

DISEÑO DE UN SISTEMA AUTOMÁTICO DE PROCESAMIENTO Y EMPAQUETADO DE FRIJOL.

Juan Diego Rico Camargo – jdricon@udistrital.edu.co
 Universidad Distrital Francisco José de Caldas – Bogotá D.C.
 2017

Resumen—En este artículo se presenta el diseño de un sistema automático de procesamiento y empaquetado de frijol, con el fin de facilitar y agilizar los procedimientos actuales de los pequeños y medianos productores y distribuidores de este cereal en el medio agrícola.

El trabajo a desarrollar es enteramente teórico e investigativo, con fines y procedimientos específicos, dando a conocer las tecnologías existentes y disponibles en Colombia para permitir la incorporación tecnológica en el sector agrícola junto con la aplicación de la ingeniería electrónica enfocada a la automática industrial permitiendo brindar utilidades, mayor eficiencia, seguridad e innovación en los procesos convencionales.

Palabras claves- *Diseño, Investigación, Agricultura de precisión, Procesamiento, Eficiencia.*

I. INTRODUCCIÓN

Los cultivos de frijol en Colombia están limitados por la cantidad de dinero que posean los agricultores, los grandes periodos en el tiempo de cultivación y en el proceso de pos cosecha, hace que este cultivo este siendo cambiado por otro tipo, ya que la demanda de mano de obra hace encarecer los costos finales ^[1].

El diseño del sistema pretende brindar una solución a las múltiples dificultades presentes en el proceso convencional del tratamiento de la semilla de frijol, donde por medio de la combinación de diferentes equipos, habilidades e instrumentos empleados en la automática y control se pueden ofrecer alternativas prácticas, económicas y efectivas para las necesidades de los productores.

Se considerará para el diseño la inclusión de un controlador lógico programable (PLC), permitiendo una robustez y versatilidad para el trabajo continuo, seguro, eficaz y así mismo facilidad de operación y entendimiento con el usuario. Por otra parte, se requiere de elementos de entrada y salida que permitan la conformación del sistema automático de proceso, refiriéndonos a servomotores, alarmas, contactores y temporizadores como elementos actuadores, sensores de

posición y carga como componentes de entrada sin dejar de lado aplicaciones y utilidades que nos permitan la supervisión y monitoreo a distancia del sistema por ejemplo a través de nuestros dispositivos móviles de comunicación.

Se emplearan recursos informáticos como simuladores de procesos y de programación industrial que nos permitan obtener una aproximación del comportamiento real del sistema planteado y realizar un análisis para evaluar la incorporación física del mismo.

II. DESCRIPCIÓN DEL PROCESAMIENTO CONVENCIONAL DE FRIJOL

El proceso convencional del frijol después de la recolección de la semilla consiste de cinco etapas fundamentales que son el presecado, desgranado, limpieza, clasificación, secado y empaquetado.



Fig 1. Proceso convencional del frijol.

A. Presecado

Después de la recolección manual en el campo, las “vainas” (llamadas así por los agricultores) de frijol se deben dejar secar para poder bajar la humedad de las mismas y posteriormente

permitir una apropiada separación entre la cáscara y el grano de frijol como tal.

B. Proceso de desgranado o trillado

Naturalmente la semilla de frijol viene cubierta en una cascarilla que encapsula los granos de frijol, inicialmente se debe separar el frijol de esta "vainas" como es llamada por los agricultores para proceder a la siguiente etapa de clasificación.

C. Proceso de limpieza

Una vez separados la cáscara y el grano de frijol como tal, se procede a efectuar una limpieza del producto con el fin de eliminar impurezas y retirar del producto cualquier partícula diferente al frijol. Cabe resaltar que este proceso o etapa puede ser opcional dependiendo del tipo de máquina que se elija a implementar en la etapa de clasificación.

