando se comparó con materiales metálicos.

Además, se ha tenido siempre en mente que los elementos finales puedan ser utilizados en los cursos de control para que los estudiantes tengan disponibles sistemas mecánicos en los que sea posible interactuar e implementar conceptos vistos en clase.

2. MATERIAL GRANULADO

El material seleccionado para transportar es el polipropileno (Poly (1-methylethylene)), debido a que es un material que no se deteriora, ni se deforma apreciablemente en ambientes de alta o baja temperatura, no es tóxico en su manipulación, es un material fácil de adquirir y, por último, es un material inerte, por lo tanto, no tiene problemas en cuanto a su cuidado, almacenamiento y manipulación [14].

Las propiedades del material por transportar [10, 14, 15] son:

- Densidad (ρ)= 950 kg / m³
- Tamaño de la partícula = \pm 4 mm

Adicionalmente, su presentación es granular y aproximadamente uniforme, lo que facilita su tratamiento.

3. DISEÑO DE DETALLE

Los cálculos para cada una de las máquinas se realizaron teniendo en cuenta las relaciones mostradas en las secciones 3.1 a 3.3.

Para estimar el ángulo de caída del material por transportar, se hicieron varias mediciones dejando caer en un recipiente transparente de superficie plana el polipropileno y usando un goniómetro se midió el ángulo que forma el cono arrojando un valor promedio de 26°.

Los tres equipos fueron diseñados para una capacidad de transporte de 0,333 Kg/min.

3.1 Banda transportadora

Variables definidas para el cálculo de la banda transportadora [2] son longitud de la banda, longitud operativa de la banda, capacidad meta,

diámetro de tambor conductor, ángulo de reposo y capacidad para transportar durante un minuto.

Las ecuaciones que se muestran a continuación definen las variables de operación que requiere la banda transportadora.

La velocidad lineal de transporte se define en la Eq. (1).

$$v = \frac{L}{t} \quad (1)$$

La velocidad angular se define en la Eq. (2).

$$\omega = \frac{v}{r} \quad (2)$$

El ancho de la banda se define en la Eq. (3) [1].

$$B = \frac{b + 0,05m}{0,9} \quad (3)$$

La potencia se define en la Eq. (4) [2].

$$N_a = F * \frac{v}{\eta} \quad (4)$$

El torque necesario para impulsar la banda se calcula con la Eq. (5).

$$M = \frac{N_a}{\omega} \quad (5)$$

Con base en este torque y potencia se dimensionó el eje del tambor motriz, usando el criterio de falla para materiales dúctiles de Von Mises [6, 15]. Una simulación por elementos finitos (FEM) [13], al estilo de la presentada más adelante, en la sección 3.5, validó los diámetros empleados. Posteriormente, se estandarizó el diámetro del eje a rodamientos comerciales, NTN [9] en este caso.

Finalmente, detalles de la lona seleccionada se muestran en la Tabla I.

Tabla I.

DETALLES DE LA LONA PARA LA BANDA TRANSPORTADORA

Fabricante	Icobandas	
Referencia	Banda BLB transporte liviano	
Material	Cubiertas	Lonas de algodón sin fricción de caucho
	Capas centrales	Cojines de caucho y lonas de algodón
Espesor total	1/16" (1,5875 mm)	
Peso de la banda	43 g por pulgada de longitud	
Carga de trabajo recomendada	34 lbs/plg	
Adhesión entre lona y lona	18 lbs/plg	

Fuente: Los autores.

El principal criterio tenido en cuenta para la selección de la banda fue la disponibilidad, debido a que las cargas pequeñas no requerían bandas para trabajo pesado.

3.2 Elevador de cangilones

Las variables definidas para el cálculo del elevador de cangilones [3] son longitud entre centros del elevador, capacidad meta, diámetro de tambor conductor y tensor, capacidad para transportar durante un minuto y densidad del polipropileno.

Las ecuaciones que se muestran a continuación definen las variables de operación que requiere la banda transportadora. La velocidad lineal de transporte se resuelve con la Eq. (6) [3].

$$v = d * \sqrt{\frac{g}{2h}} \quad (6)$$

La velocidad angular se expresa en la Eq. (7) [3].

$$\omega = \frac{v}{r} \quad (7)$$

La potencia se define en la Eq. (8) según [3].

$$N_a = \frac{F * v}{\eta} \quad (8)$$

El torque se calcula por medio de la Eq. (9).

$$M = \frac{N_a}{\omega} \quad (9)$$

Un procedimiento análogo, al usado en la banda por elementos finitos [13], se siguió para el dimensionamiento del eje y selección de rodamientos.

