



Diseño de un sistema automático de medición de flujo de granos pequeños

*Martín Dario Castillo Sánchez, María de Jesús Velázquez Vázquez, Abraham Rodríguez Galeote**

RESUMEN

En el presente trabajo se desarrolla un sistema automático experimental de medición de flujo volumétrico de grano de arroz controlado mediante una interfaz digital. El sistema controla la variación de volumen del producto ensilado, para proveer el flujo volumétrico deseado mediante un dispositivo de apertura y cierre controlado electrónicamente. El control del flujo se basa en la caracterización del comportamiento dinámico del grano, el cual se modela como un flujo de fluido. El sistema cuenta con una interfaz hombre-máquina, la cual proporciona información del proceso como el tipo de grano y el flujo a manejar o despachar. La interfaz lleva a cabo la interrelación del comportamiento dinámico del grano, el control automático del dispositivo y el procesamiento de datos, para proveer el flujo volumétrico requerido. El sistema es experimental para medición y dosificación de grano de arroz y se compone de un modelo a escala con una capacidad de 70 kilogramos.

ABSTRACT

In the present work, an automatic system for measuring the volumetric flow of grain controlled by means of a digital interface is developed. The system controls the volume variation of the ensiled product, to provide the desired volumetric flow through an electronically controlled opening and closing device. Flow control is based on the characterization of the dynamic behavior of the grain, which is modeled as a fluid flow. The system has a man-machine interface, which provides process information such as the type of grain and the flow to be handled or dispatched. The interface carries out the interrelation of the dynamic behavior of the grain, the automatic control of the device and the data processing, to provide the required volumetric flow. The grain measurement and dosing system consists of a scale model with a capacity of 70 kilograms.

Palabras claves: Controlador, interfaz, medio granular, medidor de flujo.

INTRODUCCIÓN

Aunque no ha sido fácil la inserción de nuevas tecnologías en la agricultura, se aprecia una creciente penetración de ellas especialmente en el manejo de productos a granel. La demanda por

productos con calidad, por un lado, y la exigencia de la trazabilidad, por otro, han convertido a la tecnología en un elemento clave para el manejo de cualquier proceso. Un proceso que es de vital importancia en las áreas portuarias en el abastecimiento de granos, es la agilización en el manejo del material granular de los lugares de abastos, debido a que actualmente el proceso de dosificación requiere una gran cantidad de procesos y recursos, lo que da origen a altos costos. Por lo comentado anteriormente, el ámbito agroindustrial requiere de procesos automatizados en línea capaces de optimizar los procesos con el beneficio económico que implica la reducción de costos. El proceso actual de suministro a furgones, cisternas, camiones e incluso bultos, se hace al tanteo, el traslado pesado se realiza alejado de la salida del producto, por lo que es vital e imprescindible realizar un sistema medidor de flujo. Esta ventaja se traducirá en un proceso con mayor orientación y manejo hacia el usuario. Por lo tanto, el diseño de este sistema automático de dosificación de grano va enfocado a satisfacer la necesidad de distribuir material granular en una forma continua en línea, de esta forma poder hacer más eficiente el proceso de medición actual de las zonas portuarias, de la industria de almacenamiento, también de distribución de material granular, el objetivo es desarrollar un sistema automático experimental de dosificación y medición de flujo volumétrico de grano de arroz en línea, capaz de cuantificar el flujo de forma automática, con la ayuda de un dispositivo de apertura y cierre controlado electrónicamente, a fin de eliminar el proceso de pesaje mediante básculas.

CARACTERÍSTICAS DE LOS MEDIOS GRANULARES

Un medio granular se puede definir como un conjunto de partículas, similares entre sí, que interactúan de un modo disipativo. El tamaño de las partículas que conforman un medio granular puede abarcar varios órdenes de magnitud: desde el orden del milímetro (granos de arena y arroz) hasta el orden del metro (coches y rocas). A los sistemas de partículas de tamaño menor que 0.3 mm se les llama "polvos", y tienen propiedades específicas. Las más notables provienen del hecho de que algunas fuerzas de contacto (debidas, por ejemplo, a la humedad o a la carga electrostática) comienzan a ser de magnitud comparable al peso de los granos. Por eso, muchos polvos tienen un comportamiento gobernado por fuerzas cohesivas. A los sistemas de partículas intermedias los consideramos como medios granulares "secos", no cohesivos: las únicas fuerzas relevantes son las inerciales y a veces un campo externo (la gravedad). En el límite superior, no se considera como un "medio granular" a sistemas de partículas cuyo tamaño sea mayor que varios metros, debido a que en el

* Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Unidad Zacatenco, Departamento de Mecánica, Dr. Martín Dario Castillo Sánchez, C Dr. María de Jesús Velázquez Vázquez, Ing. Juan Daniel Rivas Martínez, Correo electrónico: avinfer@hotmail.com





laboratorio sería difícil reunir el número de elementos suficientes para observar fenómenos colectivos. Sin embargo, en la naturaleza se dan algunas de esas agrupaciones: por poner un caso, los anillos de los planetas pueden considerarse un medio granular.