D. Proceso de secado

Este proceso es opcional dependiendo del tipo de grano y la calidad del proceso de la tapa de presecado, normalmente se implementa en lugares con una alta humedad relativa ambiental. Una vez separadas y limpias las semillas se procede a secar el grano a una temperatura entre 50 °C - 55 °C para obtener el producto final listo para ser clasificado y empaquetado para distribución al consumidor final.

E. Proceso de clasificación

Enseguida se procede a clasificar el frijol en diferentes tamaños, normalmente se realiza esta separación por tamizaje y en dos tipos de tamaño para ser empacados posteriormente por separado.

Adicionalmente dependiendo del tipo de máquina que se tenga para la clasificación se puede realizar simultáneamente el proceso de limpieza, ya que al tener dos o más láminas de tamizaje se filtra las partículas diferentes a los tamaños deseados.

III. MAQUINARIA A INTERVENIR EN EL PROCESO

El proceso de diseño contempla la incorporación de diferentes tipos de máquinas y adecuaciones mecánicas específicas actualmente introducidas en el mercado para que soporten las funciones de cada etapa del proceso.

A. Calentamiento por moto ventiladores.

Son dos etapas del proceso (opcionales) que requieren de calentamiento del producto, el presecado y secado cuando sea necesario. Este proceso normalmente se realiza a temperatura ambiente y bajo cubiertas plásticas, puede demorar de 3 a 4 días o más dependiendo de las condiciones ambientales de

temperatura y humedad relativa donde se lleve a cabo el tratamiento del producto.

Con la incorporación de moto ventiladores se puede hacer circular aire por resistencias eléctricas que disipan calor en un flujo de aire caliente continuo direccionado directamente a las vainas de frijol, manteniendo una temperatura estable y acelerando el proceso significativamente.



Fig 2. Motoventilador convencional.

B. Máquina desgranadora

El proceso de trillado o desgrane se realiza en la gran mayoría de productores pequeños de manera manual, una vez secas las vainas, se dan azotes con palos o varas para separar la cáscara del grano de frijol.



Fig 3. Desgranadora industrial.

C. Tolva con compuerta automática.

Para el proceso de empaquetado se puede emplear una tolva de dispensación de grano por tiempo de caída con compuerta automática. Estas tolvas se encuentran fácilmente en el mercado y su instalación y mantenimiento son sencillos y económicos.

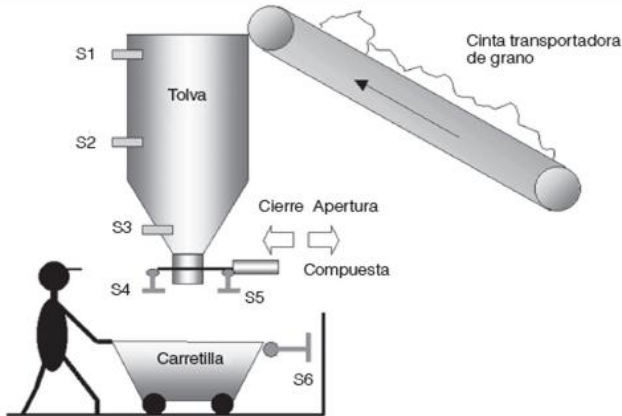


Fig 4. Sistema de dosificación para empaque.

D. Banda transportadora

La incorporación de bandas transportadoras es necesaria tanto para transportar el producto entre etapas como para realizar el proceso de limpieza de los granos por medio de mallas y ventiladores para eliminar impurezas en los granos de frijol. Algunas de las bandas transportadoras disponibles en el mercado incluyen ajuste manual de velocidad o a través de paneles de control integrados mediante software.



Fig 4. Cinta transportadora de granos.

E. Tamizadora vibratoria

Una tamizadora o zaranda vibratoria es ideal para el proceso de limpieza y clasificación del grano por tamaño de partícula, consta de una, dos o más mallas con rejilla que tiene diferentes diámetros para separar las impurezas del producto. Al igual que las bandas transportadoras suelen tener accionamiento eléctrico manual o panel de control para procesos más robustos.