3.3 Tornillo transportador

Las variables definidas para el cálculo del tornillo transportador [3] son longitud del tornillo transportador, tamaño de la partícula de polipropileno, densidad del polipropileno y flujo másico transportado.

Las ecuaciones que se muestran a continuación definen las variables de operación que requiere el tornillo transportador.

El diámetro del sinfín se obtiene de la Eq. (10) [2].

$$De = N * T \quad (10)$$

El paso del sinfín se define en la Eq. (11) [2].

$$p = 0,5 * De \quad (11)$$

El número de hélices del tornillo viene dado por la Eq. (12) según [5].

$$\#P = \frac{L}{p} \quad (12)$$

El área de relleno de la camisa se define en la Eq. (13) [2].

$$S = \lambda \frac{\pi * De^2}{4} \quad (13)$$

donde λ es 0,4 para partículas ligeras no abrasivas [2]. La velocidad angular del tornillo transportador, ω , se calcula con la Eq. (14) [2].

$$\omega = \frac{4 * 60 * \dot{m}}{3600 * \lambda * \pi * De^2 * p * t * k} \left(\frac{rad}{min} \right) \quad (14)$$

donde k es 1 para ángulo de inclinación del tornillo transportador [2]. La velocidad lineal del tornillo transportador se define en la ecuación 15 [2].

$$v = \omega * t \quad (15)$$

El diámetro interno del sinfín se estima con la Eq. (16) [5].

$$Di = \sqrt{De^2 - \frac{4}{\pi} * \frac{\dot{m}}{p * v}} \quad (16)$$

La potencia requerida del tornillo transportador se define en la Eq. (17) según [2].

$$N_a = c_o \frac{\dot{m} * L}{367}; en (kW) \quad (17)$$

donde c_o es el coeficiente de resistencia al flujo del material con un valor recomendado [2] de 1,2 con flujo másico en Tn/h y L en m. Es importante destacar que la potencia para seleccionar el motor debe incluir la potencia consumida cuando la máquina corre sin carga.

Por último, el torque para impulsar el tornillo se estima con la Eq. (18), [17].

$$M = \frac{N_a}{\omega} \quad (18)$$

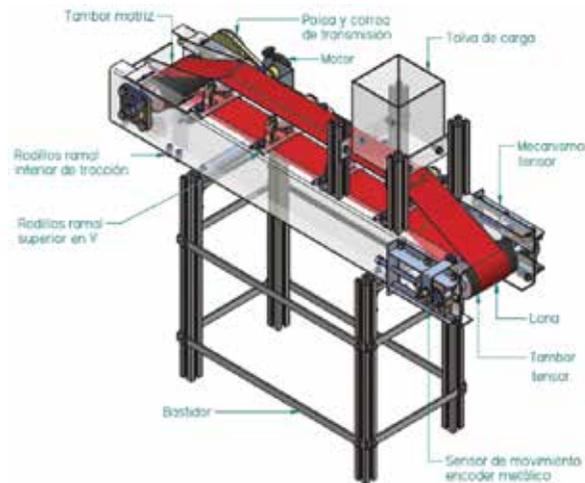
3.4 Diseño de las piezas en CAD

Por medio de un software CAD, se desarrollaron los diseños de la banda transportadora, el elevador de cangilones y del tornillo transportador. Estos diseños están basados en los cálculos que se mostraron en los numerales 3.1 al 3.3, siguien-

do recomendaciones dadas en [18] para la integración de componentes electrónicos a la estructura mecánica.

La figura 2 presenta el diseño CAD de la banda transportadora en su ensamble final. Se aprecian los componentes y cómo se escogió una configuración que la mantenga a nivel de trabajo de una persona en pie. La tolva puede ser alimentada igualmente sin necesidad de ayuda especial. Se aprecia el motor y reducción de velocidad en la parte trasera y el mecanismo de tensión de la banda en la parte delantera. La banda transportadora está hecha en su totalidad de policarbonato, excepto el bastidor que está fabricado el perfil de aluminio y los ejes y tensores en acero.