DENSIDAD

El tamaño de la partícula es una de las características más importantes de un elemento granular. Un problema importante es la distribución de las partículas que afectan la fluidez de los elementos granulares. Otro problema es la densidad, ya que los granos son compresibles; la densidad global es referida a especificaciones adicionales como: pérdida de densidad global, densidad global de compactación por golpeo, o densidad global compactada.

ÁNGULO DE REPOSO

En la mayoría de los procesos industriales se manejan productos pulverulentos cuya granulometría oscila entre amplios valores. La forma más fácil de conocer la fluidez de un elemento granular es la medida del ángulo de reposo. Los sólidos particulados, como los líquidos, fluyen; si vertemos un líquido sobre un vaso observaremos que termina alcanzando el reposo con una superficie libre horizontal (despreciando la ligera curvatura debida a la tensión superficial). Si repetimos el experimento con un polvo, harina, por ejemplo, observaremos que el reposo se alcanza con una protuberancia superficial cónica como se observa en la figura 1a. El ángulo que forma la superficie lateral del cono con la horizontal es distinto en los diferentes sólidos y se conoce como “ángulo de reposo” (véase figura 1b). De forma ordinaria, son iguales el ángulo de reposo del producto escurrido (figura 1b) a que el del producto vertido (figura 1c). Toda partícula que caiga fuera de la pendiente en cuestión se deslizará hacia abajo. En la superficie, y por debajo de ella, las partículas se encuentran en equilibrio: la tracción gravitacional se ve contrarrestada por la interacción entre las partículas; el ángulo de reposo del grano tiene por tanto un significado similar al del valor de deformación plástica.



Figura 1a. Ángulos de reposo del producto vertido

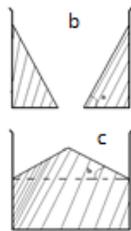


Figura 1b y 1c. Ángulos de reposo del producto drenado y vertido (b)

En la tabla 1, se observan los ángulos de reposo de diversos alimentos; es de hacer notar que se ven afectados por la densidad,

el tamaño, la distribución por tamaños y las características superficiales de las partículas.

Tabla 1. Ángulo de reposo de varios alimentos granulares, Ravenet (19779.)

Granos	θ	Granos	θ
Arroz	20	Azúcar granulado	35
Maíz	21	Chocolate en polvo	40
Cebada	23	Harina	45

Por lo tanto, se afirma que con un ángulo mayor al de reposo, habrá mayor libertad en el flujo del elemento granular. Donde una regla empírica Ravenet (1977), es: elementos granulares con ángulo de reposo menor de 40° fluirán libremente mientras que elementos granulares con ángulos de 50° o más tendrán problemas de flujo.

PRESIONES EN EL MEDIO GRANULAR

Ya en 1852, Hagen advirtió que, como consecuencia inmediata de la ley de Coulomb, la presión en el fondo de un contenedor lleno de arena no depende de la altura del mismo. Esto se debe al efecto de formación de arcos que transmiten las fuerzas a las paredes de tal forma que las capas inferiores no soportan todo el peso de las superiores, como se observa en la figura 2. Cabe destacar que esta independencia se observa a partir de cierta altura de la columna granular teniendo en cuenta el ancho del contenedor y las propiedades del material. El primero en formular matemáticamente este fenómeno fue Janssen (1895). Su análisis fue de gran importancia ya que la mayoría de los países lo han utilizado en sus códigos de procedimiento para diseños de silos. Más aún, los manuales actuales traen correcciones empíricas a las aproximaciones hechas por Janssen. A continuación, se presenta el análisis original de Janssen. Considérese un recipiente cilíndrico que contiene un medio granular no cohesivo, Parisi (2000).

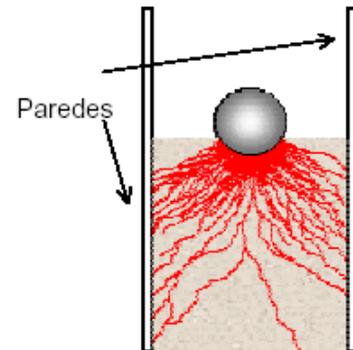


Figura 2. Corte transversal de un cilindro con un material granular.

En rojo se ve la distribución de las fuerzas.

- Las tensiones son uniformes a lo largo de cualquier sección horizontal del material.



- b) Las componentes vertical y horizontal del tensor de tensiones son las principales.