Fig 5. Tamizadora vibratoria para granos.

IV. INTEGRACIÓN DE MAQUINARIA EN EL SISTEMA DE PROCESAMIENTO

Una vez definida la maquinaria que se puede incluir en el proyecto, se procede a realizar el enlace de las diferentes etapas en una misma línea de proceso de la siguiente manera:

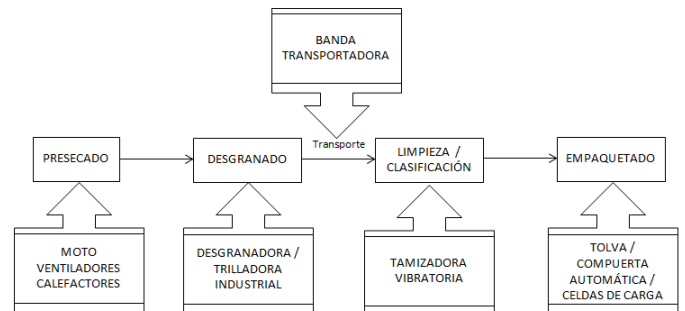


Fig 6. Diagrama de proceso de frijol.

Se busca integrar todas las máquinas a un solo dispositivo de mando, en este caso un PLC, mediante el cual podamos accionar el sistema automático, interactuar con las variables determinantes en cada etapa del proceso y conocer el estado actual del proceso a través de un HMI incorporado. También es posible tener acceso remoto al proceso a través de apps móviles las cuales ya vienen incorporadas en algunos modelos de PLC modernos de distintos fabricantes.

A. Requerimientos básicos del PLC a considerar en el diseño.

Para elegir el tipo de PLC apropiado en el proyecto se debe tener definido inicialmente aspectos básicos como:

- El número de entradas y salidas E/S del sistema, si son análogas o digitales A/D.
- Capacidad de programa y memoria, a mayor número de entrada y salida de datos, mayor es la capacidad de memoria y procesamiento.
- Tipo de comunicación, por practicidad, versatilidad y economía se utiliza en la gran mayoría de aplicaciones medianas y pequeñas comunicación tipo Modbus TCP/IP.
- Versatilidad del software. Entorno de programación amigable y en diferentes lenguajes para una mayor versatilidad.

Con base en lo anterior las características mínimas que necesitamos para el PLC son las siguientes:

| CARACTERÍSTICA | DESCRIPCIÓN |
|--------------------------|-------------------------|
| E/S Digitales | 8 I / 12 O |
| Entradas Análogas | 2 |
| Tipo de comunicación | Modbus, Profinet TCP/IP |
| Lenguaje de programación | Ladder, FBD. |

Tabla 1. Requerimientos PLC

Algunos PLC que pueden ser útiles para la incorporación en el proceso son:

| PLC | DETALLES |
|-------------------------|--|
| Siemens SIMATIC S7 1200 | <ol style="list-style-type: none"> CPU 1214C - escalable 14 entradas / 10 salidas 2 entradas análogas Comunicación Profinet, Modbus RTU, Profibus, GPRS. Memoria de trabajo 50 KB Memoria de carga 2 MB Lenguaje de programación Ladder, Grafcet. |
| Mitsubishi FX3S-20MR-ES | <ol style="list-style-type: none"> Escalable 12 entradas / 8 salidas Memoria EEPROM 2000 pasos Lenguaje de programación Ladder. Comunicación Ethernet/Modbus. |
| Allan Bradley Micro820 | <ol style="list-style-type: none"> Escalable E/S digitales 12/7 E/S análogas 4/1 Comunicación Ethernet / Modbus Lenguaje de programación Ladder, Grafcet, Bloques de |

| | funciones, texto estructurado. |
|------------|--|
| Omron CP1H | <ol style="list-style-type: none"> Escalable E/S digitales 12/8 Comunicación Ethernet Lenguaje de programación Ladder. |

Tabla 2. Características de PLC posibles a implementar.

