

## 12º CONGRESO IBEROAMERICANO DE INGENIERÍA MECÁNICA

Guayaquil, 10 a 13 de Noviembre de 2015

### SISTEMA DE DOSIFICACIÓN NEUMÁTICA PARA EL CULTIVO DE SEMILLAS DE ZANAHORIA

**Herbert Yépez<sup>1</sup>, Rosendo Franco<sup>1</sup>, Pedro Ayllón<sup>1</sup>, Cristian Carrasco<sup>1</sup>, Luis Antezano<sup>2</sup>.**

1-Grupo INACOM, Sección Ing. Mecánica, Dpto. de Ingeniería,  
Pontificia Universidad Católica del Perú, Av. Universitaria 1801, Lima 32 (Perú).  
2-El Automático EIRL, Psj. Santa Rosa S/N, Buenos Aires, Chupaca, Junín (Perú).  
e-mail: [hyopez@pucp.pe](mailto:hyopez@pucp.pe)

Palabras claves: Siembra de zanahoria, diseño mecánico, dosificación neumática.

#### RESUMEN

El proceso de la siembra de zanahoria en la provincia de Chuapaca, departamento de Junín, demanda una considerable cantidad de recurso humano y, debido a técnicas de sembrado poco sofisticadas, sólo se alcanza a aprovechar aproximadamente el 70 por ciento del terreno preparado para el cultivo. El presente trabajo describe el principio de funcionamiento y el diseño mecánico de un prototipo de máquina de sembrado, que permite dosificar las semillas de zanahoria cada 6 centímetros en dirección longitudinal y transversal a su recorrido sobre el surco del terreno. El dosificador adhiere las semillas sobre la superficie de un tambor provisto de agujeros mediante presión negativa generada en su interior (succión), luego las semillas adheridas son transportadas desde una tolva de almacenamiento a un punto de descarga donde el sistema las expulsa mediante la interrupción del vacío y la generación presión positiva (soplado). Para lograr los objetivos propuestos se diseñó un sistema de transmisión que acopla las ruedas de la máquina con el tambor dosificador y se seleccionaron los equipos necesarios para la succión y soplado. Actualmente el prototipo está siendo sometido a pruebas de campo, las cuales brindarán información que permitirán la retroalimentación del diseño para obtener una propuesta definitiva.

**PALABRAS CLAVE:** Siembra de zanahoria, diseño mecánico, dosificación neumática.

## DESCRIPCIÓN DEL ESTUDIO

En el marco de la convocatoria FIDECOM que promueve el Estado Peruano mediante su programa FINCyT, la empresa El Automático E.I.R.L, en asociación con la Pontificia Universidad Católica del Perú, fue beneficiada con financiamiento para el diseño y fabricación de un prototipo de sembrado de semilla de zanahoria con dosificación neumática. El Automático E.I.R.L, una micro-empresa que realiza actividades de desarrollo de maquinaria agrícola en la provincia de Chupaca, Junín - Perú, ha identificado que el proceso de siembra de la zanahoria demanda una cantidad considerable de recurso humano y elevados costos de semilla. Además, estima que sólo el 70% de la tierra destinada para la siembra es aprovechada eficientemente debido a la práctica de inadecuadas técnicas durante el proceso de siembra. Asimismo, la Pontificia Universidad Católica del Perú en calidad de entidad asociada, a través del Grupo de Investigación Asistida por Computadora INACOM, ha asumido la responsabilidad de la elaboración de una propuesta de diseño que tecnifique el proceso de siembra y contribuya en mantener a la zanahoria como uno de los productos de mayor producción del departamento de Junín y capaz de generar alta rentabilidad a sus pobladores. Por otro lado, durante la visita técnica realizada los agricultores chupaquinos consideran que las semillas de zanahoria deberían ser depositadas a una distancia de 6 centímetros en dirección longitudinal y transversal. Los 6 centímetros constituyen una distancia mayor a la suma de los radios de dos zanahorias promedio de clase 1 (ver figura 1), las cuales son destinadas a la comercialización en grandes supermercados de la capital y son del tipo más rentable.