Ciertamente, estas dos suposiciones son idealizaciones que no se corresponden con la realidad. Varios autores han realizado correcciones a estos postulados, como por ejemplo Walker (1966), Zurigel (2013). Sin embargo, los resultados de Janssen han sido de gran utilidad. Considérese un balance de fuerzas sobre una sección transversal del lecho granular, ubicado a una profundidad z , como se muestra en la figura 3. El elemento dibujado está sometido a una fuerza hacia abajo $A\delta z$ y a otra fuerza hacia arriba $A(\delta z + d\delta z)$, considerando la hipótesis 1, donde A es el área de la sección transversal del cilindro. Si ρ_m es la densidad del material granular y g la aceleración de la gravedad, el peso del material en esa franja es $g\rho_m A dz$ y por último hay una fuerza hacia arriba debido al rozamiento con las paredes $\pi D dz \tau_p$.

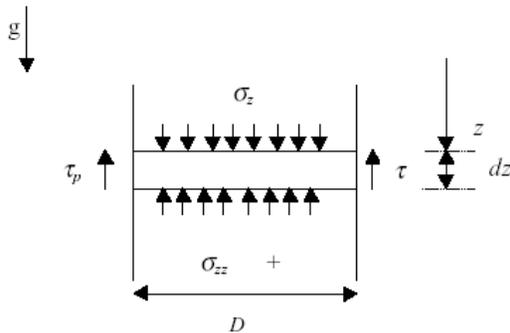


Figura 3. Tensiones en un elemento cilíndrico

El balance de fuerzas resulta (Ecuación 1):

$$\frac{\pi D^2}{4} \sigma_z + \frac{\pi D^2}{4} g\rho_m dz = \frac{\pi D^2}{4} (\sigma_z + d\sigma_z) + \pi D dz \tau_p \quad (1)$$

Tomando el límite cuando dz tiende a cero, se tiene ecuación 2:

$$\frac{d\sigma_z}{dz} + \frac{4\tau_p}{D} - g\rho_m = 0 \quad (2)$$

Dado que el material es no cohesivo se puede escribir la ecuación 3.

$$\tau_p = \mu_p \sigma_r \quad (3)$$

Donde μ_p es el coeficiente de fricción interna entre el material y la pared, tenemos la ecuación 4:

$$\sigma_r = K\sigma_z \quad (4)$$

Donde K es conocida como la constante de Janssen. Substituyendo la ecuación (1) y (2) en la ecuación (3), se obtiene la ecuación 5.

$$\frac{d\sigma_z}{dz} + \frac{4\mu_p K}{D} \sigma_z = g\rho_m \quad (5)$$

Teniendo en cuenta que a $z=0$, la tensión es nula (superficie libre), la solución para esta ecuación diferencial ordinaria de primer orden se muestra en la ecuación 6.

$$\sigma_z = \frac{g\rho_m D}{4\mu_p K} \left[1 - \exp\left(-\frac{4\mu_p K z}{D}\right) \right] \quad (6)$$

Lo cual evidencia que la componente del tensor δ_{zz} tiende a un valor asintótico a medida que aumenta z , diferenciando a los medios granulares de los líquidos donde la presión crece linealmente con la profundidad (hidrostáticamente). Considerando las ecuaciones (5) y (6) se observa que también δ_{rr} y τ_p tienen un comportamiento asintótico. El valor asintótico de la tensión vertical a profundidades grandes (σ_{zz}^∞) depende de las propiedades del material, del diámetro del cilindro y de K , que varía según se trate del caso pasivo o activo. Para un material granular típico δ_{zz} alcanza su valor asintótico para z entre $0.2D$ (pasivo) y $2D$ (activo).

CAUDAL

Si $N(t)$ es el número de partículas que salen del silo en función del tiempo, se define el caudal como, ecuación 7.

$$Q = \frac{dN(t)}{dt} \quad (7)$$

A diferencia de lo que ocurre en el caso de los líquidos, en sistemas granulares el caudal es independiente de la altura de la columna. Esto ocurre cuando la presión en la boca del silo ha alcanzado su valor asintótico. Otra posible causa puede ser que las paredes inclinadas de la zona cónica del silo soporten el peso del material a través de arcos dinámicos que transmiten las presiones a dichas paredes, manteniendo la presión en el orificio de salida constante. La ecuación 8, define el caudal en la zona donde Q es constante. Se ha verificado experimentalmente, Ferreira (2000), que el caudal en un silo 3-D (ecuación 8), es proporcional a,

$$Q \approx n_p \sqrt{g} (d - cr)^{2.5} = B(d - cr)^{2.5} \quad (8)$$

Donde n_p es el número de partículas por unidad de volumen, d el diámetro del orificio de salida del silo, r el radio medio de las partículas y c un factor adimensional que permite considerar que



una fracción del orificio de salida no es utilizada, corrigiendo al diámetro real del mismo por uno efectivo ($d-cr$). En el caso 2-D el exponente 2.5 debe ser reemplazado por 1.5. Cabe notar que la funcionalidad de la expresión de Beverloo surge simplemente de consideraciones dimensionales del sistema.

MEDIDOR TIPO TURBINA

Los elementos mecánicos de vaciado no son más que un sistema de control para la extracción del material almacenado en silos, tolvas y celdas. Los extractores han de considerarse como un elemento más en el sistema celda-mecanismo de extracción. Por tanto, las celdas han de estar diseñadas para vaciarse por gravedad con un flujo másico. La turbina Pelton fue creada y patentada en 1889 por el norteamericano Lester Allan Pelton. El principio de funcionamiento es relativamente simple, ya que constituye una evolución lógica de la antigua rueda hidráulica. Son notables su suavidad de giro y su buen funcionamiento a carga parcial.

SENSORES DE NIVEL

Otra área de interés en el desarrollo del prototipo es el poder medir la altura del grano contenido dentro del silo, para poder así sacar una relación de presión y altura, como se muestra en la figura 4. Se han encontrado varios tipos de sensores de nivel en el mercado, los cuales son equipos de radar que pueden llegar a censar hasta 70 metros de profundidad. Los cuales se muestran en la figura 5.



Figura 4. Sensor de nivel



Figura 5. Sensores de nivel tipo radar.

Se debería de tomar en cuenta las siguientes consideraciones:

- Reflexión del grano
- Tipo de señal a ocupar, puede ser por ondas sonoras de alta frecuencia entre el rango de 20 a 40 Hz.

El funcionamiento de este medidor es por ondas de alta frecuencia en el rango de 20 a 40 KHz que se propagan por la fase gas hasta que chocan con el sólido (grano), se reflejan y alcanzan el receptor situado en el mismo punto que el emisor. El tiempo entre la emisión de la onda y la recepción del eco es inversamente proporcional al nivel, Rein (2016).

DESARROLLO

La interfaz hombre-máquina está constituida por la construcción de un panel de control, así como de la programación para poder controlar al sistema, es decir tener un control logístico y algebraico de todo el proceso. Se empezará mencionando que el instrumento para ser programado es un microcontrolador AVR de ATMEL®, esto por ser económicos y con un set de instrucciones reducidas. Con el propósito de controlar el teclado y un LCD de 4x16 (4 líneas de 16 caracteres) se optó por escoger al microcontrolador ATMEGA8535. El software para la programación de este microcontrolador es realizado a través de CODEVISION AVR®, que es un compilador del lenguaje C; el cual dio como resultado una programación más eficiente y eficaz, debido a que se necesitaba realizar demasiadas operaciones algebraicas que en lenguaje ensamblador serían un poco difícil de realizar.

CONFIGURACIÓN DE TECLADO Y LCD

En el dispositivo de entrada funciona de la siguiente manera: Desde el punto de vista eléctrico, cada tecla es un mecanismo idéntico a un pulsador. La aportación de este componente consiste en la configuración de las teclas para que necesiten pocas líneas de entradas en la detección de la que se ha presionado, como se observa en la figura 6. Para disminuir las líneas necesarias para detectar la que fue pulsada, éstas se agrupan de forma matricial en filas y columnas. Con esta configuración, un arreglo matricial de 12 teclas solo necesita 7 líneas del AVR para llevar a cabo la realización de su trabajo. Si cada una de las mismas actuase como un pulsador individual se necesitarían 12 líneas de E/S del microcontrolador para gestionarlas.

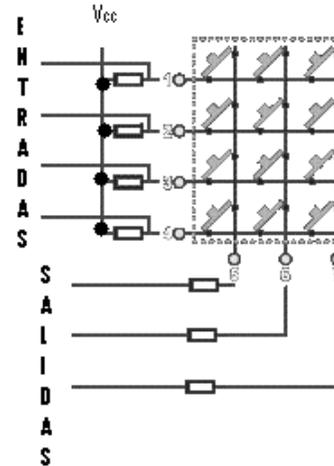


Figura 6. Teclado

En la figura 6 se muestran las cuatro líneas de entradas que serán las que reciban los niveles lógicos que tienen las filas del teclado y las tres líneas de salidas a las que se les aplicará un patrón lógico (0 o 5 volt), a las tres columnas del teclado.



CANTIDAD DE MASA A DESPACHAR

El proceso de la cantidad de masa despachándose consiste en la activación de los sensores, apertura de la válvula, para que dé inicio al vaciado, y el cálculo aproximado de la cantidad de masa que se está despachando.