B. Instrumentación a intervenir en el proceso

Por otra parte es necesario incorporar diferentes elementos de instrumentación para hacer posible la integración de todo el sistema de proceso. Contactores, sensores de posición, temporizadores, sensores de temperatura, controlador de temperatura, sensores de nivel, conversores A/D, D/A de ser necesario, alarmas visuales, pulsadores.

Todos estos con el fin de interactuar como elementos de entrada y salida para la autonomía del sistema. Los más apropiados y de implementación sencilla se describen a continuación.

| INSTRUMENTO | FUNCIÓN | CARACTERÍSTICA |
|----------------------|--|--|
| Contactores | Interrupción electromagnética para energización de maquinaria de proceso | <ol style="list-style-type: none"> Contacto de tipo normalmente abierto NA / Normalmente cerrado NC. Accionamiento electromagnético. Categoría de servicio AC1, AC2, AC3. |
| Sensores de posición | Designan paradas o arranque del sistema dependiendo de llegada de producto a ciertas posiciones. | Detectores capacitivos por aproximación. |
| Celdas de carga | Sensar el peso de los sacos de frijol en la etapa de empaquetado, definiendo la actuación de las compuertas de la tolva. | Celda de carga por compresión, de viga flexible. |
| Alarmas | Genera advertencia de algún evento extraordinario durante el proceso. | Alarma sonora / visual. |

| | | |
|------------|---|---|
| Pulsadores | Activar puesta en marcha del sistema o interrupción del mismo ante una emergencia | Pulsador normalmente abierto NA / normalmente cerrado NC. |
|------------|---|---|

Tabla 3. Descripción de instrumentación a implementar.

V. LÓGICA DE CONTROL DEL SISTEMA

Como bien se mencionó anteriormente se tiene contemplado incorporar un controlador programable PLC para ejecutar las funciones de todo el sistema de procesamiento de frijol. Debido a que el sistema operará de manera secuencial por etapas no se requiere de una programación robusta por texto estructurado o asignación de bloques de funciones, se realizará la aproximación de la lógica a través del diagrama de programación ladder.

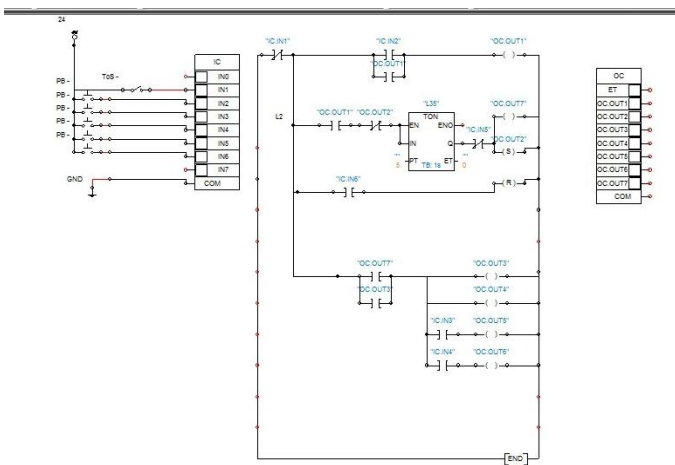


Fig 6. Lógica de control en Ladder.

Dado que el proceso de tratamiento del frijol se desarrolla de manera secuencial, la lógica de los tiempos de proceso se maneja a través de un temporizador en la unidad de presecado el cual determinará el posterior accionamiento de las estaciones restantes.

Inicialmente se dará la orden de arranque del sistema a través de un pulsador el cual energizará una entrada del PLC, posteriormente en base a la programación activará una salida digital que activará un relé el cual permite el accionamiento del motoventilador correspondiente a la primera estación del proceso. A continuación por medio de la configuración de un temporizador que en tiempo real del proceso estaría configurado para tres (3) horas se habilitará la energización y arranque de las máquinas siguientes que corresponden a desgranado, transporte y clasificación/limpieza simultáneamente.