Fig. 2 DISEÑO EN CAD DE LA BANDA TRANSPORTADORA



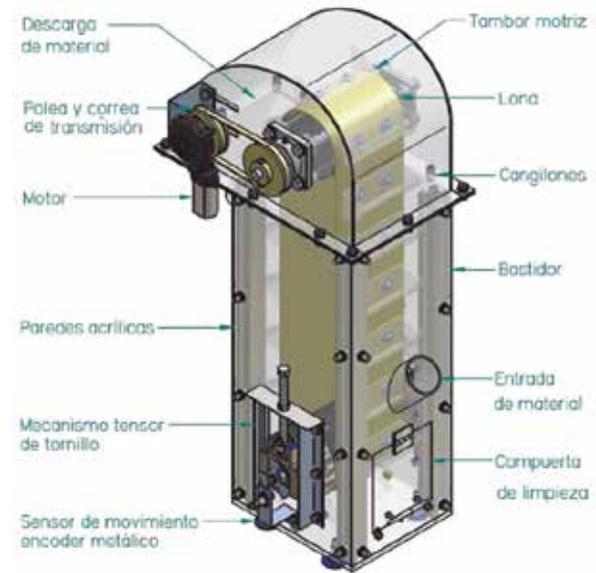
Fuente: Los autores.

La figura 3 muestra el diseño CAD del elevador de cangilones en su ensamble total. El material ingresa por la parte de abajo (marcado como entrada de material), cae a cada cangilón, es elevado por estos para ser descargado en la tolva de descarga. Se aprecia en la parte delantera el motor / reductor impulsor con la reducción final por correas. En la parte de abajo se muestra el mecanismo de tensión por tornillo y el encoder para sensado de movimiento. El elevador de cangilones está hecho en su totalidad de policarbonato, excepto el bastidor que está fabricado el perfil de aluminio y los ejes y tensores en acero.

Finalmente, la figura 4 muestra el diseño CAD del tornillo transportador en su ensamble final. Se aprecia el motor y el soporte al cual se le detalla el análisis por elementos finitos. El tornillo está

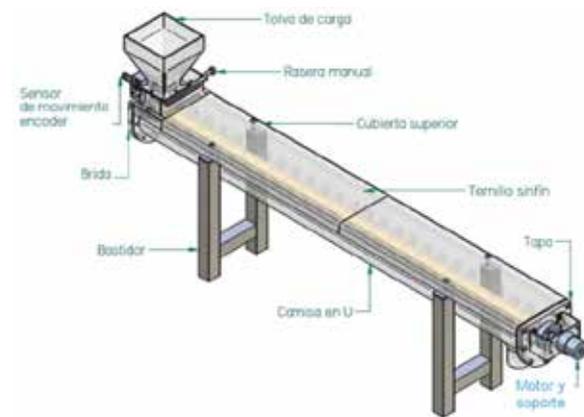
sujeito por cuatro soportes que pueden ir al piso o ser alojados sobre una mesa. Se aprecia la tolva de alimentación, la válvula de compuerta, al estilo de la usada en [1], y el encoder para sensado de movimiento. El tornillo está hecho en su totalidad de policarbonato.

Fig. 3. DISEÑO CAD DEL ELEVADOR DE CANGILONES



Fuente: Los autores.

Fig. 4. DISEÑO CAD DEL TORNILLO TRANSPORTADOR



Fuente: Los autores.

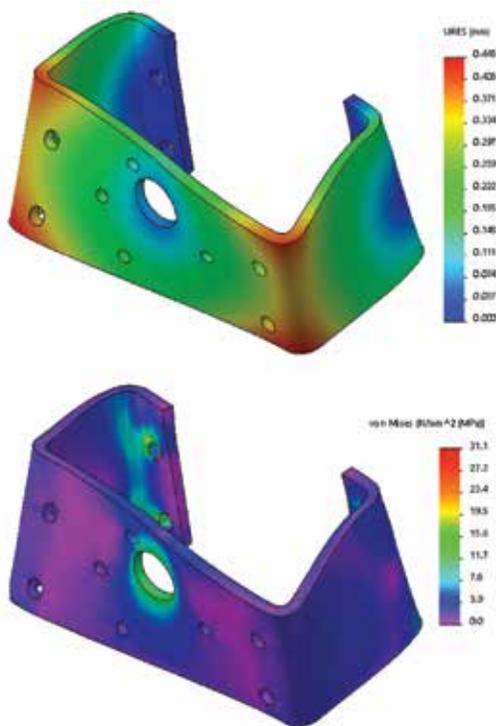
3.5 Modelado por FEM

Algunos componentes fueron objeto de un análisis por elementos finitos para observar la capacidad del componente de soportar las cargas. Se muestran a continuación resultados ejemplares para el soporte del motor del tornillo sinfín, figura 4. La simulación fue hecha en SolidWorks simulation®