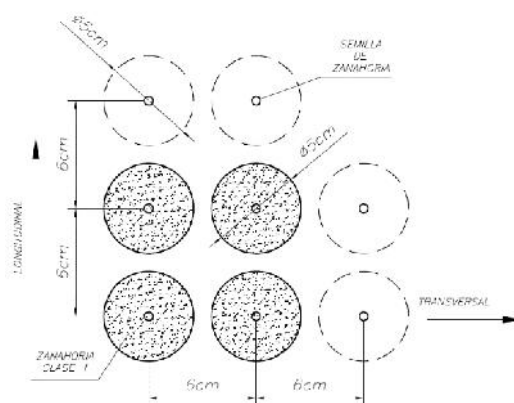


Fig. 1: Distancia de 6 centímetros entre semillas en dirección longitudinal y transversal.

## DISEÑO Y FABRICACIÓN DEL PROTOTIPO

El diseño del prototipo está basado en la metodología VDI 2221 [1] y ha sido concebido para ser arrastrado a través del campo de cultivo por medio de un castillete, el cual se engancha a la parte posterior de un tractor estándar (ver figura 1) y cuyo diseño responde a las recomendaciones técnicas de ASAE [2,3] e ISO [4,5] para implementos agrícolas. El prototipo está conformado por un bastidor que constituye la parte estructural de la máquina y un sistema de dosificación (ver figura 2), el cual está compuesto por componentes mecánicos y neumáticos responsables de depositar de forma dosificada las semillas de zanahoria en el terreno de cultivo.

La dosificación de las semillas se realiza mediante el empleo de presión negativa y positiva. La presión negativa actúa en el interior de un tambor, el cual está provisto de agujeros pasantes distribuidos circunferencialmente a lo largo de la longitud del cuerpo cilíndrico en 12 hileras, como se puede apreciar en la figura 3. Los agujeros permiten la adherencia de las semillas sobre la superficie exterior del tambor y las transporta desde una tolva de alimentación hasta un punto de descarga sobre la vertical del mismo tambor, donde un dispositivo mecánico regulable interrumpe la presión negativa e inyecta aire (presión positiva) propiciando que las semillas sean expulsadas contra la tolva de descarga y luego conducidas a tierra mediante mangueras.

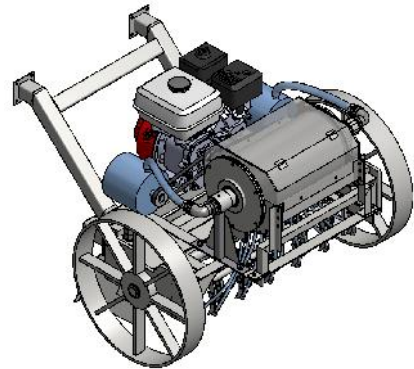
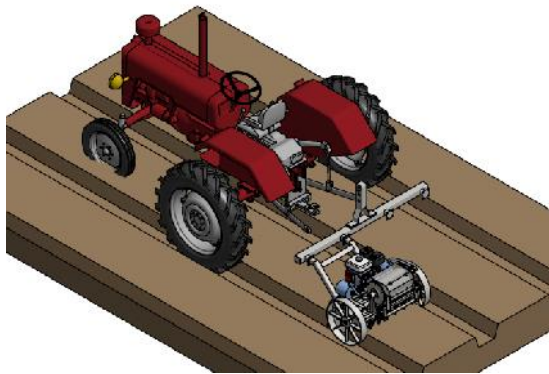


Fig. 2. Arreglo general tractor-máquina sembradora

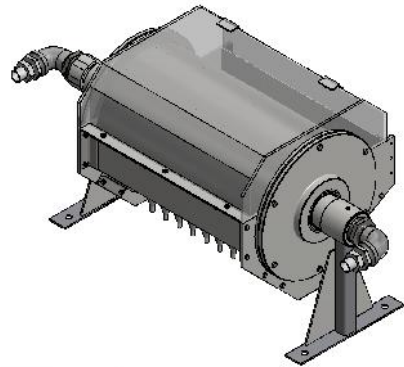
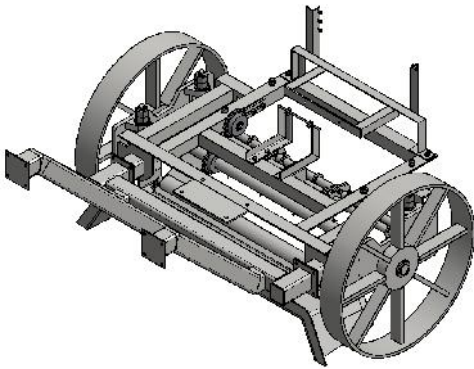


Fig. 3: Componentes de la máquina: bastidor (izquierda) y sistema de dosificación (derecha).

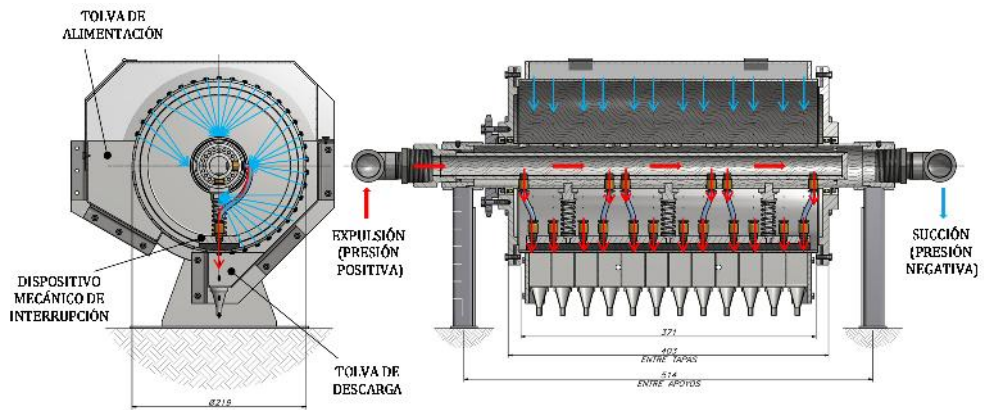


Fig. 4. Principio de funcionamiento del sistema de dosificación.

El giro que requiere el tambor dosificador para el transporte de las semillas es obtenido del movimiento de las propias ruedas del prototipo donde un piñón conductor montado sobre el eje de las ruedas transmite el giro mediante una transmisión por cadena a un piñón conducido el cual está fijado a la tapa del tambor, como lo ilustran la figura 5.

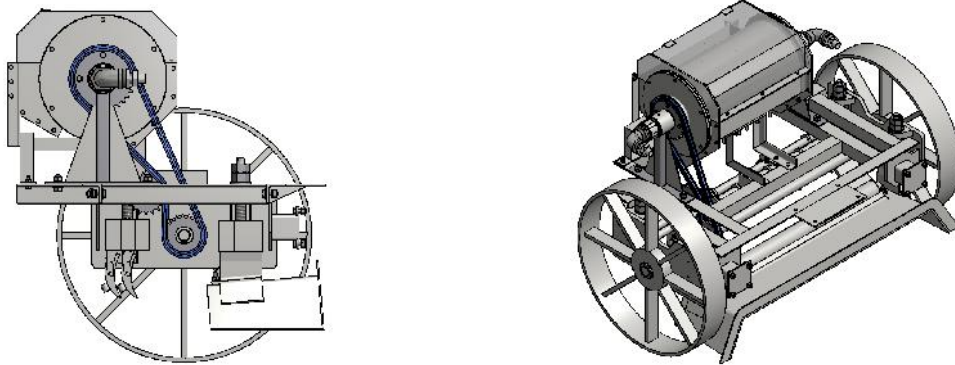


Fig. 5. Principio de accionamiento del transporte de semillas.

El número de agujeros mecanizados a través del espesor de pared del tambor están debidamente determinados para garantizar la dosificación cada 6 centímetros. De acuerdo a la expresión Ec.(1) [6], el número de agujeros  $n$  está en función del diámetro de la rueda motriz  $d_m$ , la distancia entre semillas depositadas  $d_t$  (dosificación) y la relación de transmisión  $i_t$ . El diseño del prototipo posee ruedas de 508 mm de diámetro y una relación de transmisión de 19 a 30 dientes, con lo cual el número de agujeros distribuidos de forma circunferencial a lo largo del perímetro del tambor es de 42. Adicionalmente, la longitud de arco  $s_a$  entre agujeros que depende del número de agujeros y del diámetro del tambor  $d_c$  igual a 217 mm, es determinado mediante la expresión Ec.(2), y cuyo valor alcanza los 16.23 mm.