Una vez el producto ha sido clasificado en los tamaños de grano correspondientes se procede a accionar las compuertas de liberación del producto para empaquetado en costales o bultos de 25 kg (comúnmente distribuido en esa cantidad) con base en un par de celdas de carga las cuales sensorarán el peso

presente en los costales, al llegar a la cantidad deseada generan una señal de activación para las compuertas de dosificación.

VI. SIMULACIÓN DEL PROCESO

Para obtener una aproximación real del proceso se realiza una simulación del mismo en el programa Promodel, definiendo las máquinas, etapas de proceso, entidades, cantidades aproximadas de proceso, tiempos y eficiencia del sistema.

A. Definición de locaciones o etapas de proceso

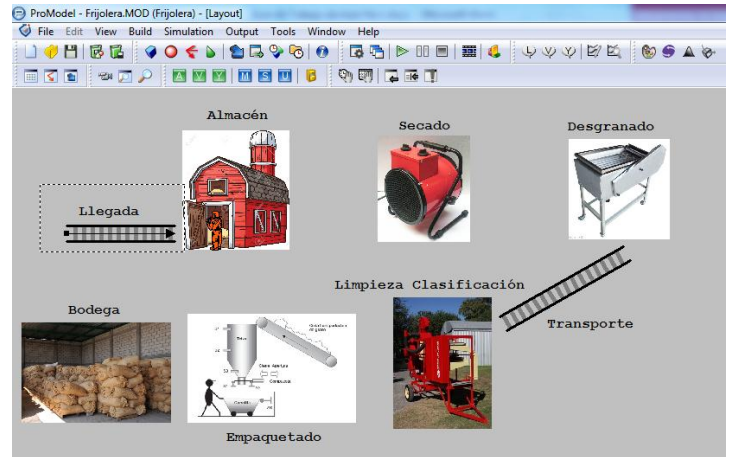


Fig 7. Representación de etapas de proceso en Promodel.

Se parte de una base de entrada de materia prima de 200 kg (despreciando desecho de vaina de frijol) en frecuencias de arriba en promedio de 12 horas al almacén de recibo, el cual se asume que podría tener una capacidad de almacenamiento para 300 kilos de materia prima.

Posteriormente se lleva el producto de manera manual a la primera etapa del proceso que sería el secado con motoventilador en grilla, durante el cual se mantendrá a una temperatura promedio de 50 °C durante tres horas. Enseguida se realiza la transición a las demás etapas las cuales tienen tiempos de proceso más cortos.

Se procede a ingresar datos de proceso para la simulación, en primer lugar definición de locaciones o etapas del proceso; enseguida se definen las entidades o producto en sus diferentes presentaciones a medida que es procesado en cada etapa; capacidad de almacenamiento de cada etapa; reglas de entrada y salida.

Se van a manejar unidades de tiempo hora y cantidad de producto de las entidades a intervenir en el proceso asociadas a kilogramo de producto, para efectos de concordancia con la simulación se desprecia el peso de la vaina extraída del producto de frijol, por ende se toma como producto aprovechable desde la primera entidad que ingresa al proceso “vaina de frijol”.

VII. RESULTADOS DE SIMULACIÓN DEL PROCESO EN PROMODEL

Una vez concluida la simulación del proceso se procede a generar resultados estadísticos del mismo con base en datos de cantidad de producto aproximada realmente por el agricultor que desea implementar el sistema automático.