2015 [13] usando 10336 elementos tipo Quad con 4 puntos jacobianos y 18784 nodos. Como propiedades mecánicas para el policarbonato fueron usados: módulo de elasticidad de 2,77 GPa, módulo de Poisson de 0,39, límite elástico lineal de 61 MPa y límite de resistencia máxima de 80 MPa [11, 15].

Los resultados de la simulación por FEM para el soporte del motor del tornillo transportador son mostrados en la figura 5 a) para desplazamiento total, y en la Figura 5 b) para el esfuerzo de von Mises.

Fig 5. RESULTADOS DE SIMULACIÓN POR FEM PARA EL SOPORTE DEL MOTOR DEL TORNILLO TRANSPORTADOR, A) DESPLAZAMIENTO TOTAL, B) ESFUERZO DE VON MISES



Fuente: Los autores.

Se aprecia en la figura 5 que el valor máximo de esfuerzo para el soporte del motor del tornillo sin fin está a un 50% del límite elástico lineal y que este valor se encuentra justo en la perforación que aloja el motor. Este lugar es justo donde se aplica el torque. Por otro lado, el desplazamiento máximo es de aproximadamente 0,5 mm, el cual se encuentra en las esquinas más alejadas del soporte del motor. Estos desplazamientos en las esquinas son casi de igual magnitud y de signos opuestos debido a la simetría del soporte y la ubicación del torque aplicado.

3.6 Selección de instrumentación

En esta etapa, que puede ir concurrente con el dimensionamiento en CAD para ajustar posiciones de los instrumentos en los transportadores, se seleccionan los diferentes componentes que integran la instrumentación, como son: el PLC el sensor, los relés, las tarjetas de control y potencia, y los motores.

3.6.1 PLC

Las alternativas para PLC se muestran en la Tabla II donde se comparan las características de los PLCs considerados: a. SIEMENS SIMATIC S7-1200 CPU1214C, b. Telemecanique Modicon Micro TSX 3705, c. OMRON CPM2C 20CDR-D; d. Allen-Bradley CompactLogix 5370 L1, y e. MITSUBISHI FX3U. Finalmente, el PLC utilizado para el control y adquisición de datos del sistema de transporte es el CQM1H-CPU51 de la marca Omron [7]. El PLC se escogió debido a su flexibilidad en cuanto al manejo, transporte su portabilidad e instalación.

Tabla II.
PLC CONSIDERADOS

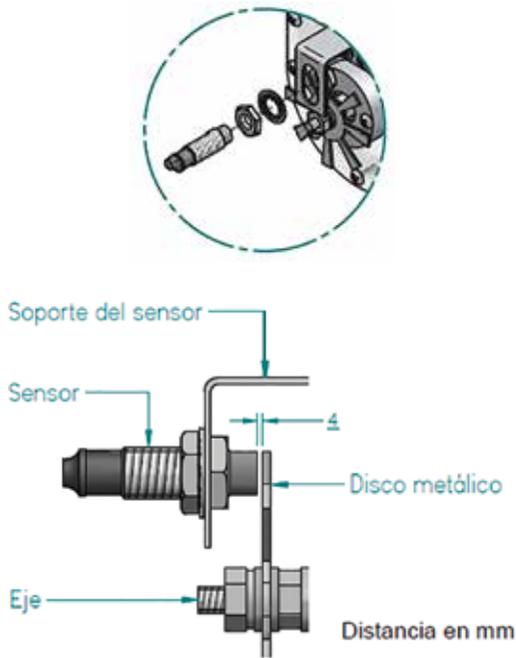
PLC		A	B	C	D	E
Puntos digitales	entradas	14	16	10	16	16
	salidas	10	12	8	16	16
Entradas/salidas integradas análogas		2	-----	-----	-----	-----
Memoria (kB)		50	-----	-----	384	5
Tiempo de ejecución (s)		0.1 μ s	0,25 ms	0,64 μ s	-----	0,065 μ s
Módulos de comunicación		EthernetRS232 RS485	RS485	RS 232	Ethernet, USB	RS485, RS422, RS232, USB
Entradas/salidas digitales		284	92	180	8	256
Entradas/salidas análogas		51	16/8	180	128	-----

Fuente: Los autores.