$$n = \frac{\pi d_m i_t}{d_t} \quad (1)$$

$$n = \frac{\pi (508)(30/19)}{60} = 41.998 \approx 42 \text{ a,}$$

$$d_a = \frac{\pi d_c}{n} \quad (2)$$

$$s_a = \frac{\pi(217)}{42} = 16.23 \text{ m}$$

Para determinar la presión negativa requerida en el interior del tambor, se plantea un análisis que considera a las semillas como partículas y éstas experimentan fuerzas producto de la rotación del tambor (fuerza centrífuga) y de la aceleración gravitatoria. Si bien es cierto que, ambas no son necesariamente colineales en todo momento, se toma en consideración una posición crítica donde la semilla se ubica en la parte inferior del tambor y sobre vertical. Ambas fuerzas, centrífuga y gravitatoria, en las condiciones descritas son formuladas en la expresión Ec.(3), donde la fuerza de la partícula  $F_p$  de masa  $m$  depende del radio  $r_t$  y la velocidad angular  $\omega_t$  del tambor y de la gravedad  $g$ . Asimismo, la presión de vacío en el interior del tambor debe producir una fuerza mayor o por lo menos igual a  $F_p$ , con el objetivo de lograr la adherencia de las semillas.

$$F_p = (r_t \omega_t^2 + g) m \quad (3)$$

La velocidad angular del tambor resulta ser igual a 2.77 rad/s, ya que se ha estimado que las ruedas del prototipo giran a una velocidad angular de 4.37 rad/s y se emplea la relación de transmisión seleccionada de 1.578 (=30/19). Acerca de la masa de una semilla de zanahoria es posible mencionar que 100 granos de la variedad Abaco [7] posee aproximadamente una masa de 0.2 gramos, entonces empleando la expresión Ec.(3) y reemplazando los valores de velocidad angular y masa se ha determinado que la fuerza que experimenta una semilla, bajo las condiciones ya mencionadas, es igual a  $2.13(10)^{-5}$  N.

Ahora, con el objetivo de determinar la presión de vacío que debe estar presente en el interior del tambor, la fuerza para lograr la adherencia es igualada a  $F_p$  y dividida entre el área de un agujero de 0.7 mm de diámetro. La presión de vacío resultante es igual a 55.35 Pa bajo situaciones ideales de total hermeticidad; sin embargo, durante el inicio y en pleno funcionamiento de la máquina, el número de semillas adheridas no logra cubrir la totalidad de los agujeros en la pared del tambor (42 agujeros por 12 hileras), como se puede apreciar en la figura

6, lo cual exige que la presión para mantener a las semillas adheridas se incremente hasta alcanzar un valor de 28 kPa, lo cual ha sido comprobado experimentalmente durante las pruebas preliminares practicadas al equipo.

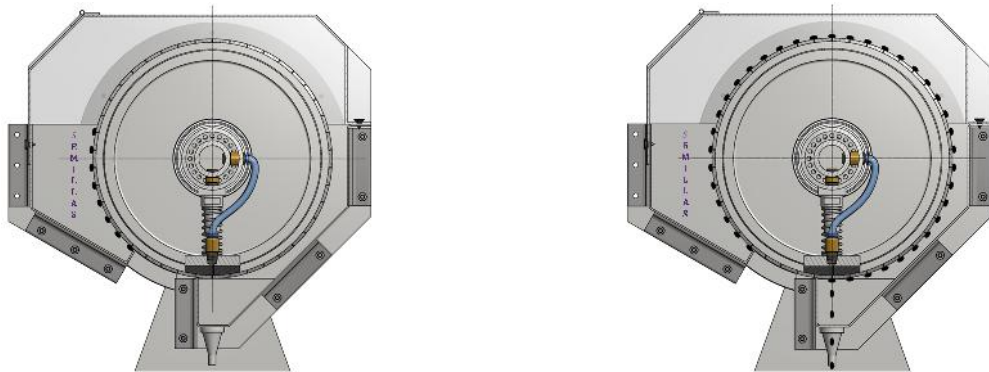


Fig. 6: Semillas adheridas al inicio (izquierda) y en pleno funcionamiento de la máquina (derecha).

Por otro lado, la figura 7 muestra dos tubos concéntricos acoplados mediante una unión roscada (interior/exterior) en el extremo de ambos elementos. A través de estos elementos es posible el ingreso (presión positiva) y la salida (presión negativa) de aire generando el soplado y la succión, respectivamente. El tubo exterior es responsable de dirigir el aire extraído del interior del tambor hacia el exterior y es justamente en este proceso donde las semillas se quedan adheridas a la superficie exterior del tambor; mientras que, el tubo interior conduce el aire del exterior hacia el interior del tambor y luego, a través de mangueras neumáticas, es guiado hacia un dispositivo mecánico, denominado zapata, donde el aire es inyectado a través de boquillas con la finalidad de realizar el soplado a las semillas adheridas que se ubiquen justamente en la misma posición. Claro está que los flujos de aire que entran y salen del tambor no se mezclan, además cabe señalar que la zapata es el dispositivo mecánico regulable de interrupción de la presión negativa que fue mencionado en la descripción del principio de funcionamiento del sistema de dosificación.

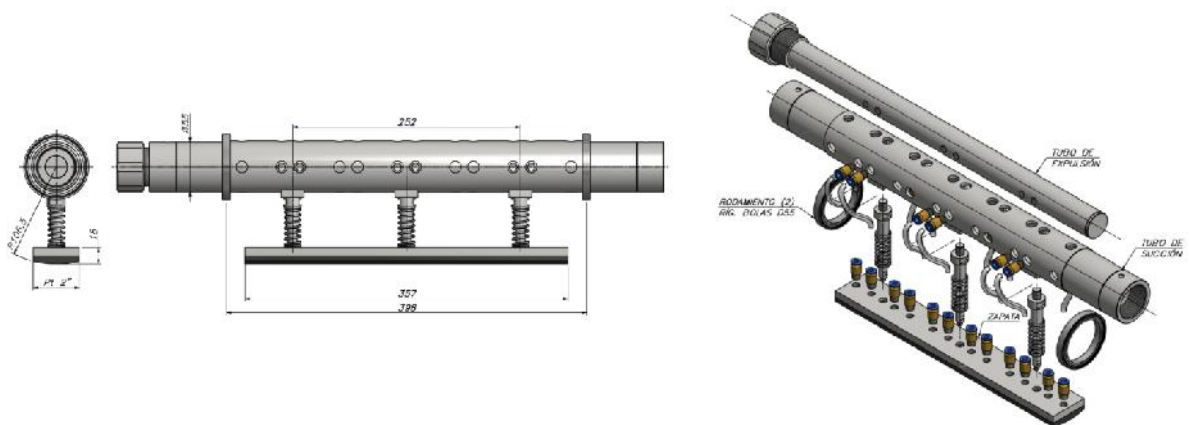


Fig. 7: Sub-sistemas succión y expulsión.

Adicionalmente a la descripción de la finalidad que cumple el tubo exterior, es importante mencionar que también se desempeña como eje sobre el cual va montado el tambor dosificador. Este componente de 55 mm de diámetro exterior y 570 mm (aprox.) de longitud, está sometido a la carga generada por la transmisión por cadena y al peso de los componentes del sistema de dosificación. Un análisis estático (ver figura 8) reveló que los esfuerzos normales por flexión del tubo alcanzan valores máximos de 22 MPa, una cifra muy por debajo del esfuerzo de fluencia del material del componente.



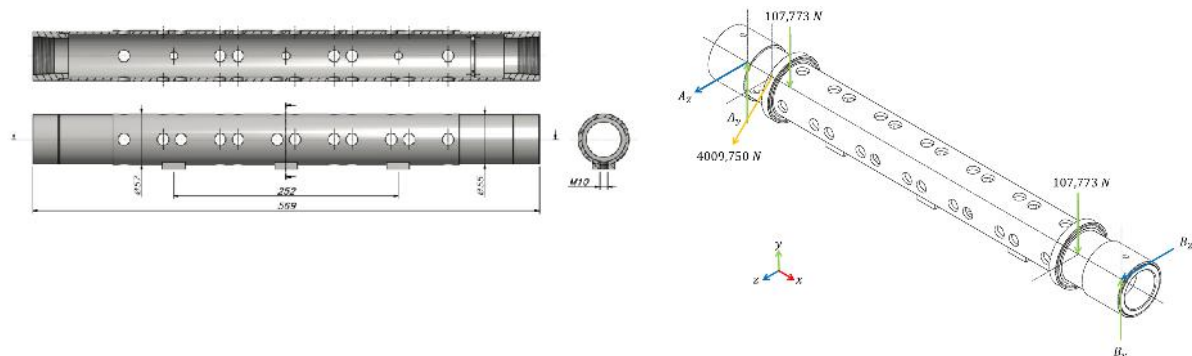


Fig. 8: Analisis estático del tubo de succión

El bastidor de la maquina fue sometido a un análisis estático estructural mediante simulación por elementos finitos. El bastidor soporta la carga producto del arrastre del tractor y los pesos de diferentes componentes. El estudio consideró que superficies en contacto entre los perfiles estructurales debían ser tomadas como conexiones del tipo “bonded” [8], y que las restricciones de traslación y giro fueran impuestas sobre las superficies de los apoyos del eje de las ruedas. Acerca de la discretización del modelo se puede mencionar que se emplearon elementos tetraédricos y se practicaron técnicas de refinamiento de la malla en ciertas uniones y en algunos otros puntos de interés. Los resultados obtenidos de la simulación computacional indicaron que las cargas no representan un riesgo para la integridad de la estructura y que las deformaciones más altas se encuentran en el orden de 0.06 mm.

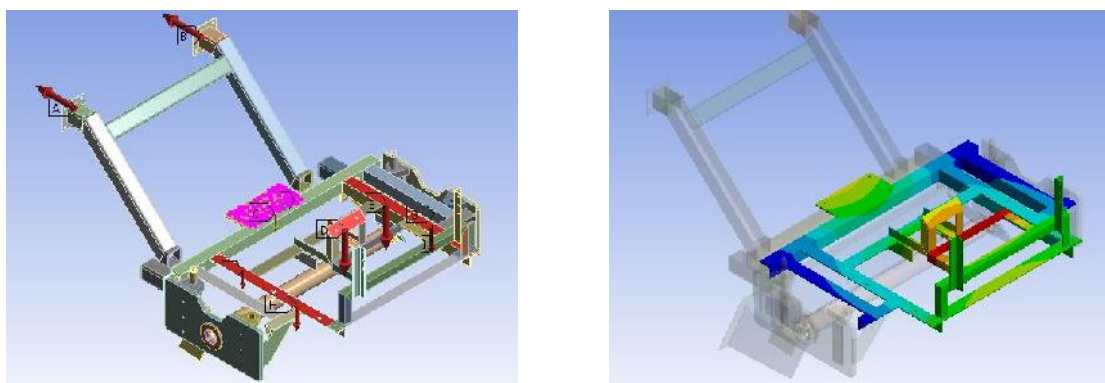


Fig. 9: Fuerzas actuantes sobre del modelo del bastidor (izquierda) y los resultados de la deformación del bastidor (derecha).

Cumplida las actividades de ingeniería de detalle, el diseño fue llevado a la etapa de fabricación. La figura 7 muestra imágenes del prototipo fabricado y ensamblado durante los ensayos preliminares de laboratorio. La etapa de fabricación del prototipo exigió la planificación de actividades de taller donde se contemplaron tareas de coordinación, supervisión y control de calidad con la finalidad de obtener los resultados esperados, las cuales son mostradas en el diagrama de la figura 10.



Fig 10. Prototipo ensamblado durante los ensayos preliminares.

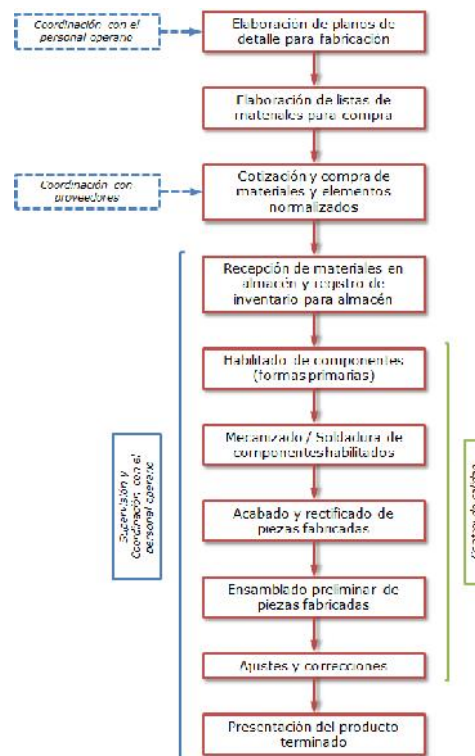


Fig 11. Diagrama de los procesos de fabricación y asociados

## CONCLUSIONES

Las pruebas preliminares han demostrado que el principio de funcionamiento de dosificación de la máquina es capaz de depositar las semillas de zanahoria a una distancia muy próxima a los seis (06) centímetros, en la dirección longitudinal y transversal, establecidos como exigencia para el equipo. Asimismo, el diseño conceptual de dos sistemas independientes para la succión y soplado (presión negativa y positiva) tuvo resultados favorables. La presión negativa logra la adherencia de las semillas sobre la superficie del tambor y cumplir con el recorrido desde la tolva de alimentación hasta la descarga. Justamente en el punto de descarga es donde el dispositivo mecánico regulable en el interior del tambor que interrumpe la presión de negativa, cumple de forma adecuada su función, permitiendo que las semillas se desprendan de la superficie del tambor. Sin embargo, aquellas semillas que por alguna razón no logran el desprendimiento, la presión positiva termina por expulsarlas contra la tolva de descarga para ser conducidas mediante las mangueras al terreno donde son depositadas en los surcos. De esta forma, se puede concluir que la propuesta del prototipo es un medio que permitirá no solo

cumplir con la demanda actual, sino propiciará el desarrollo de la tecnología y el crecimiento de la producción en la provincia de Chupaca.

## AGRADECIMIENTO

Un profundo agradecimiento a las siguientes entidades que hicieron posible el desarrollo del presente trabajo:

- Sierra Exportadora - Organismo Público Ejecutor.
- Fondo para la Innovación, Ciencia y Tecnología - FINCyT
- Oficina de Innovación - Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Laboratorio de Manufactura - Pontificia Universidad Católica del Perú.

## REFERENCIAS

1. Verein Deutscher Ingenieure, VDI 2221: Systematic approach to the development and design of technical systems and products, Munich, 1987.
2. American Society of Agricultural Engineers, S217.12: Three-Point Free-Link Attachment for Hitching Implements to Agricultural Wheel Tractors, 2001.
3. American Society of Agricultural Engineers, S477: Terminology for Soil-Engaging Components for Conservation-Tillage Planters, Drills and Seeders, 2001.
4. International Organization for Standardization, 730-1: Agricultural wheeled tractors - Rear-mounted three-point linkage. 1994.
5. International Organization for Standardization, 789-1: Agricultural tractor-Test Procedures-Part 1: Power tests for power take-off, 1990.
6. J. Ortiz. Técnica de la mecanización agraria. Tercera edición. Madrid: Mundi-Prensa, 1989.
7. SIMINIS, [www.seminis.com/global/cl/products/Pages/Zanahoriaabaco.aspx](http://www.seminis.com/global/cl/products/Pages/Zanahoriaabaco.aspx). Consulta: 01/06/2015.
8. ANSYS. Ansys Workbench Help. Version 15.0.0. ANSYS®Help Viewer. 2013.

## UNIDADES Y NOMENCLATURA

$d_m$	Diámetro de la rueda motriz (mm)
$d_t$	Distancia entre semillas depositadas (mm)
$d_c$	Diámetro del tambor (mm)
$F_p$	Fuerza de una semilla (N)
$g$	Gravedad, (9.81 m/s <sup>2</sup> )
$i_t$	Relación de transmisión
$m$	Masa de una semilla (kg)
$n$	Número de agujeros del tambor dosificador.
$r_t$	Radio del tambor (mm)
$s_a$	Longitud de arco entre agujeros del tambor dosificador (mm)
$\omega_t$	Velocidad angular del tambor (rad/s)