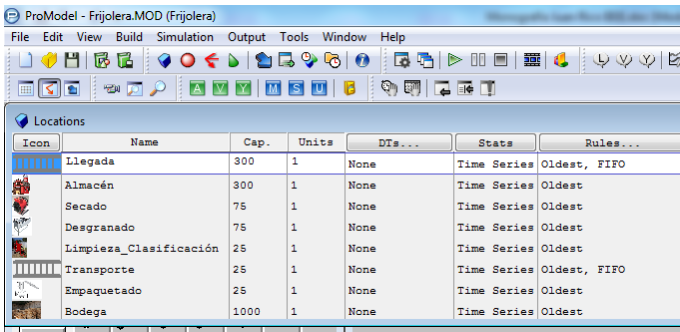


Fig 8. Definición de locaciones.

En la figura 8 se puede observar como se realiza la asignación de la secuencia lógica del proceso, la definición de la entidad entrante en cada locación como también el enrutamiento y la asignación de entidad de salida y el tiempo de proceso por etapa y traslado entre las mismas.

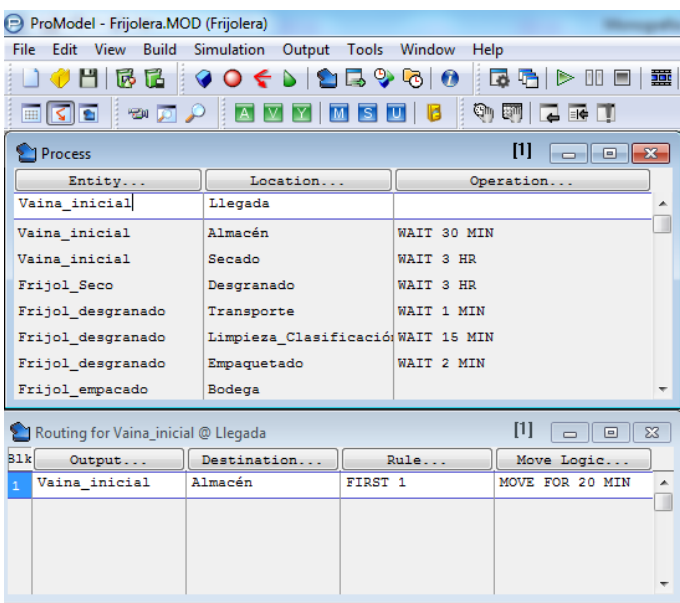


Fig 9. Creación de proceso lógico con entrada y salida de entidades.

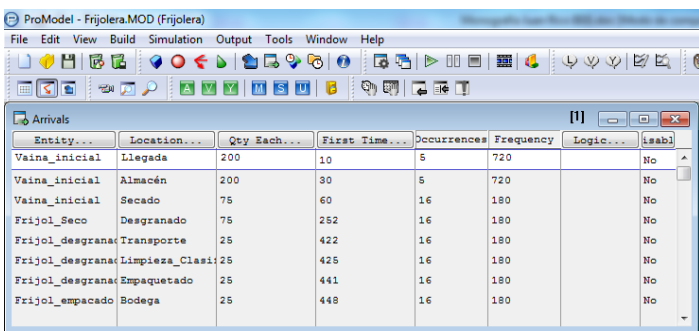
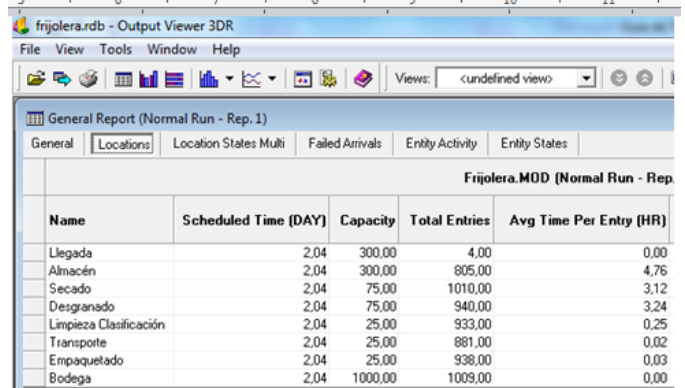


Fig 10. Definición y asignación de arribos a locaciones.