3.6.2 Sensor inductivo

Se consideraron varias alternativas para el sensor que se muestran en la Tabla III, donde se comparan sus características. El sensor seleccionado es de tipo inductivo de referencia PR12-4DN de Autonics [8]. La disposición de montaje del sensor respecto al encoder se aprecia en la figura 6.

Fig. 6. DETALLE DEL ENSAMBLE DEL ENCODER



Fuente: Los autores.

3.6.3 Motores eléctricos

De acuerdo a los consumos de torque y velocidad angular obtenidos en la sección anterior, se buscaron motores con esas características. La Tabla IV muestra los dos motores considerados para la banda transportadora.

Se seleccionó el motor TELCO debido a que su velocidad es cercana a la calculada para la banda transportadora y su bajo consumo de 1,8 A. La selección de este motor se definió a partir de la velocidad como prioridad, ya que la potencia y el torque están sobredimensionadas.

La Tabla V presenta los tres motores considerados el elevador de cangilones. A pesar de que posee la velocidad más alta que la requerida, se seleccionó el motor NIDEC, debido a que su torque está por encima de lo requerido y maneja un consumo promedio de 3 A.

De otro lado, la Tabla V presenta los 3 motores considerados para el tornillo transportador.

La Tabla VI muestra los motores considerados para el tornillo transportador. A pesar de tener la velocidad más alta de los tres motores, se seleccionó el motor Hsiang Neng, por su bajo consumo de amperaje y un torque por encima del especificado.

TABLA III.
SENSORES CONSIDERADOS

Sensor	Autonics PR12-4DN	Omron E2E-X5E1-M1	Telemecanique XS612BINAL2	Siemens 3RG4022-0GB33
Voltaje (VDC)	12 a 24	12 a 24	12 a 48	12 a 34
Consumo (mA)	10	13	10	10
Distancia (mm)	4	5	4	4
Temperatura de op. (°C)	-25~70	-40~85	-25~70	-25~85
Configuración	NPN	NPN	NPN	NPN
No. Cables	3	3	3	3

Fuente: Los autores.

Tabla IV.
MOTORES CONSIDERADOS PARA LA BANDA

Marca y referencia	TELCO	SMART MOTOR DEVICES
Referencia	GPMM60-2431W	WG5946
Origen	Estados Unidos	Estonia
Potencia (W)	30,81	60
Velocidad reductor (rpm)	4,5	80 (Velocidades inferiores, bajo pedido)
Relación de reducción (i)	1:546	1:30 (relaciones inferiores, bajo pedido)
Velocidad motor sin carga (rpm)	3000	3000
Velocidad nominal motor (rpm)	2500	2400
Torque reductor (Nm)	9,8	2,94 Nm (Para torques superiores, bajo pedido)
Voltaje (V)	24 VDC	12 VDC
Consumo (A)	1,8	5

Fuente: Los autores.

Tabla V.
MOTORES CONSIDERADOS PARA EL ELEVADOR DE CANGILONES

Marca y referencia	SMART MOTOR DEVICES	CHANGZHOU FULLING MOTOR	NIDEC
Referencia	WG7165	63ZY105-2420/60JW	403 559 (SWMK)
Origen	Estonia	China	Japón
Potencia (W)	200	20	20.8
Velocidad reductor (rpm)	96	103	110
Relación reducción	1:30	15	1:53
Velocidad vacío (rpm)	2900	2000	110
Velocidad nominal (rpm)	2620	1550	110
Torque (Nm)	10,78	1.5	2
Voltaje (V)	24 VDC	24 VDC	24 VDC
Consumo (A)	8,3	1.6	3,0

Fuente: Los autores.

Tabla VI.
MOTORES CONSIDERADOS PARA EL TORNILLO TRANSPORTADOR

Marca y referencia	HSIANG NENG	SMART MOTOR DEVICES	TELCO
Referencia	HN35GB-1060Y	IG-22GM	GMPT37-2413C
Origen	China	Estonia	Estados Unidos
Potencia (W)	1,24	1,7	12,7
Velocidad reductor (rpm)	2.41	2	1
Relación reducción	1500	1 a 3968	1 a 5825
Velocidad vacío (rpm)	3620	9000	6000
Velocidad nominal (rpm)	2420	7400	5150
Torque (Nm)	0,5884	0,5884	0,5884
Voltaje (V)	24 VDC	24 VDC	24 VDC
Consumo (mA)	95	110	750

Fuente: Los autores.