SENSOR DE PRESIÓN

La finalidad de trabajar con un sensor de presión es poder medir las variaciones de presión del grano contenido en el silo, pero existe el siguiente problema, el sensor es un transductor de presión para gases o líquidos, por lo que es necesario sacar una curva característica de trabajo del sensor, presión contra corriente eléctrica, utilizando ya sea un líquido, agua o un gas. Con la curva característica esperamos lograr la relación vs presión del grano con la corriente que se mide con un multímetro y la tarjeta de adquisición de datos de Texas Instruments®, esta está en conjunto con el software Labview 7.0®. Por lo que fue necesario realizar varios acoplamientos entre el sensor y el grano, utilizando una membrana de diferentes materiales, estas fueron hechas de espuma de poliuretano, caucho y aluminio. Cabe mencionar que el sensor funcionó en forma adecuada para líquido y gas, pero con el grano no se logró un funcionamiento aceptable. El sensor de presión PMC 131 A32F1A2S, el cual se muestra en la figura 7, es un transductor de presión, que mide presiones absolutas y manométricas de gases, vapor y líquidos. Convirtiendo la entrada de presión de 0 a 1 Mpa en una salida eléctrica de 4 a 20 mA. Se realizaron varios experimentos para tratar de censar la presión del grano. Pero como se mencionó anteriormente el grano produce bóvedas que amortiguan y desvían las presiones a los costados del silo, esto cuando el grano está en forma estática, además que se producen zonas de reposo en los costados del silo, cuando el grano está en forma dinámica. Estos fenómenos ocasionaron que se lograra cuantificar una curva característica del grano junto con el sensor.

DISPOSITIVO DE NIVEL

El sensor de altura consiste en un medidor ultrasónico de distancias de bajo costo desarrollado por la firma DEVANTECH Ltd®. El módulo SRF05 trabaja en el rango de medida de 1.7 cm a 4.5 metros, que se muestra en la figura 8. Dispone de un modo de operación que se selecciona simplemente conectando el pin “Mode” (Modoo) a GND. Dicho modo permite al SRF05 emplear un único pin de E/S que sirve tanto para dar la orden de inicio o disparo, como para obtener a la medida realizada (ECO). Cuando el pin de “Modo” no se emplea y se deja sin conectar, el SRF05 trabaja de la manera siguiente: la señal de disparo y la salida de ECO se realizan por pines diferentes.

DISPOSITIVO MAGNÉTICO

El sensor magnético que ocupamos para medir las r.p.m. en la turbina es el US5881 que es un switch unipolar de efecto hall-de baja sensibilidad. El cual opera con un voltaje de 3.5 a 24 Volts, en nuestro caso está funcionando con 5V, cabe mencionar que es tecnología CMOS y cuenta con un disparador de pulsos el cual envía una señal cuadrada, estamos aplicándolo en su modalidad,

switch de estado sólido. El funcionamiento eléctrico se muestra en la figura 9 y los pines del CMOS son: pin “1”, voltaje de alimentación, pin “2” la tierra y el pin “3” es la salida.



Figura 7. Transductor de presión

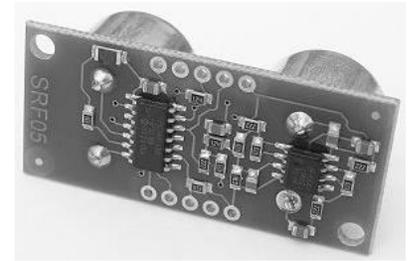


Figura 8. Sensor de altura ultrasónico SRF05

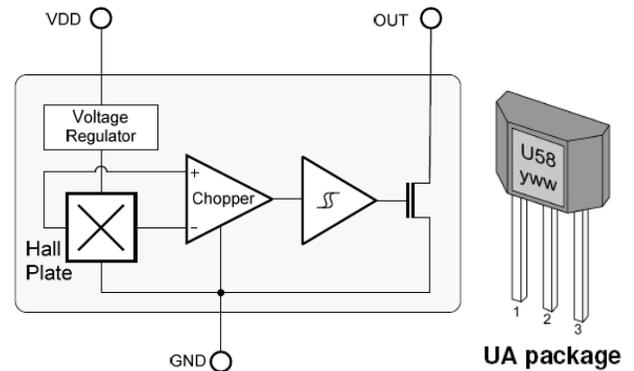


Figura 9. Diagrama Funcional del REDD SWITCH

Se armó la siguiente conexión electrónica, mostrada en la Figura 10. Fue tomada de la hoja de especificaciones de dicho sensor.

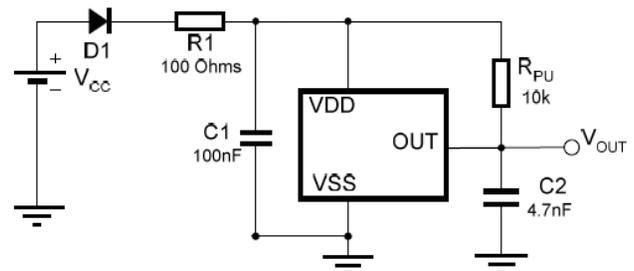


Figura10. Circuito para el sensor para evitar ruido y regreso de corriente

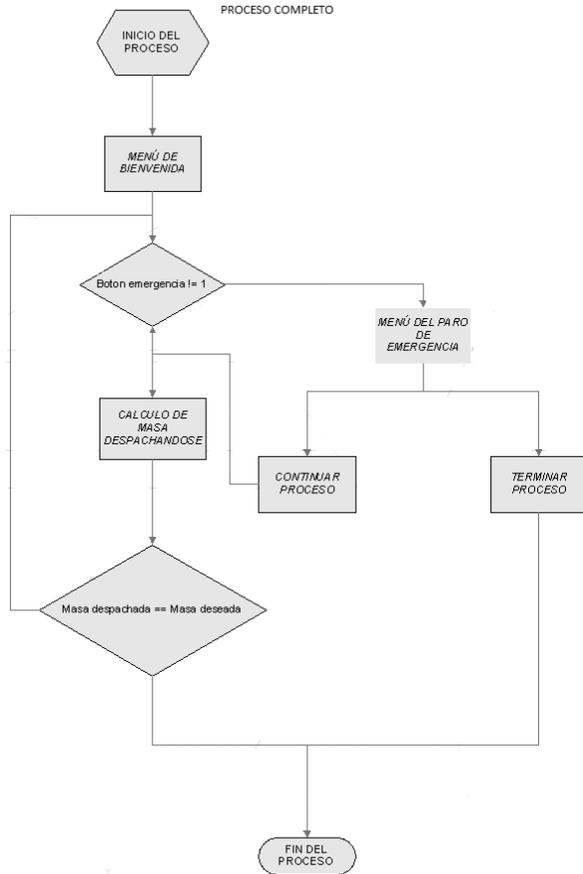
Para la operación apropiada, se recomienda colocar un condensador cerámico de 100nF tan cerca como sea posible al



dispositivo entre el VDD y el pin de tierra. Para la protección del voltaje reverso, se recomienda conectar una resistencia en serie con el pin de VDD.

DISEÑO MECANICO ENSAMBLE

Sistema Medidor de Flujo de Grano



DISPOSITIVO MEDIDOR DE FLUJO GRANULAR

Con el medidor de flujo de grano se obtiene una cuantificación aproximada de la velocidad de salida del mismo, debido a la separación entre la boquilla de salida y los álabes de la turbina que es mínima, este espacio que ocupa el arroz al tener contacto con los álabes de la turbina, para producir el movimiento de esta, es de 5.7cm aproximadamente. El movimiento producido se aproxima a la velocidad angular de la turbina para poder calcular así la cantidad de flujo de grano que está saliendo por un determinado periodo de tiempo, con la ayuda del microcontrolador y su programación de control.

El número de álabes requeridos para la turbina se seleccionó mediante la experimentación con el objetivo de tener un buen desempeño al ser impulsada por el flujo de arroz.

Finalmente se optó por reducir su número, dejando solo seis repartidos cada 60°, en la circunferencia que utilizamos como núcleo, quedando como se muestra en la figura 11.

La forma de censado de las vueltas de la turbina es por medio de varios imanes colocados en cada álabe, para así interactuar con el sensor de efecto hall, posicionado en el marco de la turbina. De esta forma se consigue hacer el conteo de cuantas vueltas está realizando la turbina en un determinado periodo de tiempo con una buena resolución. Los datos medidos se validaron con la utilización de un tacómetro de la marca DT-2236®, al observar que la desviación de uno con otro fue de 5 r.p.m.

DISEÑO DE LA COMPUERTA

La construcción de la compuerta está realizada en base al diámetro de salida de la tolva por lo que se construyó con un diámetro de 5.7 cm y consta de dos partes cilíndricas barrenadas en sus caras laterales por un rectángulo respectivamente, este barrenado tiene el propósito de contener el dispositivo mecánico hecho de acrílico encargado del paso del grano. Como se observa en la figura 12.

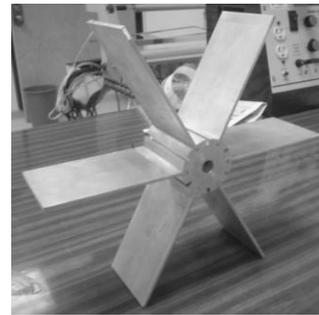


Figura 11. Turbina Pelton de 6 alabes

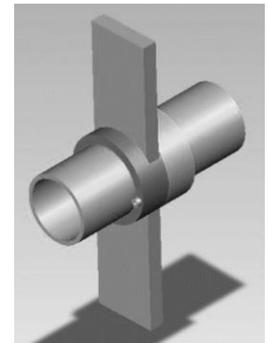


Figura 12. Dibujo de la compuerta

La caída del flujo de grano es controlada por un pistón neumático de la serie BD-1 1/2-4.33" P de la firma GUSS & ROCH®, como se muestra en la figura 13.

El cual es activado electrónicamente por un solenoide piloto de la serie GKG-5/2-1/4-Z de la firma GUSS & ROCH®. Conjuntamente realizan el trabajo de abrir o cerrar el paso del grano hacia la turbina. El pistón se encarga de cerrar y abrir la compuerta mediante la admisión y expulsión de aire, para calcular la fuerza del avance del pistón y la cantidad de presión requerida se realizaron algunos cálculos. El solenoide piloto se alimenta con 120V y es disparado por pulsos provenientes del microcontrolador, para conmutar el avance del émbolo. El sistema finalmente en conjunto queda como se muestra en la figura 14.

Analizando los diámetros de las salidas y en base a la teoría de construcción de silos se observó que los diámetros de las boquillas de los conos calculadas a escala están fuera de las medidas recomendadas por la bibliografía 0.02m y 0.03m, para solucionarlo se hizo la relación geométrica tomando en cuenta los diámetros de



entrada y salida del silo real obteniendo una constante que se muestra en la ecuación 9.



Figura 13. Pistón Neumático



Figura 14. Ensamblaje del sistema medidor de flujo de grano.

$$\frac{D_{mayor}}{D_{menor}} = \frac{2.5m}{0.3m} = 8.33 \quad (9)$$

Con la constante calculamos el diámetro menor para el diseño del prototipo a escala, en el cual se propone el diámetro mayor que en este caso es de 0.5 metros; de esta manera se obtiene una relación del escalamiento del silo al prototipo que se pretende realizar, como se muestra en la ecuación 10.

$$D_{menor} = \frac{D_{mayor}}{8.33} = \frac{0.5}{8.33} = 0.06m \quad (10)$$

La altura del prototipo es de 1.24 metros, posteriormente se tratará de realizar un escalamiento aplicado en el prototipo con relación a las condiciones del silo real.

El ángulo que forman la mayoría de los granos es de aproximadamente 27°. Los granos húmedos o el grano muy pequeño producen pendientes ligeramente más planas. La tolva de descarga en la parte inferior del silo debe tener forma cónica con pendiente mayor al ángulo de reposo, en caso contrario, no se presenta el deslizamiento del grano. Los depósitos más pequeños necesitan pendientes mayores a causa de la fricción que se presenta en los extremos de la tolva.

Con los diámetros calculados en base a la constante, determinamos el ángulo del cono de 45° de inclinación con lo cual se logra un deslizamiento eficaz de los granos en nuestro caso del arroz.

De acuerdo a la información presentada anteriormente y descartando los primeros escalamientos, las medidas del prototipo de silo se muestran en la Figura 15.

CONSTRUCCIÓN DE LA ESTRUCTURA SOPORTE

Formada por cuatro pilares de 2m de altura en la cota .60cm y 1m se construyó un entramado de barras de acero para dar soporte al silo. La estructura ha de soportar las cargas verticales debidas al peso de la estructura, peso propio del silo (cuerpo y tolva), peso del producto almacenado y la turbina. Una de las partes más importantes del dispositivo es el diseño del circuito que va a controlar el vaciado del silo, es decir la interfaz-humana, figura 19.

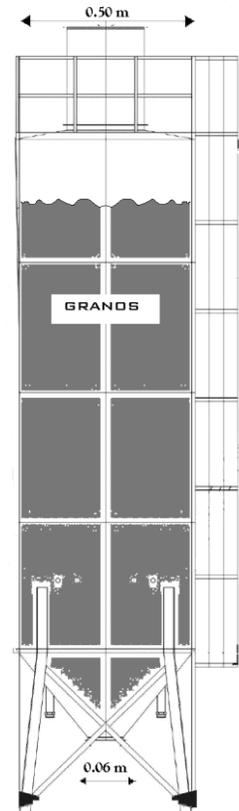


Figura 15. Medidas del silo tomando en cuenta la relación de diámetros

CONTROL ELECTRÓNICO

Como se planteó en el proyecto, esta parte mostrará en un LCD las instrucciones a seguir para poder llevar a cabo el vaciado, ingresar la cantidad de masa a despachar y mostrar las fases del proceso de vaciado tales como: altura del grano contenido en el silo y las revoluciones a las cuales gira el dispositivo medidor de flujo de grano. Para esto se diseñó el circuito colocado en un diagrama impreso que se muestra en la parte inferior, el cual fue hecho utilizando el Software de Express PCB, figura 17.

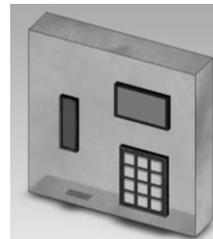


Figura 16. Dibujo del panel de control

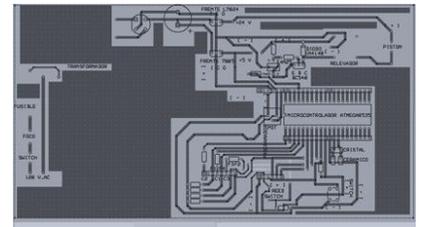


Figura 17. Diagrama del impreso del panel de control



El circuito está compuesto por el programador de AVR's que ayudara a corregir posibles fallos en el programa o para actualizaciones futuras del software, así como los demás segmentos importantes que hacen que funcione correctamente el programa:

- Sensor SRF05, el cual censa la altura de llenado y vaciado del silo.
- Pistón neumático y electroválvula que controla la salida y contención del grano.

El circuito eléctrico de control se muestra en la figura 18, en su etapa Terminal.

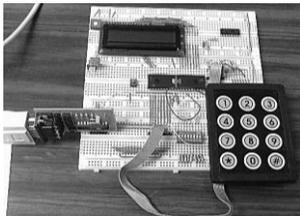


Figura 18a. Circuito del panel de control en protoboard



Figura 18b. Panel de control

Esquema de las partes del proyecto

La realización final del proyecto físicamente se observa en la figura 19.



Figura 19. Armado final

CONCLUSIONES

Este prototipo experimental busca ofrecer una ventaja sobre los actuales métodos existentes en el mercado, que realizan la medición repetitiva utilizando básculas, debido a que realiza la medición del flujo volumétrico de grano en línea, es decir, el dispositivo entrega la cantidad de grano que se le haya especificado, por medio de la interfaz hombre-máquina, de una forma rápida, confiable y versátil. Cabe mencionar que por la simplicidad del dispositivo es posible expandir más de una medición en línea, todo controlado por un sistema central.

En la realización del prototipo se llevaron a cabo varios experimentos en los cuales se observó que el chorro de arroz no era muy compacto o uniforme, lo que no producía un flujo de salida homogéneo porque en la boquilla de la tolva se produce una turbulencia, debido al choque de las partículas de arroz, por este motivo es que se colocó un tubo en el interior de la boquilla del silo para uniformizar la salida del chorro de arroz, esto permite que no haya una gran dispersión de los granos a la salida, siendo ésta un poco más compacta. Cabe mencionar que esto se hizo para poder uniformizar la salida del flujo, ya que en el área de salida de grano tenía pequeñas variaciones.

Se debe de mencionar que el prototipo experimental funciona con un error del 5%, esto posiblemente al tiempo de abertura y cierre de nuestra compuerta, y de la distancia a la que está colocado el medidor tipo turbina de la salida del silo.

REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

- Ravenet Juan (1977). SILOS. Flujo de vaciado de sólidos. Formación de bóvedas. Efectos. Ed. Editores Técnicos Asociados, S.A. España.
- Ravenet Juan (1979). SILOS. Teoría investigación y construcción. Ed. Editores Técnicos Asociados, S.A. España.
- Parisi Daniel R. (2000). "Simulación de Reactores Sólido – Gas" Tesis de Doctorado en Cotutela. Universidad de Valencia, España.
- Zuriguel Ballaz Iker D. (2013). "Flujo y atascos de un medio granular en la descarga de silos" Tesis de Doctorado en Física. Universidad de Navarra. España.
- Ferreira L, Flores J. Solovey (2000). "Oscilador de Masa Variable" Estudio y aplicación de medios granulares. Universidad de Buenos Aires. Argentina.
- Rein Soto Guillermo –Yarritu, de Andrés Martínez Ángel. (2016). "Simulación Numérica de Transporte de Material Granular por Vibración". Universidad Pontificia de Comillas Madrid. España.

INFORMACIÓN ACADÉMICA

María de Jesús Velázquez Vázquez: Licenciada en Economía por la Escuela Superior de Economía del Instituto Politécnico Nacional, Maestría en ciencias en educación y especialista en finanzas, Candidata a Doctor en Ciencias en Ingeniería de Sistemas por la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la ESIME Zacatenco, profesora investigadora de tiempo completo y exclusivo en el IPN.



Abraham Rodríguez Galeote: Ingeniero Mecánico egresado de la Escuela superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica del Instituto Politécnico Nacional, Maestría en Ingeniería Mecánica en diseño mecánico, por la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la ESIME Zacatenco, profesor investigador de tiempo completo y exclusivo en el IPN.

Martín Darío Castillo Sánchez: Ingeniero Mecánico egresado de la Escuela superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica del Instituto Politécnico Nacional, Maestría en Ingeniería Mecánica en diseño mecánico, por la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la ESIME Zacatenco, Doctorado en ciencias en ingeniería mecánica por la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la ESIME Zacatenco, profesor investigador de tiempo completo y exclusivo en el IPN.