En las figuras 9 y 10 se puede apreciar la definición de arribos a cada una de las locaciones previamente establecidas. Se hace el cálculo de tiempo de proceso en cada estación, teniendo a la etapa de secado como el proceso que define la capacidad y tiempos de salida de producto del sistema completo, al ser el de mayor duración y capacidad limitada de producto, se toma como referencia para establecer la frecuencia y cantidades de arribos a las locaciones posteriores en el sistema.



| Avg Contents | Maximum Contents | Current Contents | % Utilization |
|--------------|------------------|------------------|---------------|
| 0,00 | 1,00 | 0,00 | 0,01 |
| 78,22 | 201,00 | 87,00 | 26,07 |
| 64,38 | 75,00 | 68,00 | 85,83 |
| 62,06 | 75,00 | 73,00 | 82,75 |
| 4,74 | 25,00 | 10,00 | 18,94 |
| 0,37 | 10,00 | 1,00 | 7,35 |
| 0,63 | 25,00 | 1,00 | 2,53 |
| 0,00 | 1,00 | 0,00 | 0,00 |

Fig 12. Estadísticas generales por locaciones.

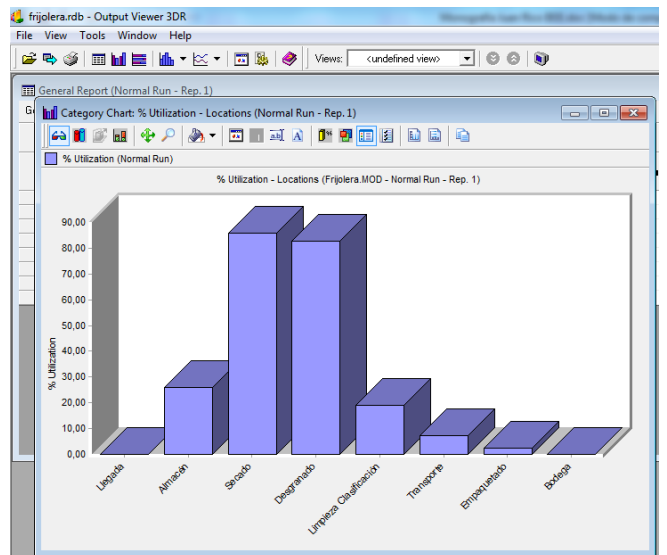


Fig 13. Porcentaje de utilización de locaciones.

En la figura 11 podemos analizar el aprovechamiento máximo que se le da a cada a cada locación simulando un funcionamiento continuo de procesamiento por 48 horas, lo que sería a la utilización semanal con base a la cantidad actual de materia prima que se maneja en un productor pequeño.

Se puede apreciar claramente que en un periodo de 48 horas se pueden llegar a procesar aproximadamente 1000 kilos de producto final empaquetado y la estación de mayor ocupación es la de secado alcanzando un 85 % de uso total y la de menor ocupación es la de empaquetado debido a que el llenado de los bultos de frijol se produce en cuestión de segundos minutos.

VIII. COSTOS ESTIMADOS DE IMPLEMENTACIÓN.

La selección de maquinaria, instrumentos y demás materiales que pueden ser utilizados en la implementación del proyecto se realiza buscando invertir el menor capital posible, permitiendo que el proyecto sea escalable a medida que el volumen de materia prima para procesamiento vaya incrementando.

| MÁQUINA / ELEMENTO | COSTO APROXIMADO |
|---|---------------------|
| Zaranda Vibratoria, clasificación y limpieza de granos. | \$14.000.000 |
| Desgranadora de granos | \$2.700.000 |
| Motoventilador | \$400.000 |
| Banda transportadora | \$3.000.000 |
| Contactores electromagnéticos | \$1.000.000 |
| Actuadores de compuerta | \$600.000 |
| Pulsadores | \$50.000 |
| PLC | \$800.000 |
| TOTAL APROXIMADO | \$22.550.000 |

Tabla 4. Costos aproximados de implementación.