3.6.4 RELÉ

El relé es el dispositivo de aislamiento de la parte de control y potencia. Este relé es apto, tanto para la conexión con el PLC como para los motores eléctricos de los equipos transportadores. La Tabla VII muestra las posibles opciones para los relés electromecánicos, resaltando que los 3 relés considerados a. Telemecanique RXM4AB-1-BD, b. Omron MY2 AC24 (S) y c. Eaton Moeller D1PF-1-A-T1.) tienen la opción de tener contacto normalmente abierto o cerrado.

Tabla VII.
OPCIONES DE RELÉS CONSIDERADOS

Relé	A	B	C
Voltaje DC	28	30	24
Amperaje	6	5	6
Voltaje bobina	24	24	24

Fuente: Los autores.

Se seleccionó el relé OMRON, debido a que maneja el amperaje de contacto más adecuado en comparación con el relé de Telemecanique y al de Eaton Moeller. El amperaje de referencia para la selección del relé se tomó de la carga más alta de los motores eléctricos, en este caso, la carga del motor del elevador de cangilones que es de 3A.

3.6.5 Fuente de alimentación

El suministro de voltaje para los diferentes dispositivos de control y potencia se requiere de una fuente de alimentación. Esta fuente suministra plenamente la corriente para todos los dispositivos anteriormente mencionados como se lista en la Tabla VIII.

Tabla VIII.
CONSUMOS ESTIMADOS DE ACTUADORES E INSTRUMENTACIÓN

Instrumento	Cant.	V	A	Total carga(A)
Motor banda	1	24	1,8	1,8
Motor elevador	1	24	3,0	3,0
Motor tornillo	1	24	0,095	1,0
Sensor inductivo	3	24	0,003	9,0
Relé	3	24	0,377	1,1
CARGA TOTAL (A)				6 A

Fuente: Los autores.

Finalmente, la fuente de alimentación seleccionada para el suministro de energía para los motores eléctricos, la sensorica y los módulos de entrada y salida del PLC es la Telemecanique PHASEO ABL1REM24100 que entrega 10 A a 24 voltios.

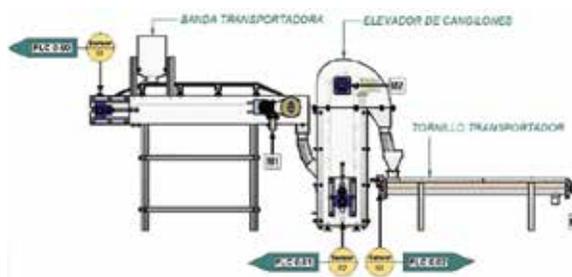
3.7 Automatización

En esta etapa se diseñó la interfaz gráfica para el monitoreo de las maquinas (Sistema SCADA) y el código de programación tipo LADDER para el control de los equipos de transporte a través del software de propietario de OMRON. Para este proyecto se utilizó el CX-Programmer para la programación del PLC y el CX-supervisor para la interfaz SCADA [7].

El accionamiento de las máquinas se compone de cinco pulsadores, así: un pulsador de arranque consecutivo de las tres máquinas, un pulsador independiente de arranque de la banda transportadora, un pulsador independiente de arranque del elevador de cangilones, un pulsador independiente de arranque del tornillo transportador, y una parada de emergencia que detiene las tres máquinas que están en movimiento. En caso de falla de algunas de las máquinas por mecánica, atascamiento o accidente, estas se detienen.

La figura 7 muestra la distribución de los actuadores del sistema de máquinas de transporte de materiales particulados, siendo M los impulsores y S los sensores de movimiento rotacional.

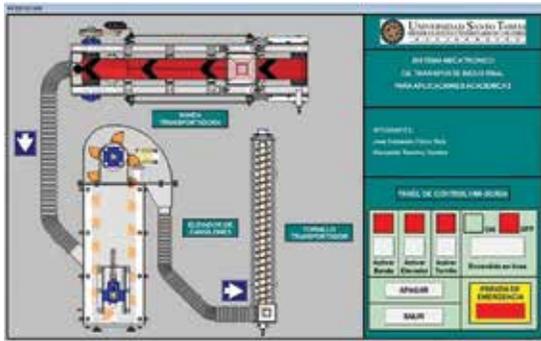
Fig. 7. DISTRIBUCIÓN DE ACTUADORES EN UNA SECUENCIA DE TRANSPORTE



Fuente: Los autores.

La figura 8 muestra la interface hombre máquina (HMI) diseñada y programada para controlar las tres máquinas individualmente o en conjunto. En esta se puede apreciar las secuencias del flujo de material sin que necesariamente los equipos permanezcan en ese arreglo.

Fig. 8. INTERFAZ HOMBRE-MÁQUINA



Fuente: Los autores.

En la figura 9 se aprecia una visión general del montaje de los equipos construidos. Se aprecia la caja de controles frente a la banda transportadora y el PLC bajo esta última. Igualmente se observa cómo los elementos se pueden cambiar de posición para tener diferentes secuencias de transporte.

Fig. 9. ENSAMBLE DE LOS EQUIPOS JUNTO CON LOS DISPOSITIVOS ELÉCTRICOS Y ELECTRÓNICOS



Fuente: Los autores.

Posterior al diseño y elaboración de planos de las piezas mecánicas, se llevó a cabo la construcción de estas, y luego su respectivo ensamble final. A su vez, durante esta etapa se buscaron elementos complementarios como tornillos, herramientas, productos como lubricantes entre otros, para el ensamble adecuado de los equipos. En la figura 10 muestra en detalle la implementación del sensor de proximidad y el encoder tal y como fue proyectado en la figura 6 y con los detalles mostrados en la Tabla III.

Fig. 10. DETALLE DEL ENSAMBLE DEL SENSOR DE PROXIMIDAD

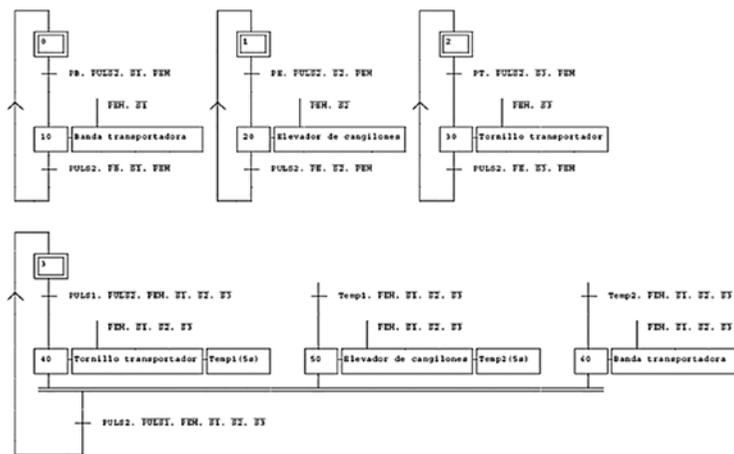


Fuente: Los autores.

Mayores detalles de dimensiones, capacidades y planos de los equipos, se pide al lector consultar [16].

El diagrama GRAFCET de los sistemas de transporte se presenta en la figura 11, el cual fue realizado e implementado siguiendo prácticas recomendadas [1], [12]. Se aprecian los pulsadores mencionados al principio de esta sección.

Fig. 11. DIAGRAMA GRAFCET DE LOS SISTEMAS DE TRANSPORTE



Fuente: Los autores.

4. RESULTADOS

Luego del ensamble final de los equipos transportadores se pusieron en marcha y se hicieron las respectivas pruebas para observar su funcionamiento: (partes mecánicas, eléctricas y electrónicas), comprobando su funcionamiento. Las pruebas hallaron inconvenientes menores como desajustes, arranque a destiempo y problemas de comunicación en los equipos, que posteriormente fueron solucionados. Posterior a estas, se midieron tiempos de transporte para 1 kg de material (polipropileno). Los resultados se muestran en la Tabla IX. Recordando que la capacidad buscada es de 20 kg / h que equivale a 1/3 kg/min, se observaron capacidades de transporte y medida de cada equipo, las cuales fueron bastante cercanas a las proyectadas. De esta forma se valida el diseño.

Tabla IX.
RESULTADOS DE TRANSPORTE DE 1KG DE PELLETS

Equipo	Capacidad medida (kg/min)	%
Banda transportadora	0,333	100
Elevador de cangilones	0,300	90
Tornillo transportador	0,333	100

Fuente: Los autores.

CONCLUSIONES

Tanto las metodologías de cálculo y la literatura consultada referencian el transporte de material particulado en cantidades industriales. Sin embargo, el uso de dichos métodos para cantidades mucho más pequeñas arrojó resultados muy cercanos a los planteados en los requerimientos de diseño. Esto valida los métodos de cálculo usados para capacidades de transporte muy por debajo de los originalmente pensados. Se advierte al lector el cuidadoso manejo de unidades y constantes de conversión.

Los equipos fueron contruidos de tal manera que todos sus componentes puedan ser intercambiados sin ningún inconveniente. Igualmente, las máquinas se pueden adaptar para futuros proyectos. El sistema es, adicionalmente, un entorno para que los estudiantes puedan implementar diferentes técnicas de control usando los sensores y motores presentes.

Con la construcción en policarbonato de los sistemas de transporte se puede observar detalladamente su funcionamiento y el flujo de material particulado (polipropileno en este caso) dentro de los equipos.

REFERENCIAS

- [1] J. F. Arias, A. I. Campos, R. Claros, J. G. Díaz, "Diseño Mecatrónico del Proceso de Mezclado de Pellets en Carlixplast Ltda," III Congreso Internacional de Ingeniería Mecatrónica UNAB, ISSN 2145-812X, Oct 2011, Bucaramanga, Colombia.
- [2] A. Miravete, E. Larrodé, "Transportadores y Elevadores," 1° ed. Barcelona: Editorial Reverté, 1996.
- [3] K. F. García, "Diseño y construcción de prototipo para sistema de recirculación de granallas para máquina limpiadora de metales," Guayaquil: ESPL. Facultad de Ingeniería Mecánica; 1999.
- [4] E. P. Pino, "Software para el diseño de transportadores de tornillo sin fin," Guayaquil: ESPL. Facultad de Ingeniería Mecánica; 2005.
- [5] C. L. León, "Diseño de una máquina tipo tornillo para lavar sal," Guayaquil: ESPL. Facultad de Ingeniería Mecánica; 2008.
- [6] R. L. Norton, "Machine design," Editorial Pearson Prentice Hall, 2006.
- [7] Autómatas programables industriales SYSMAC CQM1H. Guía de instalación.
- [8] AUTONICS. Manual Inductive proximity sensor cylindrical type DC 3 wire. <http://www.autonics.com> [consultado junio 8, 2017].
- [9] Rodamientos NBR. http://www.nbr.eu/en/wp-content/flip/nbr_katalog/ [consultado junio 1, 2017].
- [10] <https://www.bpf.co.uk/plastipedia/polymers/pp.aspx> [consultado junio 11, 2017].
- [11] F. Beer, J. Jhonston, "Mecánica de materiales," 4ª ed. McGraw-Hill, 2008.
- [12] W. Bolton, "Mecatrónica. Sistemas de control electrónico en ingeniería mecánica y eléctrica," 3 ed. México D.F.: Editorial Alfaomega; 2006. 574 p.
- [13] P. Kurowski, "Engineering Analysis with SOLIDWORKS Simulation 2015," SDC Publications. 2015. 508 p.
- [14] D. Tripathi, "Practical guide to polypropylene. Shrewsbury: RAPRA Technology," UK, 2001. 104 p.
- [15] J. T. P. Castro, M. A. Meggiolaro, "Fatigue Design Techniques," Vol I, 3 ed. USA: CreateSpace, 2016.
- [16] J. Flórez, A. Dueñes, "Diseño y construcción de un sistema mecatrónico de transporte de materiales para aplicaciones académicas." Universidad Santo Tomás; 2011.
- [17] J. H. Carvajal, C. M. Vega, J. P. Tellez, "Diseño mecatrónico de robot móvil para transporte de carga en superficies irregulares," *ITECKNE*, v. 7, n. 1, p. 19-33, 2010. doi: 10.15332/iteckne.v7i1.302.
- [18] K. Ramos-Castañeda, J. Gil-Peláez, J. Panesso-Narváez, & R. Claros-Lamus, "Design of a measurement equipment of the unevenness in a railway line," *ITECKNE*, 12(2), 168-176, 2015 doi: 10.15332/iteckne.v12i2.1243.