IX. CONCLUSIONES

1. Se plantea inicialmente la implementación de una estación de empaquetado pero con base en los resultados de simulación del proceso se deduce que no es necesaria la instalación de una unidad independiente para esta función, como solución alterna se pueden implementar compuertas controladas a los ductos de salida de la zaranda clasificadora para dispensar el producto final en los bultos de empaque.
2. Es posible realizar la integración de diferentes máquinas de proceso en una misma línea de procesamiento para producción del frijol, se puede realizar el control del sistema a través de un controlador PLC debido a la versatilidad en entradas y salidas del proceso y la robustez que estos ofrecen ante las exigencias funcionales, ambientales y de implementación del proyecto.

3. Una vez realizado el diseño del sistema se pueden añadir funcionalidades adicionales como monitoreo y control de parada de emergencia del sistema a distancia, bien sea a través un mando cableado en otra locación de la fábrica o a través de un módulo de comunicación con dispositivo móvil el cual viene incorporado en algunos modelos de PLC, también con la incorporación de una tarjeta de red inalámbrica acorde a las necesidades del cliente, sin llegar a sobredimensionar el diseño puesto que puede llevar a gastos innecesarios.
4. Gracias al desarrollo del diseño y la ejecución de simulación del proceso se comprueba que la viabilidad de implementar el sistema físicamente es alta y con beneficios de reducción de tiempo altamente significativos, al pasar de 8 a 10 días de proceso artesanal manual para procesar una tonelada de frijol a tan solo 48 horas aproximadamente por medio de la incorporación tecnológica y métodos automáticos de proceso.
5. El costo de implementación física del proyecto es relativamente bajo considerando los beneficios que conlleva en tiempos de proceso y escalabilidad del proyecto para aumentar la capacidad de producto a procesar.

REFERENCIAS

- [1] J. Martínez, "Diseño de un sistema automático para el secado y desgrane del frijol", 2015.
- [2] Sánchez Moreno, E. L., Silva, P., & Ferney, W. (2016). Diseño de Máquina Desgranadora para Arveja y Frijol.
- [3] Ruíz Hernández, M. A. (2015). Reingeniería de una cosechadora de frijol.
- [4] Escoto, N. D. (2011). El cultivo del frijol. Publicación de la Dirección de Ciencia y Tecnología Agropecuaria, DICTA de la Secretaría de Agricultura y Ganadería, SAG. Tegucigalpa, Honduras.
- [5] Permuy Abeleira, N., Chaveco Pérez, O., González Ferrer, J., García Sánchez, E., & Hidalgo Figueroa, N. (2008). Pérdidas de grano de frijol común en un sistema de almacenamiento tradicional. *Agricultura técnica en México*, 34(1), 91-100.
- [6] Tixeleva, Y., Estuardo, E., González, C., & Eduardo, J. (2016). Diseño y fabricación de una máquina desgranadora de fréjol seco para implementar en la Parroquia Pinllopatá perteneciente al Cantón Pangua (Bachelor's thesis, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo).
- [7] Abeleira, N. P., Pérez, O. C., Ferrer, J. G., Sánchez, E. G., & Hidalgo, N. (2008). PÉRDIDAS DE GRANO DE FRIJOL COMÚN EN UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO TRADICIONAL. *Agricultura Técnica en México*, 34(1), 91-100.
- [8] Segura, R. (2010). Manual de producción de frijol. Cuenta del Desafío del Milenio de Honduras.
- [9] Díaz, A., & Daniela, M. (2015). Plan de negocios para la producción de semillas convencionales de maíz, frijol y sorgo en la Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano.
- [10] Puerto, C., & Denis, M. (1999). Evaluación de la calidad fisiológica de la semilla de maíz y frijol en Zamorano.
- [11] García, B., & Herbert, A. (2016). Plan de negocios para la producción de semillas de maíz, frijol, arroz y sorgo en la Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano.