

**PROPUESTA DE EFICIENCIA ENERGÉTICA DEL SISTEMA DE TRANSPORTE
NEUMÁTICO DE LA EMPRESA ALIMENTICIA EL COCINERITO. CASO DE
ESTUDIO.**



**Álvaro José Chasqui Córdoba
Juan Camilo Perlaza Pasquel**

**Universidad del Cauca
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Electrónica, Instrumentación y Control
Ingeniería en Automática Industrial
Popayán, Cauca
2017**

**PROPUESTA DE EFICIENCIA ENERGÉTICA DEL SISTEMA DE TRANSPORTE
NEUMÁTICO DE LA EMPRESA ALIMENTICIA EL COCINERITO. CASO DE
ESTUDIO.**



**Álvaro José Chasqui Córdoba
Juan Camilo Perlaza Pasquel**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de
INGENIERO EN AUTOMATICA INDUSTRIAL**

Director: Ing. Juan Fernando Flórez Marulanda

**Universidad del Cauca
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Electrónica, Instrumentación y Control
Ingeniería en Automática Industrial
Popayán, Cauca
2017**

AGRADECIMIENTOS

A nuestras familias,
Compañeros y amigos,
Al ingeniero Juan Fernando Flórez Marulanda,
A la Industria de Alimentos El Cocinerito,
Al ingeniero Germán Calvache,
Al ingeniero German Bacca,
A la universidad del Cauca.

Tabla de contenido

Tabla de contenido.....	ii
Lista de figuras.....	v
Lista de Tablas.....	vii
Objetivos.....	viii
CAPITULO 1	1
1.1 Eficiencia energética.....	1
1.2 Sistema de transporte neumático en la industria	2
1.3 Modos de transporte neumático según el flujo.....	2
1.4 Tipos de sistemas de transporte neumático.....	3
1.4.1 Elementos de un sistema de transporte neumático.....	6
1.4.2 Fuentes o suministros de aire	7
1.5 Descripción general de la empresa el cocinerito.....	9
1.5.1 Personal	9
1.5.2 Activos físicos.....	9
1.5.3 Producción	14
1.6 Descripción del proceso de fabricación de sólidos impalpables (PROFASOI) 16	
1.6.1 Cadena de valor del PROFASOI.....	18
1.6.2 Diagrama de flujo del PROFASOI	18
1.7 Modelos ISA S88.01 de PROFASOI.....	21
1.7.1 Modelo proceso del PROFASOI.....	21
1.7.2 Modelo físico del PROFASOI	21
1.7.3 Modelo de control de procedimientos del PROFASOI.....	23
1.7.4 Relación entre los modelos ISA S-88.01 del PROFASOI.....	24
1.8 Diagnóstico del PROFASOI.....	25
1.8.1 Relación entre el nivel de automatización, nivel de dificultad y necesidad de automatización.	25
1.8.2 Análisis de los modelos ISA S88.01	26
1.9 Diagnóstico energético de la empresa el cocinerito	27

1.9.1	Balance general del consumo de la organización	27
1.9.2	Estimación del consumo de energía del proceso	29
1.10	Requerimientos PROFASOI	33
1.10.1	Requerimientos de automatización	33
1.10.2	Requerimientos de documentación	34
CAPITULO 2		34
2.1	Métodos para la eficiencia energética en procesos industriales	34
2.2	Criterios para comparación y selección del método de eficiencia energética 35	
2.3	Definición del nivel de prioridad de los criterios	36
2.4	Comparación de métodos	37
2.5	Determinación del método de eficiencia energética (MEE).....	39
CAPÍTULO 3		45
3.1	Caracterización del consumo de la energía (paso 1)	45
3.1.1	Cuantificación del consumo energético del proceso en los periodos de interés 45	
3.1.2	Cuantificación del consumo energético individual de las unidades del proceso 46	
3.2	Análisis del desempeño energético del proceso (paso 2)	47
3.2.1	Indicadores de consumo energético (IE)	47
3.2.2	Análisis de los indicadores energéticos del PROFASOI con sistema neumático previo	48
3.3	Propuesta de oportunidades de mejora (paso 3)	48
3.3.1	Lista de oportunidades de mejora	50
3.3.2	Dimensionamiento y especificación del elemento generador de vacío de las de las oportunidades de mejora.....	51
3.3.3	Selección de tecnología generadora de vacío para el sistema de transporte neumático.....	56
3.3.4	Criterios para la comparación y selección de la tecnología generadora de vacío para sistema de transporte neumático:	59
3.3.5	Evaluación de desempeño de las tecnologías de suministro de vacío...60	

3.3.6	Selección del elemento de vacío	61
3.3.7	Listado de recursos técnicos	62
3.3.8	Esquema final de la mejora de automatización, del sistema de transporte neumático de la empresa El Cocinerito.	63
3.3.9	Estimación del consumo energético del proceso, con el sistema neumático mejorado.....	64
3.4	Análisis del nuevo desempeño energético por simulación (PASO 4)	65
3.5	Análisis del costo beneficio (paso 5).....	65
3.5.1	Ahorro potencial de energía	66
3.5.2	Beneficios del sistema.....	67
CAPÍTULO 4		68
4.1	Requerimientos de simulación	68
4.1.1	Requerimientos de Proceso	68
4.1.2	Requerimientos de Equipos	70
4.2	Simulación de PROFASOI	72
4.2.1	Simulación de PROFASOI con sistema neumático previo	73
4.2.2	Simulación de PROFASOI con propuesta de mejoramiento del sistema neumático.....	76
4.3	Validación de la propuesta de eficiencia energética del sistema de transporte neumático.	81
4.3.1	Análisis del consumo energético del proceso estimado, respecto al consumo energético obtenido por simulación.....	81
4.3.2	Comparación del desempeño energético del sistema neumático previo y con propuesta de mejoramiento.	84
4.3.3	Reducción del consumo energético del proceso, con la propuesta de eficiencia energética del sistema de transporte neumático.	87
4.3.4	Alcances y consideraciones de SuperPro Designer	88
CAPÍTULO 5		89
5.1	Conclusiones	89
5.2	Recomendaciones	90
Bibliografía		90

Lista de figuras

Figura 1. Transporte neumático en fase diluida.	3
Figura 2. Transporte neumático en fase densa.	3
Figura 3. Sistema de transporte neumático por presión positiva.	4
Figura 4. Sistema de transporte neumático por presión negativa o absorción.	5
Figura 5. Sistema mixto de transporte neumático por presión positiva y negativa.	5
Figura 6. Elementos generales de un sistema de transporte neumático.	6
Figura 7. Tipos de fuentes o suministros de aire.	7
Figura 8. Industria alimenticia El Cocinerito.	9
Figura 9. Tolla de dosificación.	10
Figura 10. Ciclón de separación.	10
Figura 11. Molino de martillos.	11
Figura 12. Mezclador Ribbon Blender para homogeneización.	11
Figura 13. Molino de discos.	12
Figura 14. Mezclador Ribbon Blender para refrigeración.	12
Figura 15. Empaquetadora LAP.	13
Figura 16. Empaquetadora PULTAMA.	13
Figura 17. Sistema neumático para marcaje del producto.	14
Figura 18. Aliños y condimentos.	14
Figura 19. Repostería.	15
Figura 20. Granos.	15
Figura 21. Diagrama de etapas de PROFASOI.	16
Figura 22. Cadena de valor del PROFASOI.	18
Figura 23. Diagrama de flujo de proceso por etapas del PROFASOI.	19
Figura 24. Diagrama de flujo de proceso en operaciones de PROFASOI.	20
Figura 25. Grafica de relación entre el nivel de automatización, nivel de dificultad y necesidad de automatización.	25
Figura 26. Consumo de energía activa de El Cocinerito entre 2009 y 2014.	28
Figura 27. Consumo de energía reactiva de El Cocinerito.	29
Figura 28. Consumo total en porcentajes de la operación actual de los equipos del proceso general.	32
Figura 29. Consumo total en porcentajes de los equipos del PROFASOI con sistema neumático previo.	33
Figura 30. Diagrama de flujo del MEE.	41
Figura 31. Consumo de energía activa entre 2009 y 2014, de El Cocinerito.	46
Figura 32. Consumo total en porcentajes de los equipos del PROFASOI previo.	46
Figura 33. Esquema del sistema de transporte neumático previamente utilizado.	48

Figura 34. Esquema de un sistema de transporte neumático centralizado.	50
Figura 35. Esquema de un sistema de transporte neumático de líneas independientes.	51
Figura 36. Elemento de vacío seleccionado.....	61
Figura 37. Esquema del sistema de transporte neumático con la propuesta de mejoramiento.	64
Figura 38. Comparación del consumo energético del proceso previo, actual y mejorado.	66
Figura 39. Secuencia del PROFASOI con sistema neumático previo, simulado en Superpro Designer.	73
Figura 40. Cantidad de energía vs Unidades producidas por batch.....	74
Figura 41. Cantidad de material transportado vs energía consumida por batch	74
Figura 42. Secuencia del PROFASOI con sistema neumático mejorado, simulado en Superpro.	76
Figura 43. Unidades producidas vs cantidad de energía por batch.....	78
Figura 44. Cantidad de energía consumida vs Cantidad de material transportado por batch	79
Figura 45. Secuencia del proceso de la empresa El Cocinerito con sistema neumático previo, simulado en Superpro.	82
Figura 46. Estimación de consumo energético mensual mediante SuperPro Designer con sistema neumático previo.....	82
Figura 47. Secuencia del proceso de la empresa El Cocinerito con sistema neumático mejorado, simulado en Superpro. Designer.	83
Figura 48. Estimación de consumo energético mensual mediante SuperPro Designer del proceso con sistema neumático mejorado.	83
Figura 49. Representación gráfica del indicador IE1, para el sistema neumático previo y con mejora.....	85
Figura 50. Representación gráfica de los indicadores del sistema neumático previo y con mejora.	86
Figura 51. Diferencia del consumo energético del proceso con sistema neumático previo y mejorado.....	87

Lista de Tablas

Tabla 1. Entradas y salidas en cada etapa del PROFASOI.....	19
Tabla 2. Modelo de proceso del PROFASOI.	21
Tabla 3. Modelo físico del PROFASOI.	22
Tabla 4. Modelo de control de procedimientos del PROFASOI.....	23
Tabla 5. Convenciones para relacionar los niveles de los modelos ISA-S88.01.	24
Tabla 6. Consumo energético actual del proceso.....	30
Tabla 7. Consumo del PROFASOI con el sistema neumático previo.	31
Tabla 8. Artículos seleccionados de la revisión sistemática.	34
Tabla 9. Criterios de selección de métodos para la eficiencia energética.	35
Tabla 10. Asignación de nivel de prioridad de cada criterio de selección.....	37
Tabla 11. Cumplimiento de criterios de los métodos evaluados.	37
Tabla 12. Métodos con mayor nivel de relevancia.....	39
Tabla 13. Etapas de los 3 métodos seleccionados.....	39
Tabla 14. Longitud y volumen de los tramos de las secciones de la tubería.	49
Tabla 15. Elementos de suministro de vacío para el sistema de líneas independientes.	56
Tabla 16. Elementos de suministro de vacío para sistema centralizado.	57
Tabla 17. Especificaciones operativas para sistema de líneas independientes	58
Tabla 18. Especificaciones operativas para sistema centralizado.....	58
Tabla 19. Criterios de evaluación para selección de la tecnología generadora de vacío.	59
Tabla 20. Asignación de nivel de prioridad de cada criterio de selección.....	60
Tabla 21. Cumplimiento de criterios de las tecnologías generadoras de vacío evaluadas.....	61
Tabla 22. Dispositivos físicos requeridos para la mejora de automatización del sistema neumático.....	62
Tabla 23. Comparación del consumo energético del proceso con sistema neumático previo y mejorado.....	66
Tabla 24. Proporciones de entradas y salidas de PROFASOI.....	69
Tabla 25. Tiempos de duración de cada fase de PROFASOI.	69
Tabla 26. Equipos del proceso con sistema neumático previo.	70
Tabla 27. Equipos del proceso sistema neumático mejorado.....	71
Tabla 28. Relación entre modelos ISA S-88.01 y SuperPro Designer.....	72
Tabla 29. Comparación de consumos estimados analíticamente vs consumos estimados por SuperPro Designer del sistema previo y mejorado.....	84
Tabla 30. Comparación del indicador IE1.....	85
Tabla 31. Comparación del indicador IE2.....	86

Objetivos

Objetivo general

- Realizar una propuesta de eficiencia energética para el sistema de transporte neumático del proceso de producción de la empresa alimenticia El Cocinerito. Caso de estudio.

Objetivos específicos

- Diagnosticar el proceso de producción de la empresa alimenticia El Cocinerito.
- Determinar el método de eficiencia energética que se va a utilizar en la mejora de automatización.
- Proponer una mejora de automatización para el sistema de transporte neumático de la empresa alimenticia El Cocinerito.
- Validar la mejora de automatización propuesta, haciendo uso de una herramienta de simulación que permita analizar el nuevo desempeño energético del sistema de transporte neumático.

CAPITULO 1

MARCO CONCEPTUAL Y DIAGNÓSTICO DE LA EMPRESA EL COCINERITO

En el presente capítulo, se define un marco conceptual respecto a eficiencia energética y sus implicaciones en la industria. Posteriormente se abordan los sistemas de transporte neumático, a partir del cual se definen las generalidades asociadas a cada aspecto de estos sistemas, como los son los elementos que lo componen, al igual que los principios asociados a su funcionamiento. De igual manera, se realiza una descripción y diagnóstico del proceso productivo de la empresa El Cocinerito, con el fin de caracterizar los recursos físicos y las tareas ejecutadas en el proceso. Finalmente, se lleva a cabo un diagnóstico energético, el cual permite cuantificar el consumo de energía eléctrica del proceso productivo y del sistema de transporte neumático, a partir de lo cual se propone una mejora de automatización.

1.1 Eficiencia energética

La eficiencia energética, se refiere al uso de la menor cantidad de energía, para producir la misma cantidad de servicios o resultados útiles. En el caso del sector industrial, la eficiencia energética se puede medir por la cantidad de energía necesaria para producir una cantidad determinada de producto. Por lo tanto, la eficiencia es a menudo ampliamente definida por la relación simple [1]:

$$EE = \frac{\textit{Salida útil de un proceso}}{\textit{Entrada de energía al proceso}}$$

La eficiencia energética, se asocia a múltiples aspectos de las industrias, en particular respecto a sus procesos productivos. Con el aumento de dicha eficiencia, se pretende abordar aspectos como [2]:

- Mayor eficiencia en el suministro y uso de la energía.
- Mejor competitividad de las empresas industriales.
- Menor impacto de la producción industrial sobre el medio ambiente.
- Promoción del uso racional de todas las fuentes de energía acuerdo con la política de eficiencia energética y aumentar la eficiencia energética en la producción, distribución y consumo.

Por tanto, la gestión adecuada del recurso eléctrico en los procesos industriales, permite aumentar la eficiencia energética en una organización. Lo que se logra a partir del ajuste y optimización de los sistemas y procedimientos que utilizan

energía, con el fin de reducir los requerimientos energéticos por unidad de producto, manteniendo constante o reduciendo los costos totales de producción de estos sistemas [3].

1.2 Sistema de transporte neumático en la industria

El transporte neumático es un proceso donde partículas sólidas son transportadas de un lugar a otro, por el flujo de un gas a través de un sistema de tuberías. Este transporte se realiza debido al diferencial de presión presente en la línea de transporte. El gas generalmente es aire, pero en algunas ocasiones cambia si el material transportado es explosivo, en ese caso se utiliza un gas inherente como el nitrógeno [4]. Estos sistemas son utilizados ampliamente en la industria para transportar materiales granulados y pulverulentos¹ de diferente densidad, porque son simples, adecuados y económicos a la hora de implementarlos. El transporte de sólidos se ha practicado por más de un siglo en todo el mundo, principalmente en las industrias de: minería, construcción, químicos y fármacos, plásticos, alimentos, papel, vidrios, entre otros [5].

1.3 Modos de transporte neumático según el flujo

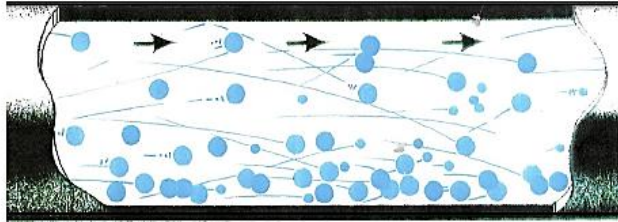
Existe una ambigüedad sobre como es el comportamiento de los materiales que se transportan dentro de una tubería o ducto según el flujo. En principio se debe tener en cuenta que los materiales pueden ser transportados por lotes o de forma continua a través de la tubería, de esta manera se pueden reconocer dos modos de transportes: fase diluida y fase densa [6].

Fase diluida

En este modo de transporte las partículas están suspendidas en el flujo del aire y distribuidas en la tubería (ver *Figura 1*), generalmente emplean grandes volúmenes de gas a altas velocidades y a una baja presión, por lo tanto los requisitos de potencia pueden llegar a ser bajos, sin embargo estos sistemas son los más utilizados para transportar sólidos a granel por su capacidad para larga distancias y su costo relativamente bajo [7]. En estos sistemas el rendimiento se ve afectado por la caída de presión que depende de varios parámetros como: propiedades del material, tuberías, flujo de aire, etc. que deben ser tenidos en cuenta en el diseño de la línea de transporte [8].

¹ Pulverulento: material que se presenta en forma de polvo.

Figura 1. Transporte neumático en fase diluida.

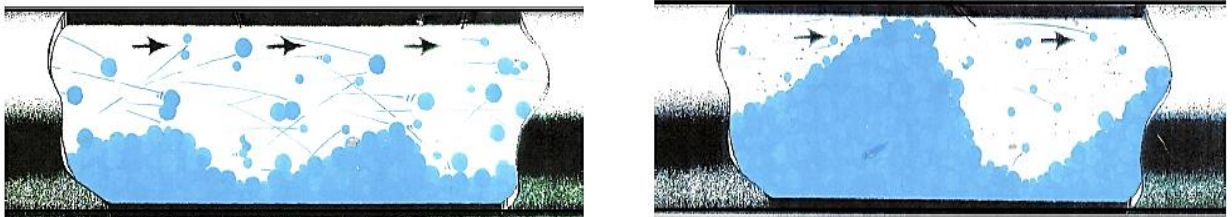


Fuente: tomada de [9], febrero 2017.

Fase densa

En este modo de transporte el gas se mantiene a una velocidad más baja que la de las partículas y a una presión alta. El proceso de transporte puede ser inestable presentando un flujo de dos maneras diferentes dependiendo de las características del material y del gas, en el primer caso las partículas fluyen en la parte superior de la sección transversal de la tubería acompañadas de una parte altamente concentrada en la parte inferior de la sección (*ver Figura 2.a*), en el segundo caso el material se mueve como dunas² o paquetes, separados por una zona de aire (*ver Figura 2.b*). También se pueden presentar taponamientos en la tubería donde no hay flujo de producto [7].

Figura 2. Transporte neumático en fase densa.



a) Primer caso de la fase densa

b) Segundo caso de la fase densa.

Fuente: tomada de [9], febrero del 2017.

1.4 Tipos de sistemas de transporte neumático

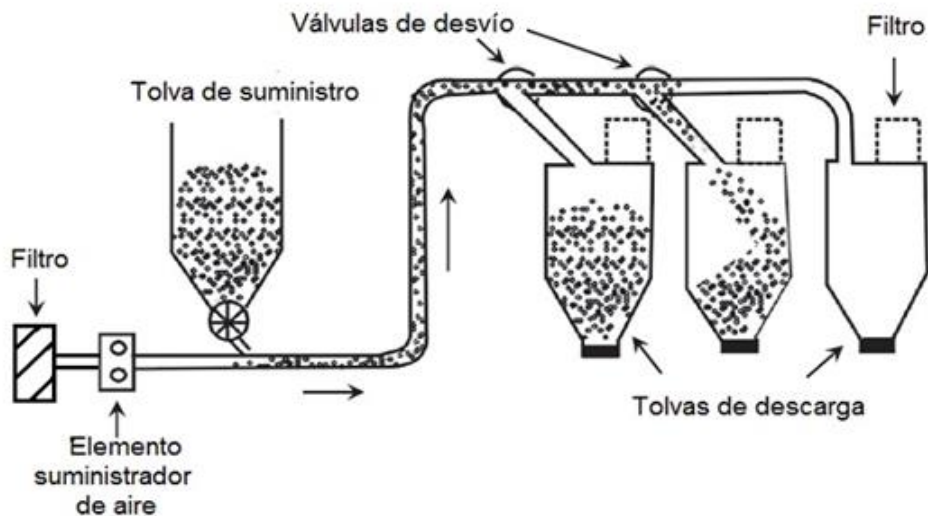
Además de clasificar los sistemas de transporte neumático según el flujo, existen otros tipos de sistemas categorizados según la configuración del mismo, estos tipos de sistemas se clasifican en tres grupos y se describen a continuación, resaltando que pueden diseñarse y funcionar en los distintos modos de transporte (fase diluida y fase densa) [7].

² Dunas: capas suaves y uniformes producidas por cambios en el aire.

Sistema por presión positiva

El sistema de presión positiva es la configuración más usada en el transporte neumático. Estos sistemas son ideales en aplicaciones de múltiple descarga, donde el material se recoge desde un único punto y se entrega a tolvas receptoras (ver *Figura 3*). En estos sistemas el material ingresa a la tubería desde una tolva utilizando un sistema de dosificación para controlar la cantidad de material, luego el elemento soplador desplaza el material hacia los diferentes contenedores en los cuales se separa el material del gas mediante una serie de filtros. El cambio de contenedor se efectúa normalmente por medio de válvulas de desvío. En este sistema en particular cabe destacar que el elemento de suministro de aire se ubica previamente a la tolva dosificadora junto con un filtro que impide el paso de partículas hacia el sistema [7][10].

Figura 3. Sistema de transporte neumático por presión positiva.



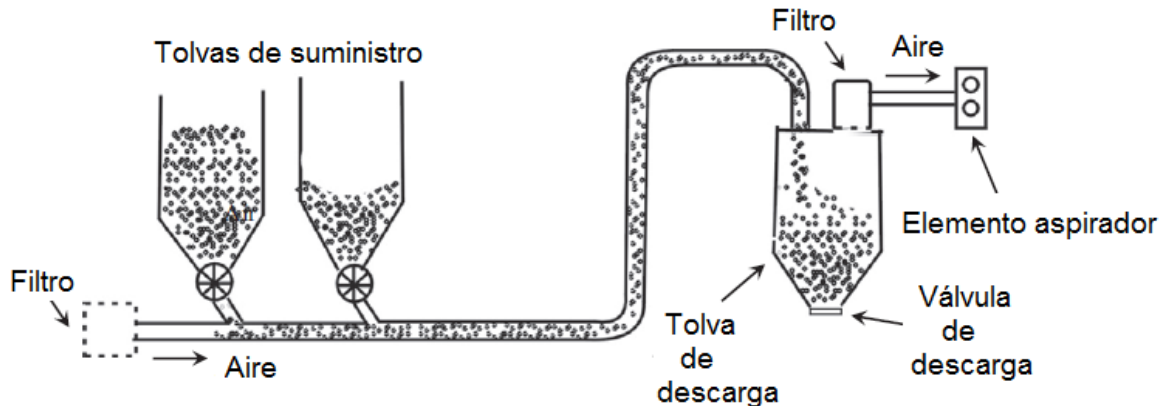
Fuente: modificada de [9], febrero del 2017.

Sistema por presión negativa o de vacío

Generalmente los sistemas de presión negativa son utilizados para transportar material desde distintos puntos de alimentación hasta un punto de descarga común, utiliza menos potencia y no requiere la preparación de aire comprimido [11]. Estos sistemas operan con presiones de aire por debajo de 1 bar. La operación del transporte implica el empleo de sistemas de extractores de diferentes tipos, ubicados al final de la línea de transporte para aspirar el material (ver *Figura 4*). Tales sistemas son ideales en el transporte de alimentos porque permiten una alimentación libre de polvo y proporcionan una característica de seguridad a las

fugas en la tubería evitando contaminación en el ambiente, debido a que estas se dan desde el exterior hacia el interior; pero, están limitados en distancia y capacidad [7][9]. El equipo receptor puede presentar un ciclón o un filtro conectado al elemento extractor para proteger el motor de partículas de material [10].

Figura 4. Sistema de transporte neumático por presión negativa o absorción.

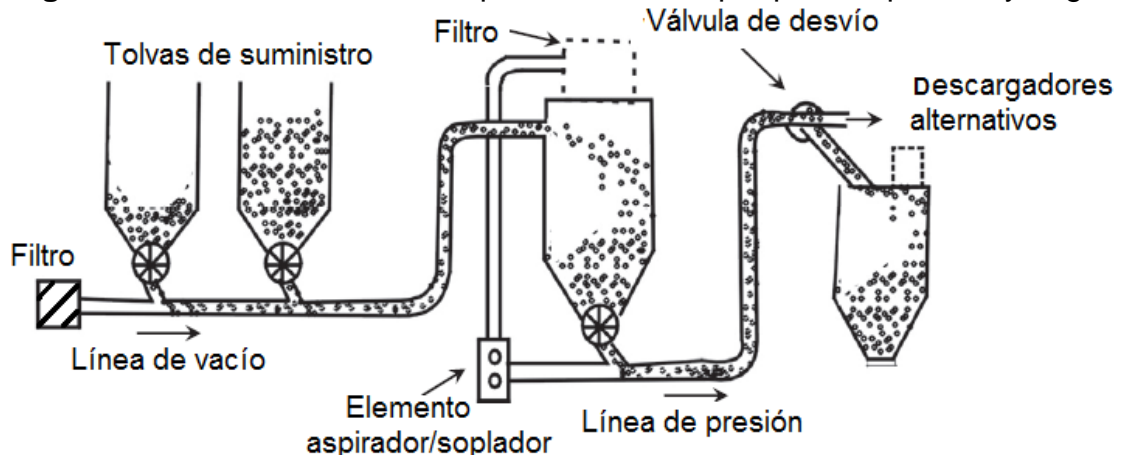


Fuente : modificada de [9], febrero del 2017.

Sistema mixto por presión positiva y negativa

Este sistema posee características de los sistemas descritos anteriormente, tal sistema también es llamado de succión – soplado y son utilizados en una amplia gama de industrias (ver Figura 5). Estos sistemas son ideales para procesos grandes porque permiten la alimentación y la descarga de un diverso número de productos, logrando aumentar la capacidad de distancia [7].

Figura 5. Sistema mixto de transporte neumático por presión positiva y negativa.

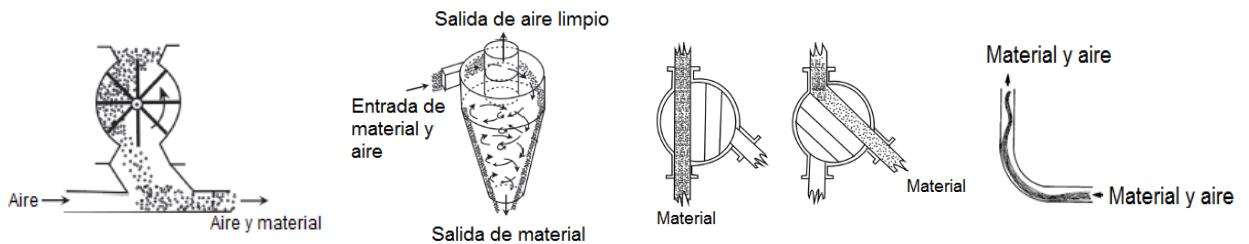


Fuente: modificada de [9], febrero del 2017.

1.4.1 Elementos de un sistema de transporte neumático

A continuación se presentan de forma general los componentes que posee un sistema de transporte neumático independiente de la técnica de transporte que se aplique, generando un panorama para la selección adecuada según sea el caso (ver *Figura 6*). Las partes principales de estos sistemas son: dispositivos de alimentación de tuberías, dispositivos de separación sólido-gas, válvulas, tuberías y fuentes de suministro de aire [9].

Figura 6. Elementos generales de un sistema de transporte neumático.



a) Dispositivo de alimentación de tuberías

b) Dispositivos de separación sólido-gas

c) Válvulas

d) Tubería

Fuente: modificada de [9], febrero del 2017.

Dispositivos de alimentación de tuberías

El dispositivo de alimentación de material es crítico para el correcto funcionamiento del sistema y se han diseñado una amplia gama de dispositivos para este propósito, sin embargo es difícil decidir cuál usar a la hora de la implementación porque esto depende de las necesidades del sistema y de temas como la velocidad de alimentación, control, problemas de fugas de aire y la idoneidad para diferentes tipos de material. Algunos dispositivos que se usan en la dosificación son: alimentadores de tornillo, válvulas rotativas (ver *Figura 6.a*), alimentadores de Venturi, alimentadores de válvula de bloqueo de puerta, boquillas de succión, entre otros [9] [12].

Dispositivos de separación sólido-gas

Los dispositivos de separación sólido-gas asociados a los sistemas de transporte neumáticos tienen dos funciones. La primera es recuperar el material transportado para la siguiente etapa del proceso de manipulación o tratamiento porque entre más valioso sea el material la recuperación total debe ser la mejor. La segunda es minimizar la contaminación del material en el ambiente de trabajo porque existen

materiales peligrosos que se deben evitar propagarse en la atmósfera y en el área de trabajo [12]. En general hay una serie de dispositivos que cumplen estos requerimientos. El tamaño de la partícula es el parámetro principal considerado en la selección del sistema y en la tasa de flujo de aire en el dimensionamiento del sistema[9].

El desacoplamiento de partículas gruesas puede lograrse utilizando una cámara de asentamiento por gravedad, para materiales más finos el elemento más adecuado es un ciclón (*ver Figura 6.b*) y para sólidos pulverulentos un filtro de tela[9].

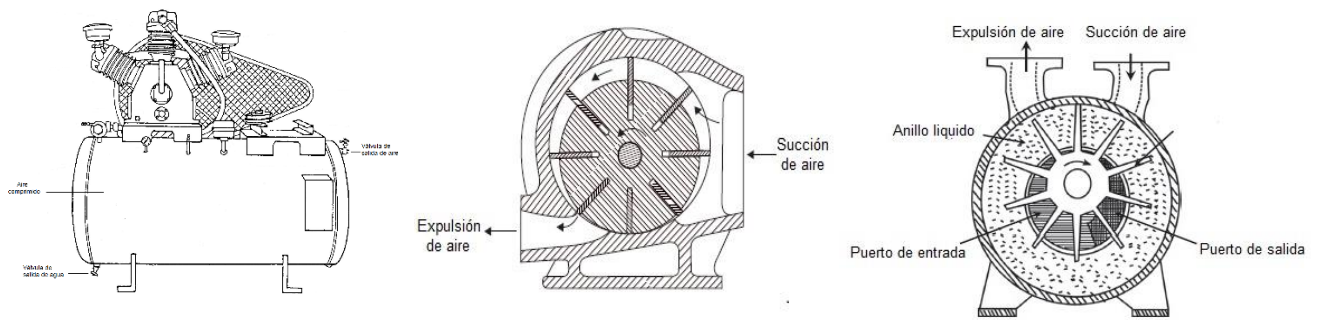
Válvulas: estos elementos son de esencial utilidad en los sistemas de transporte neumático y una gran clasificación está disponible en el mercado. Existen válvulas de desvío, cuya función es controlar el flujo del material que se transporta hacia otros contenedores, las válvulas rotativas, facilitan el control de la alimentación dentro y fuera de un sistema a una velocidad constante y las válvulas de la línea de ventilación (*ver Figura 6.c*), tienen como función aliviar a los sistemas de presiones elevadas para equilibrarlos [9][12].

Tuberías la tubería es fundamental en el sistema de transporte neumático porque muchas decisiones dependen de ella (*ver Figura 6.d*). El material, el grosor de la pared, el acabado de la superficie, los escalones y las curvas son aspectos que deben ser debidamente tenidos en cuenta para un buen diseño de la tubería. Uno de los parámetros más críticos en relación a la operación de un sistema de transporte neumático, es el mantenimiento de un sistema con velocidad mínima de transporte de aire para un determinado material, ya que esto puede causar taponamientos en la línea de transporte. Además los materiales abrasivos, friables, muy cohesivos, con alto contenido de grasa y con un punto de fusión bajo deben ser tratados con cuidado porque pueden causar averías en la tubería [9].

1.4.2 Fuentes o suministros de aire

Los compresores, ventiladores y extractores son el corazón del sistema de transporte neumático. Es importante que el tipo correcto de máquina sea seleccionado y que este correctamente especificado en términos del caudal volumétrico de aire requerido y la presión a la cual debe ser entregado. Los parámetros de estos dos valores dependen principalmente del tipo de material a transportar, su caudal y la distancia de transporte. La mayor parte de la potencia requerida de un sistema neumático proviene del suministro de aire (*ver Figura 7*), por lo tanto las características deben ser entendidas e interpretadas para realizar la elección correcta en cualquier tipo de transporte neumático [9].

Figura 7. Tipos de fuentes o suministros de aire.



a) Compresor

b) Sopladores (Blower)

c) Bombas de vacío

Fuente: modificada de [9], febrero del 2017.

Compresores: el trabajo que realizan todos los compresores es el mismo, tomar aire de la atmósfera comprimirlo y reutilizarlo para realizar un trabajo específico (ver *Figura 7.a*). Los compresores pueden usarse para desplazamiento positivo de material, suministrando aire a altas presiones o para generar vacío a partir de presión positiva mediante un sistema de Venturi. Existen gran variedad de equipos de este tipo, permitiendo tener niveles bajos medios y altos de presión a un caudal elevado, sin embargo existe un problema en estos elementos y es que la velocidad del aire es variable y en algunas ocasiones puede bajar del punto de referencia, ocasionando taponamientos en la tubería [9][12].

Sopladores (Blower): los ventiladores son ampliamente usados en sistemas de fase diluida a corta distancia, donde la posibilidad de bloquear la línea es baja. Los ventiladores pueden usarse en: sistemas de presión positiva (ver *Figura 7.b*), sistemas de presión negativa y sistemas mixtos. Con materiales ligeros y no abrasivos es posible que el material se transporte a través del ventilador, característica que no es posible con la mayoría de las máquinas de desplazamiento positivo [9].

En las tareas de vacío el ventilador se ubica al final de la línea para generar la succión apropiada. Este dispositivo es ideal para materiales livianos, en operaciones que no requieran alta presión [9].

Bombas de vacío: son dispositivos que se encargan en la remoción de aire de un recipiente o cámara, formando un vacío parcial (ver *Figura 7.c*), su funcionamiento se caracteriza por la velocidad de bombeo y la cantidad de gas evacuado por unidad de tiempo y al igual que los sopladores se ubican al final del sistema para generar succión. Estos elementos generalmente son llamados bombas de rendimiento porque generalmente el gas evacuado es liberado a la atmosfera [13].

1.5 Descripción general de la empresa el cocinerito

La Industria de Alimentos El Cocinerito, ubicada en la carrera 11 # 19-33, Santander de Quilichao, tiene como actividad económica la fabricación y comercialización de alimentos, en particular de condimentos (*ver Figura 8*). Dicha organización posee una planta de producción y un área administrativa las cuales desempeñan sus funciones en una misma infraestructura, sin embargo se presentan dificultades en la ejecución de ciertas fases del proceso productivo como es el caso del transporte de materiales entre el área de procesamiento y el área de empackado. A continuación, se presenta la información general de la empresa [14].

Figura 8. Industria alimenticia El Cocinerito.



Fuente: propia, febrero del 2017.

1.5.1 Personal

Los trabajadores vinculados con la empresa son 62, de los cuales 9 pertenecen al área de logística y distribución, 14 al área de producción, 5 al área administrativa y 34 al área comercial siendo esta última por prestación de servicios. El área administrativa y el área comercial trabajan en horario de oficina, el área de logística de 6:00 a.m. a 2:00 p.m. y finalmente el área de producción de 6:00 a.m. a 10:00 p.m. en 2 turnos de 8 horas, tiempo en el que se operan las estaciones del proceso por parte de este personal.

1.5.2 Activos físicos

Los activos físicos más representativos de la organización utilizados en la fabricación de sólidos impalpables incluyen diversos equipos, maquinaria industrial

y un sistema neumático. Los equipos industriales son: una tolva dosificadora y un ciclón. Las máquinas industriales son: 2 mezcladores Ribbon Blender, un molino de martillos, un molino de discos y 2 empaquetadoras. El sistema neumático está compuesto por un compresor conectado a una red de tuberías de suministro de aire y demás accesorios.

Tolva de dosificación: este equipo permite la dosificación de las materias primas y los aditivos necesarios para la fabricación de condimentos, estos elementos se ingresan en la tolva y caen por gravedad al molino de martillos para dar inicio al proceso productivo de condimentos (*ver Figura 9*).

Figura 9. Tolva de dosificación.



Fuente: propia, febrero del 2017.

Ciclón de separación: en el molino de martillos se genera una turbulencia, causando que el material se combine con aire. La turbulencia hace que el material se transporte hasta la máquina de mezclado, donde se separa del aire para posteriormente ser homogeneizado. EL proceso de separación del aire se realiza con un ciclón que se encuentra en el segundo piso de la planta (*ver Figura 10*).

Figura 10. Ciclón de separación.



Fuente: propia, febrero del 2017.

Molino de martillos para triturado: esta máquina es un diseño a la medida fabricado por la empresa D.M Ingeniería LTDA, teniendo en cuenta los

requerimientos del proceso, permite triturar la materia prima³ haciendo uso de un conjunto de martillos girando a baja velocidad, que permite impactar el material contra las paredes del molino. Dicha máquina cuenta con un motor trifásico Siemens, el cual transfiere movimiento a los martillos haciendo uso de una transmisión de banda, para el procesamiento del material (ver Figura 11).

Figura 11. Molino de martillos.



a) Vista frontal



b) Vista lateral

Fuente: propia, febrero del 2017.

Mezcladora homogeneizadora: es un mezclador Ribbon Blender fabricado a la medida por la empresa D.M Ingeniería LTDA, de acuerdo a los requerimientos del proceso, en su interior se realiza la mezcla de la materia prima previamente molida, con el fin de homogeneizar y darle uniformidad a este material obtenido. De igual forma esta máquina posee un motor Siemens trifásico el cual genera el movimiento requerido para mezclar el material al interior de la máquina (ver Figura 12).

Figura 12. Mezclador Ribbon Blender para homogeneización.



a) Vista frontal



b) Vista lateral

Fuente: propia, febrero del 2017.

Molino de discos para pulverizado

³ Materia prima: Hace referencia al material principal y los aditivos necesarios para fabricar condimentos.

Es un molino fabricado a la medida por la empresa D.M Ingeniería LTDA, de acuerdo a las necesidades del proceso. Haciendo uso de dos discos sin filo de los cuales uno es giratorio y el otro es fijo, se realiza una molienda fina del material obtenido en la etapa previa, dichos discos aplican fricción al producto para que adquiera las propiedades organolépticas requeridas. De igual forma esta máquina posee un motor Siemens trifásico el cual genera el movimiento requerido en los discos para pulverizar el material (*ver Figura 13*).

Figura 13. Molino de discos.



a) Vista frontal



b) Vista lateral

Fuente: propia, febrero del 2017.

Mezcladora de premezcla

En este mezclador Ribbon Blender se procede a ventilar y refrigerar el componente anteriormente procesado, con el fin de obtener el producto que se empaquetará posteriormente. Esta máquina la cual es un diseño especializado elaborado por la empresa D.M Ingeniería LTDA, a partir de los requisitos de producción del proceso, cuenta con un motor trifásico Siemens a través el cual se agita la mezcla (*ver Figura 14*).

Figura 14. Mezclador Ribbon Blender para refrigeración.



a) Vista frontal



b) Vista lateral

Fuente: propia, febrero del 2017.

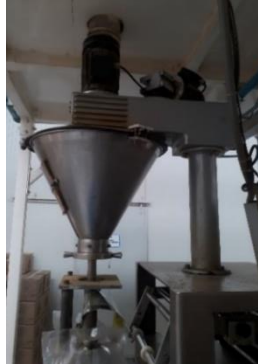
Máquinas empaquetadoras

Una vez procesada la materia prima y obtenido el producto en el área de molinos, se procede a empaquetar el material haciendo uso de una empaquetadora automática cuyo fabricante es la empresa LAP. Dicha máquina funciona de manera automática ya que utiliza para su funcionamiento un controlador lógico programable y múltiples variadores de velocidad lo que permite la previa configuración del equipo y la operación autónoma de la misma (ver Figura 15).

Figura 15. Empaquetadora LAP.



a) Vista frontal



b) Vista lateral



c) Vista trasera

Fuente: propia, febrero del 2017.

Algunos productos no necesitan ser procesados en el área de molinos para ser empacados sino que son llevados directamente desde el área de materias primas hasta la empaquetadora automática, fabricada por la empresa PULTAMA S.A, dicha maquina funciona de manera automática en conjunto de un controlador lógico programable y variadores de velocidad permitiendo la operación autónoma de la misma. Esta máquina se encuentra ubicada en frente de la empaquetadora descrita anteriormente (ver Figura 16).

Figura 16. Empaquetadora PULTAMA.



a) Vista frontal



b) Vista lateral



c) Vista interior

Fuente: propia, febrero del 2017.

Sistema neumático

Los sistemas de aire a presión son utilizados para imprimir el número de cada lote en su respectivo empaque, dicho sistema está compuesto de un compresor, una línea de transporte de tuberías, válvulas y filtros de aire, que generan aire comprimido para realizar la tarea de marcaje al producto final (ver *Figura 17*).

Figura 17. Sistema neumático para marcaje del producto.



a) Compresor

b) Tubería de PVC

c) etiquetadora

Fuente: propia, febrero del 2017.

1.5.3 Producción

Las jornadas de trabajo en el área productiva tienen una duración de 16 horas al día, de lunes a viernes y el sábado solo trabajan 8 horas. En este periodo de operación la producción se detiene en 2 ocasiones, durante 30 minutos de 9:00 a.m. a 9:30 a.m. y de 7:00 p.m. a 7:30 p.m. La comercialización de los productos ofertados por la empresa está enfocada a almacenes de cadena y distribuidores mayoristas.

En el proceso productivo de la planta se fabrican 73 productos, los cuales están clasificados en: aliños y condimentos (ver *Figura 18*), repostería (ver *Figura 19*) y granos (ver *Figura 20*). Debido a que existe un gran número de productos, se incluyen a continuación, las imágenes de los más representativos de cada línea.

Figura 18. Aliños y condimentos.

Adobo seis aliños



Adobo siete hierbas



Paprika



Tomillo molido



Perejil



Laurel Molido



Canela astilla



Canela gigante



Coco rayado



Ajo molido



Pimienta molida



Canela molida



Nuez moscada molida



Color



Fuente: propia, febrero del 2017.

Figura 19. Repostería.

Clavo de olor entero



Nuez moscada entera



Uvas pasas



Nuez del Brasil



Almendras



Fuente: propia febrero del 2017.

Figura 20. Granos.

Maíz trillado blanco



Linaza entera



Cuchuco de maíz amarillo



Alpiste



Linaza molida



Fuente: propia febrero del 2017.

Para minimizar la complejidad en el manejo de la información los productos mencionados se categorizan en 3 grandes grupos, según las características de sus partículas: granos, granos finos y sólidos impalpables. De igual manera para la elaboración de estos productos se requiere cumplir con determinadas políticas de calidad al igual que con los requerimientos de la demanda, por tanto es necesario conservar las mismas características en cada lote producido. Por ser de interés del presente trabajo de grado a continuación se describe el proceso asociado a sólidos impalpables.

La información presentada en la *sección 1.5*, se obtuvo a partir de una entrevista realizada a Germán Calvache, ingeniero de planta de la empresa El Cocinerito.

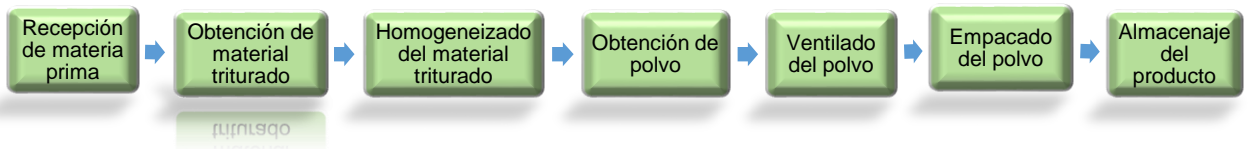
1.6 Descripción del proceso de fabricación de sólidos impalpables (PROFASOI)

La información desarrollada a continuación se enfoca en la categoría de sólidos impalpables para la ejecución del proceso en sus condiciones actuales, a partir de la cual se hace la descripción del proceso y en la cual están incluidos 20 productos de los mencionados previamente.

En la fabricación de sólidos impalpables se lleva a cabo la transformación y procesamiento de la materia prima⁴ con el fin de obtener condimentos y cuyas partículas se movilizan entre etapas del proceso para su tratamiento. La elaboración de este producto está constituida por una serie de etapas que conforman el proceso de fabricación del mismo, desde la dosificación de la materia prima hasta el almacenamiento del producto final (*ver Figura 21*). A continuación se describen estas etapas:

Figura 21. Diagrama de etapas de PROFASOI.

⁴ Materia prima: Hace referencia al material principal y los aditivos necesarios para fabricar condimentos.



Fuente: propia, febrero del 2017.

Recepción de materia prima: para llevar a cabo el proceso de elaboración de condimentos, se realiza un acondicionamiento de las materias primas en la bodega de recepción, dicho acondicionamiento consiste en el pesaje y verificación de la calidad de los materiales para luego ser transportados hasta la siguiente etapa e iniciar el proceso productivo.

Obtención de material triturado: posteriormente se carga la cantidad necesaria de materia prima para realizar un lote, este proceso se realiza en una tolva dosificadora que se encuentra en el segundo piso de la planta. Con ayuda de la gravedad, los materiales se descargan al molino de martillos, donde posteriormente son triturados, obteniendo así un componente triturado cuya fracción es de menor tamaño. Este componente obtenido es el insumo preliminar que se someterá a otros tipos de procesamientos para obtener el producto final.

Homogeneizado del material triturado: el material previamente obtenido se mezcla repetidas veces con el fin de homogeneizarlo y darle uniformidad, esta actividad se realiza en el mezclador de bandas Ribbon Blender, de esta manera las partículas de la materia prima molidas anteriormente obtienen propiedades físicas semejantes.

Obtención de polvo: una vez homogeneizadas las partículas del material se procede a realizar una molienda fina del mismo. Aplicando fricción al componente durante su triturado mediante el molino de discos, este adquiere las propiedades organolépticas del producto y de esta manera se obtiene polvo, material que se procederá a refrigerar y empaçar.

Ventilado de polvo: el producto anteriormente molido se transporta a otro mezclador de bandas en el cual se ventila y refrigera, de esta manera el material procesado adquiere una temperatura normalizada y el producto está listo para su empaçado y embalaje.

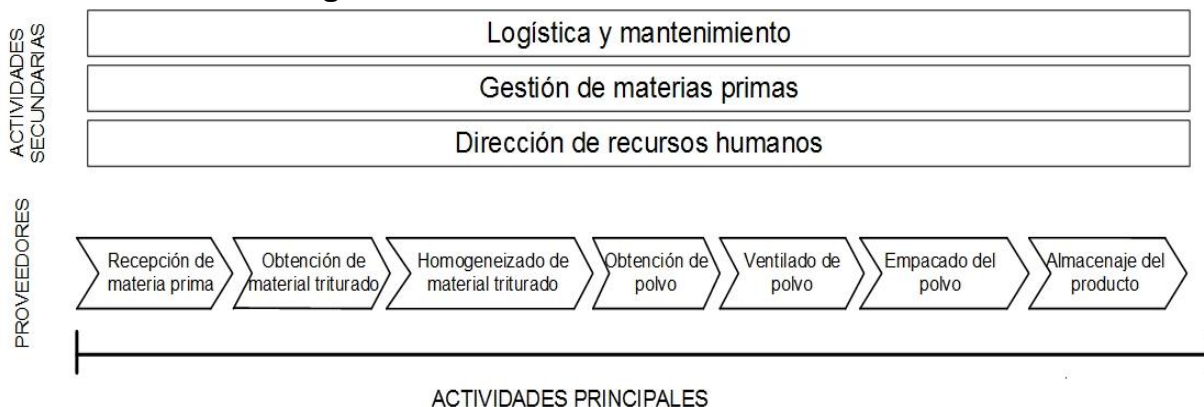
Empacado del polvo: posteriormente a procesar la materia prima y obtener el producto terminado, se procede a transportar el material a la máquina empaquetadora la cual empaça y sella el producto de manera automática, obteniendo así el condimento que posteriormente se comercializará.

Almacenaje del producto: una vez el producto se encuentra empacado, se requiere almacenar dichos artículos bajo condiciones específicas de humedad y temperatura previamente a su distribución. Dichos parámetros deben estar en un rango de 8% -12% y 16 °C -30 °C respectivamente, con el fin de preservar el producto.

1.6.1 Cadena de valor del PROFASOI

El PROFASOI en su línea de producción incluye las actividades de recepción de materia prima, obtención de material triturado, homogeneizado del material triturado, obtención de polvo, ventilado del polvo, empacado del polvo y almacenaje del producto, las cuales son necesarias para la fabricación de productos pulverulentos, dichas actividades se describen en la *sección 1.3*. La cadena de valor del PROFASOI tiene 7 actividades principales y 3 de apoyo (*ver Figura 22*).

Figura 22. Cadena de valor del PROFASOI.



Fuente: propia, febrero del 2017.

1.6.2 Diagrama de flujo del PROFASOI

En el diagrama de flujo de proceso (PFD) se representa de forma esquemática la secuencia del proceso, abarcando el recorrido y procesamiento de la materia prima hasta obtener el producto final. Previamente al planteamiento del PFD se especifican las entradas y salidas de cada etapa del proceso de fabricación de sólidos impalpables (*ver Tabla 1*). Posteriormente se realizan un PFD por etapas en el cual se detalla el flujo de material que ingresa a cada etapa, al igual que los materiales intermedios obtenidos en la salida de la misma, de igual forma se elabora un PFD por operaciones en el cual se especifica el procesamiento realizado a la

materia prima y materiales intermedios en cada etapa del proceso. Cabe resaltar que en la etapa de recepción de materia prima y en la etapa de almacenaje de producto no hay un cambio ni un procesamiento directo del material, es por esta razón que no se tienen en cuenta en los diagramas.

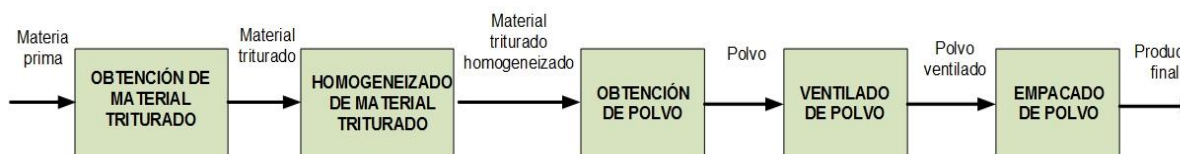
Tabla 1. Entradas y salidas en cada etapa del PROFASOI.

ENTRADA	ETAPA	SALIDA
Materia prima	OBTENCIÓN DE MATERIAL TRITURADO	Material triturado
Material triturado	HOMOGENEIZADO DE MATERIAL TRITURADO	Material triturado homogeneizado
Material triturado homogeneizado	OBTENCIÓN DE POLVO	Polvo
Polvo	VENTILADO DE POLVO	Polvo ventilado
Polvo ventilado	EMPACADO DE POLVO	Producto final

Fuente: propia, febrero del 2017.

El diagrama de flujo de proceso por etapas del PROFASOI posee como etapa inicial la obtención de material triturado cuya entrada es “materia prima” y la salida obtenida en el procesamiento ejecutado en dicha etapa es “material triturado”. Posteriormente en la etapa de homogeneizado de material triturado, la entrada es “material triturado” obtenido previamente y la salida es “material triturado homogeneizado”, resultado del tratamiento de material en esta etapa. En la etapa obtención de polvo, la entrada es el subproducto obtenido anteriormente “material triturado homogeneizado” y su respectiva salida es “polvo”, material que posee la mayor parte de las características del producto final. En la etapa de ventilado del polvo, la entrada es “polvo” en la cual posterior a su tratamiento se obtiene como salida “polvo ventilado” y finalmente en la etapa de empacado de polvo cuya entrada es “polvo ventilado”, se obtiene a la salida el producto final que está listo para su distribución (*ver Figura 23*).

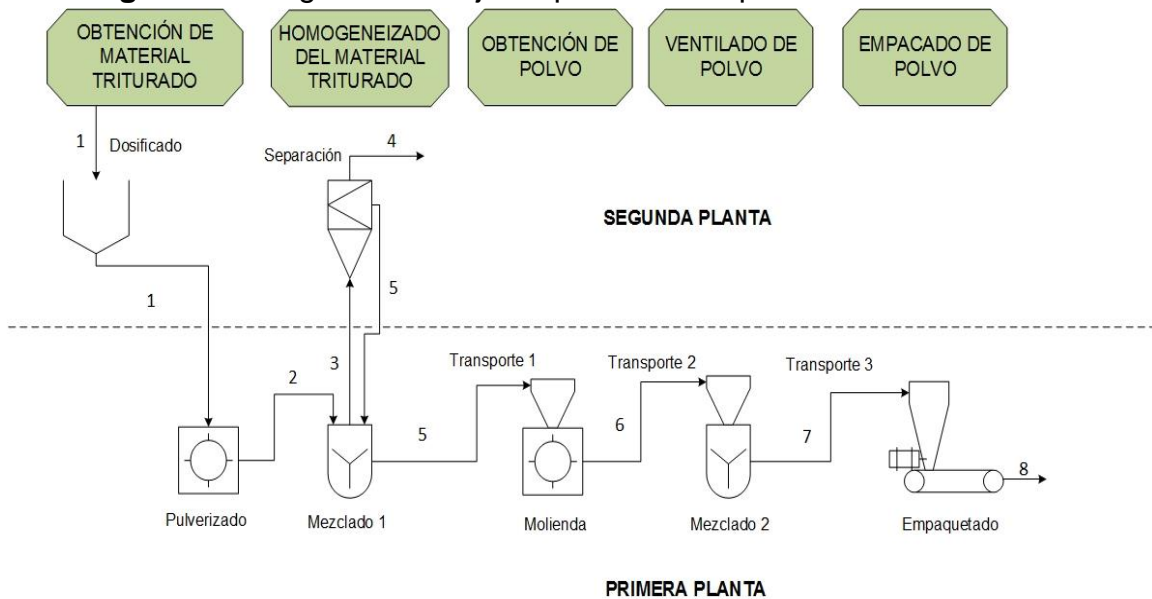
Figura 23. Diagrama de flujo de proceso por etapas del PROFASOI.



Fuente: propia, febrero del 2017.

Posteriormente a la elaboración del PFD por etapas, se procede a realizar el PFD basado en las operaciones (ver Figura 24) que se ejecutan en las etapas del proceso de fabricación de sólidos impalpables. En este proceso existen 5 etapas en las cuales se realiza procesamiento de material, cuyas partículas de este reciben cambios físicos y químicos: Obtención de material triturado (luego de ejecutarse la operación dosificado de materia prima, se procede a la operación de triturado de la misma, para obtener material triturado), homogeneizado de material triturado (cuenta con dos operaciones, separación de material triturado del aire y mezclado de material triturado), obtención de polvo (se efectúa la operación de transporte de material triturado homogeneizado y la operación de molienda de material triturado homogeneizado para adquirir polvo), en la etapa de ventilado de polvo (se llevan a cabo 2 operaciones; la de transportar polvo y la de mezclar polvo para su refrigeración), finalmente la etapa de empaçado de polvo (cuenta con las operaciones de transporte de polvo ventilado y empaquetado de polvo para así obtener el producto final, el cual va a ser almacenado para su posterior distribución).

Figura 24. Diagrama de flujo de proceso en operaciones de PROFASOI.



ID	DESCRIPCIÓN	OPERACIÓN
1	Materia prima	Dosificado
2	Material triturado	Pulverizado
3	Material triturado homogeneizado con aire	Mezclado 1
4	Aire	Separación
5	Material triturado homogeneizado	Mezclado 1
6	Polvo	Molienda
7	Polvo ventilado	Mezclado 2
8	Producto final	Empaquetado

Realizado por: Camilo Perlaiza Alvaro Chasqui	Universidad del Cauca Facultad de ingeniería Electrónica	Diagrama de flujo de proceso por operaciones Producción de sólidos impalpables	
Fecha de realización: 20 de febrero de 2017	Programa de Automática Industrial		

Fuente: propia, febrero del 2017.

1.7 Modelos ISA S88.01 de PROFASOI

1.7.1 Modelo proceso del PROFASOI

Este modelo permite categorizar de manera jerárquica el proceso productivo a partir de la aplicación de 4 clasificaciones definidas. Proceso (nivel superior que contiene las estaciones de proceso), etapas de proceso (generalmente operan de manera independiente proporcionan cambios físicos y químicos al material procesado), operaciones de proceso (actividades principales conformadas por tareas menores) y acciones de proceso (actividades de procesamiento menor que se combinan para formar las operaciones de proceso) [15]. En el PROFASOI se identifican 5 etapas, 10 operaciones y 12 acciones (*ver Tabla 2*).

Tabla 2. Modelo de proceso del PROFASOI.

PROCESO	ETAPAS DE PROCESO	OPERACIONES DE PROCESO	ACCIONES DE PROCESO
PRODUCCIÓN DE SÓLIDOS IMPALPABLES	Obtención de material Triturado	Dosificado de materia prima	Ingreso de materia prima y aditivos
		Pulverizado de materia prima	Triturado de materia prima y aditivos
	Homogeneizado de material triturado	Separación de material triturado	División de material triturado del aire
		Mezclado de material triturado	Mezclado de material triturado
	Obtención de polvo	Transporte de material triturado homogeneizado	Transporte de material triturado homogeneizado
		Molienda de material triturado homogeneizado	Molido de material triturado homogeneizado
	Ventilación de polvo	Transporte de polvo	Transporte de polvo
		Mezclado de polvo	Mezclado de polvo
	Empacado de polvo ventilado	Transporte de polvo ventilado	Transporte de polvo ventilado
		Empaquetado de polvo	Ingreso de polvo ventilado
			Dosificado de polvo ventilado
	Sellado del paquete		

Fuente: propia, febrero del 2017

1.7.2 Modelo físico del PROFASOI

Este modelo contiene 7 niveles, donde 3 pertenecen a alta gerencia y los 4 restantes se enfocan en la planta de producción, con la anterior clasificación el modelo físico de PROFASOI se realiza de la siguiente manera: A nivel de Empresa está El Cocinerito, ubicada en la ciudad de Santander de Quilichao, Colombia; a nivel de

sitio se encuentra la planta ubicada en el nororiente de Santander de Quilichao y a nivel de Área está la sección de producción donde se lleva a cabo el proceso ; estos tres (3) niveles referentes a la alta gerencia no son presentados en el diagrama pero deben ser tenidos en cuenta. Continuando con el PROFASOI, se tiene una célula de proceso conformada por 5 unidades, 10 módulos de equipo y 19 módulos de control (ver Tabla 3).

Tabla 3. Modelo físico del PROFASOI.

CÉLULA DE PROCESO	UNIDAD	MÓDULO DE EQUIPO	MÓDULO DE CONTROL	
PRODUCCIÓN DE SÓLIDOS IMPALPABLES	Pulverizado	Dosificador	Operario 1	Motor 1 (MT1)
			Tolva dosificadora 1	
		Moedor 1	Molino de martillos	
	Homogeneización	Separador	Ciclón	
		Mezclador 1	Agitador Ribbon Blender 1	Motor 2 (MT2)
	Molienda	Transportador 1	Operario 1	
			Recipiente de almacenamiento 1	
		Moedor 2	Molino de discos	Motor 3 (MT3)
	Mezcla	Transportador 2	Operario 1	
			Recipiente de almacenamiento 2	
			Cuchara de chapa 1	
		Mezclador 2	Agitador Ribbon Blender 2	Motor 4 (MT4)
	Empacado	Transportador 3	Operario 2	
		Empaquetadora	Recipiente de almacenamiento 3	
			Operario 2	Motor 5 (MT5)
			Cuchara de chapa 2	Motor 6 (MT6)
Tolva dosificadora 2			Motor 7 (MT7)	
Empaquetadora	Motor 8 (MT8)			
		Motor 9 (MT9)		
		Motor 10 (MT10)		

Fuente: propia, febrero del 2017.

Debido a que los productos pertenecientes a la línea de granos no presentan procesamiento, es decir que de almacenamiento pasan directamente al área de empaclado. Por esta razón no se realizan modelos para dicha línea. De igual manera en la ejecución del empaclado están involucrados múltiples motores trifásicos los cuales poseen la siguiente nomenclatura: Motor 11 (MT11), Motor 12 (MT12), Motor (MT13) y Motor (MT14), cuyas características y nomenclatura se especifican en el *Anexo A (fichas técnicas motores)*.

1.7.3 Modelo de control de procedimientos del PROFASOI

El modelo de control de procedimientos general del PROFASOI cuenta con el procedimiento “producción de sólidos impalpables”, el cual está conformado por 5 procedimientos de unidad, 10 operaciones y 12 fases (ver *Tabla 4*)

Tabla 4. Modelo de control de procedimientos del PROFASOI.

PROCEDIMIENTO	PROCEDIMIENTO DE UNIDAD	OPERACIÓN	FASE
PRODUCCIÓN DE SÓLIDOS IMPALPABLES	Obtención de material triturado	Dosificar materia prima	Ingresar 150 Kg de materia prima y aditivos durante 28 min
		Pulverizar materia prima	Triturar materia prima y aditivos por un tiempo de 25 a 30 minutos
	Homogeneización de material triturado	Separar material triturado	Separar material triturado del aire durante 31 minutos
		Mezclar material triturado	Mezclar material triturado por un tiempo de 5 a 8 minutos
	Obtención de polvo	Transportar material triturado homogeneizado	Transportar material triturado homogeneizado por un tiempo de 2 minutos
		Moler material triturado homogeneizado	Moler material triturado homogeneizado de 20 a 35 minutos

	Ventilar polvo	Transportar polvo	Transportar polvo por un tiempo de 5 minutos
		Mezclar polvo	Mezclar polvo por un tiempo de 10 a 15 minutos
	Empacar polvo	Transportar polvo ventilado	Transportar polvo ventilado a la siguiente etapa durante 5 minutos
		Empaquetar polvo ventilado	Ingresar polvo ventilado 50 min
			Dosificar polvo ventilado 56 min
	Sellar paquete durante 56 min		

Fuente: propia, febrero del 2017.

1.7.4 Relación entre los modelos ISA S-88.01 del PROFASOI

El modelo de control procedimientos, el modelo físico y el modelo de proceso propuestos en la norma ISA-S88.01, presentan una relación donde las tareas emitidas en el modelo de control procedimental se ejecutan sobre los equipos detallados en el modelo físico, proporcionando las funciones de proceso que conforman el modelo de proceso [16].

Se observa que los modelos desarrollados anteriormente para el PROFASOI en las secciones 1.4.1, 1.4.2 y 1.4.3 presentan 4 colores, verde, verde claro, gris y gris claro para caracterizar cada nivel, con el fin de mantener una jerarquía y relacionar los 3 modelos (*ver Tabla 5*).

Tabla 5. Convenciones para relacionar los niveles de los modelos ISA-S88.01.

Modelo de control de procedimientos	Modelo físico	Modelo de proceso	Color
Procedimiento	Célula de proceso	Proceso	
Procedimiento de unidad	Unidad	Etapa de proceso	
Operación	Módulo de equipo	Operación de proceso	
Fase	Módulo de control	Acción de proceso	

Fuente: propia, febrero del 2017.

La relación completa de los 3 modelos con su respectiva convención de colores, se presenta en el *Anexo B (Relación de los modelos ISA-S88.01 de PROFASOI)*.

1.8 Diagnóstico del PROFASOI

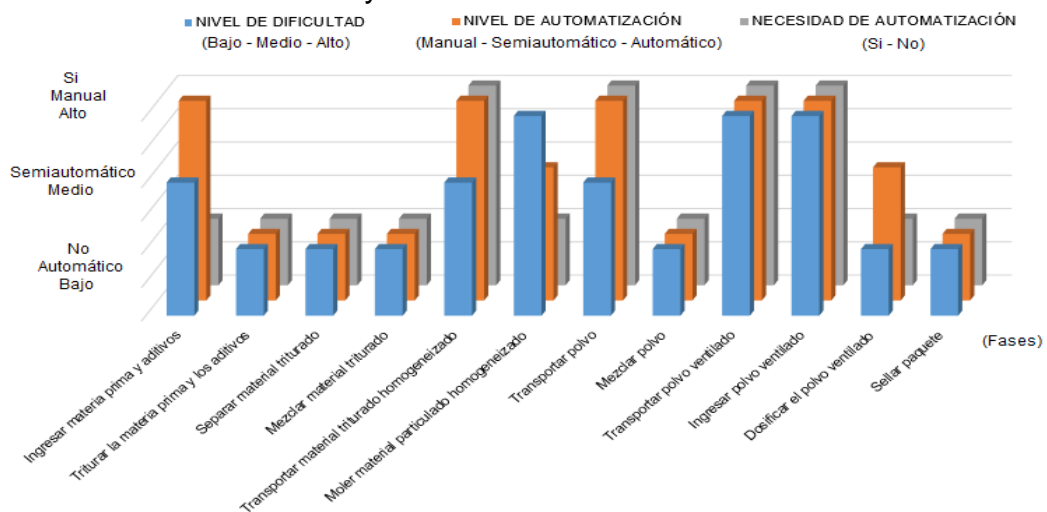
Para realizar el diagnóstico de PROFASOI en primer lugar, se determina el nivel de dificultad de las fases que conforman el proceso de acuerdo a la valoración realizada por el personal directamente involucrado en la ejecución del proceso; en segundo lugar, se especifica el nivel de automatización asociado a las fases del proceso; finalmente se analiza la necesidad de automatización de cada una de las fases asociadas al proceso según lo dicho por el molinero, el operario encargado del empaclado y el jefe de planta (El desarrollo de los pasos anteriormente descritos se realiza en el *Anexo C, Diagnostico de PROFASOI*).

El desarrollo de este diagnóstico, permite obtener un listado de requerimientos de automatización y documentación respecto a PROFASOI.

1.8.1 Relación entre el nivel de automatización, nivel de dificultad y necesidad de automatización.

A partir de la información del *Anexo C*, con respecto al estado, ejecución y requerimientos del proceso PROFASOI, se plantea una gráfica de barras que permite hacer un análisis de la relación existente entre el nivel de automatización, nivel de dificultad y la necesidad de automatización de cada una de las fases que constituyen el proceso (*ver Figura 25*).

Figura 25. Grafica de relación entre el nivel de automatización, nivel de dificultad y necesidad de automatización.



Fuente: Propia, febrero del 2017

Teniendo en cuenta el análisis de los resultados obtenidos anteriormente, los cuales se representan de manera gráfica para reflejar el estado del proceso en conjunto de cada una de las 13 fases que lo componen (*ver Figura 25*), se infiere que

típicamente las fases que poseen un nivel de dificultad bajo y un nivel de automatización automático no presentan necesidad de automatización, debido a que la ejecución de las respectivas fases del proceso no es compleja. Por otra parte se identifica que las fases que tienen un nivel de dificultad alto y un nivel de automatización manual, si requieren ser automatizadas ya que la realización de dichas fases implica un esfuerzo considerable y se vuelve necesario la propuesta de un sistema de automatización para su adecuada ejecución, es el caso de las fases “transportar polvo ventilado” e “ingresar polvo ventilado”.

1.8.2 Análisis de los modelos ISA S88.01

En esta sección se analiza cada uno de los modelos ISA S-88.01 con el fin de determinar las condiciones de operación de PROFASOI, también se especifica el nivel de automatización presente en cada una de las fases del proceso. Así mismo se analiza el consumo energético de dicho proceso ya que este es un elemento relevante en el ciclo productivo de la empresa.

A partir de la información planteada previamente respecto al proceso de fabricación de sólidos impalpables, se especifica que en dicho proceso se elaboran cantidades finitas de producto (lotes de 150 kg aproximadamente) en un periodo de tiempo específico (90 minutos) dependiendo del tipo de producto a elaborar. Las acciones llevadas a cabo en la secuencia del proceso, al igual que los medios físicos para su ejecución implican que los tiempos de elaboración del producto, al igual que las condiciones del mismo no sean las idóneas. Todo esto se debe a la implementación del proceso, ya que carece de ciertas condiciones operativas y físicas asociadas a la fabricación de sólidos impalpables.

Análisis del modelo de proceso

Cabe destacar que las operaciones que se realizan en el PROFASOI en su mayoría presentan intervención directa del personal, es decir que se realizan de forma manual, estas se desarrollan en un cuarto con poco espacio, exponiendo al molinero a ruido. Por otra parte la operación “dosificado de materia prima” que pertenece a la etapa de “obtención de material triturado”, es desarrollada de forma manual por un operario desde la segunda planta, cada vez que se requiere realizar un batch de producto. Además el transporte de material triturado, polvo y polvo ventilado pertenecientes a las etapas de obtención de polvo, ventilación de polvo y empaclado de producto respectivamente, también se desarrollan de manera manual, aumentando el tiempo de producción, generando un esfuerzo físico de los operarios, ocasionando desperdicio de material e incumpliendo las normas de regularización del INVIMA.

Análisis del modelo físico

Las unidades del modelo físico que se mencionaron en la sección 1.4.2, contienen equipos con las características adecuadas para el desarrollo de sus respectivas operaciones, dichas unidades hacen uso de motores trifásicos para su funcionamiento. Estos motores están en constante exposición a los residuos de las partículas del material procesado y el uso prolongado de los mismos ha disminuido su vida útil, al igual que su eficiencia operativa.

El PROFASOI presenta fases que se ejecutan de forma básica, cada una de ellas realizan su ejecución en equipos que trabajan de manera automática y semiautomática; sin embargo, hay inconvenientes en el transporte de material en las unidades de molienda, mezclado y empaçado. En la unidad de molienda el transporte se realiza de forma manual utilizando un recipiente; en la unidad de mezclado el producto es extraído del molidor 2 con ayuda de una cuchara de chapa y un recipiente para realizar el transporte hasta el mezclador 2; finalmente en la unidad de empaçado el producto es transportado de manera manual desde el área de molinos con un recipiente hasta la empaquetadora. El transporte manual realizado en las unidades anteriormente mencionadas, expone la integridad del operario, aumenta los tiempos de producción y afecta la calidad del producto.

Análisis del modelo procedimental

En el desarrollo de PROFASOI se ejecutan una serie de acciones definidas en la secuencia del ciclo productivo de estos productos, este modelo cuenta con un conjunto de 12 fases organizadas jerárquicamente que permiten el desarrollo de los procedimientos de unidades asociadas al modelo, y de esta manera visualizar la secuencia del proceso en detalle, logrando especificar las condiciones o parámetros asociados a cada fase (tiempo y cantidad). Durante el procesamiento de la materia prima para la obtención de sólidos impalpables, es necesario movilizar el material entre etapas del proceso para su tratamiento, con el fin de obtener un producto que posea características físicas y químicas específicas, sin embargo en la ejecución del proceso el operario manipula el material constantemente lo que trae como consecuencia pérdidas y detrimento de la calidad del producto, ya que se alteran las propiedades organolépticas del mismo.

1.9 Diagnóstico energético de la empresa el cocinerito

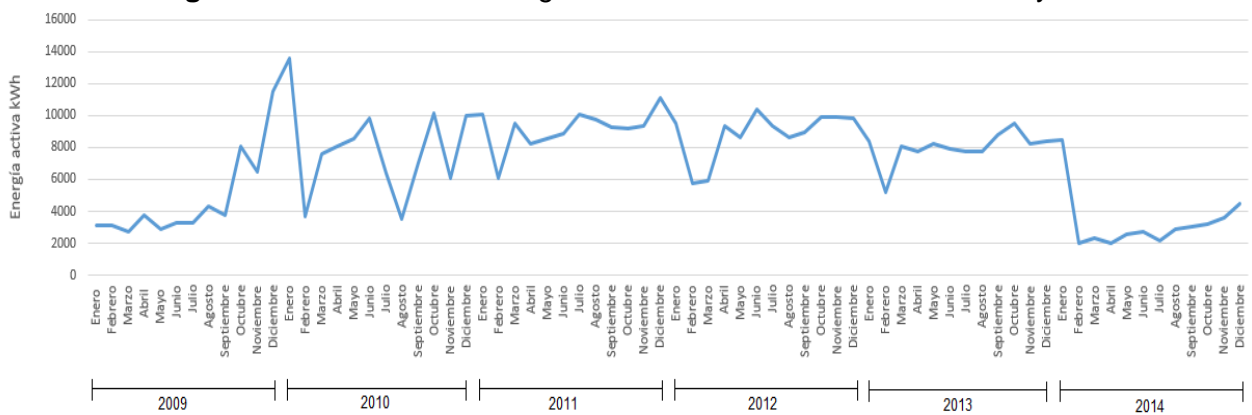
1.9.1 Balance general del consumo de la organización

El análisis del consumo energético de la empresa muestra la cantidad de energía consumida a lo largo de un periodo específico de tiempo, dicho consumo se plantea

gráficamente a partir la información registrada en las facturas de energía eléctrica de la organización. La información del consumo energético de las facturas comprenden el periodo entre el año 2009 y el año 2014 tiempo en el cual se presentaron modificaciones en los procesos energéticos de la empresa y particularmente en el proceso productivo de la misma., por esto existe un comportamiento creciente del consumo de energía eléctrica entre noviembre de 2009 hasta enero de 2014.

Teniendo en cuenta la información suministrada por el ingeniero de planta, se afirma que dicho aumento de energía utilizada se debe a la implementación y operación de un sistema de transporte neumático del proceso productivo (ver Figura 26).

Figura 26. Consumo de energía activa de El Cocinerito entre 2009 y 2014.



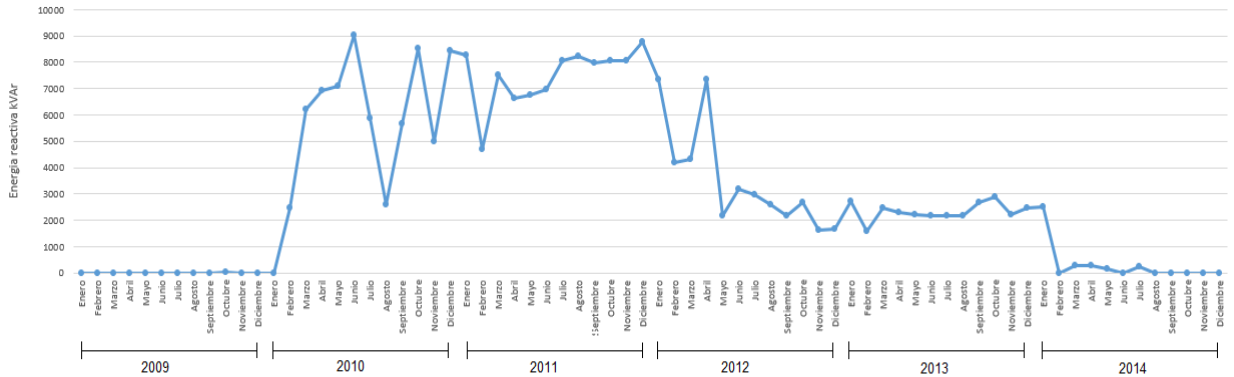
Fuente: Propia, febrero del 2017.

De igual forma es apreciable en determinadas secciones de la gráfica (ver Figura 26) una fluctuación del consumo energético, dicha fluctuación se debe a la suspensión temporal del sistema de transporte neumático en los periodos de: febrero del 2010, agosto del 2010, febrero 2012 y febrero del 2013, ocasionado por fallas en la línea de transporte neumático. De igual manera es notable la variación del consumo de energía a lo largo de los periodos de tiempo especificados, esto se debe a la variación de la demanda productiva de la empresa.

Por otra parte debido a la implementación del sistema de transporte neumático mencionado, la energía reactiva generada también tuvo un aumento significativo, ya que el elemento esencial de este sistema es un motor eléctrico de alta potencia, lo que causa una mayor generación de energía reactiva (ver Figura 27). Para contrarrestar dicho fenómeno se implementó un banco de condensadores en abril del año 2012, lo que implicó una disminución notable de la energía reactiva del sistema con el fin de mitigar el aumento en los costos energéticos de la

organización, posteriormente en febrero del año 2014 se retiró el sistema de transporte neumático debido al excesivo consumo de energía que este implicaba, como se aprecia en las gráficas previamente planteadas.

Figura 27. Consumo de energía reactiva de El Cocinerito.



Fuente: Propia, febrero del 2017.

1.9.2 Estimación del consumo de energía del proceso

Para llevar a cabo la estimación del consumo de energía del proceso, se realizó el cálculo de la potencia consumida de cada uno de los equipos que lo componen, a partir del tiempo de funcionamiento de los motores pertenecientes a dichos equipos [17] [18], en la actualidad y anteriormente cuando el compresor de tornillo estaba en funcionamiento y del cual se obtenía aire para el proceso de etiquetado, por lo que el compresor de etiquetado no se tiene en cuenta en la estimación del consumo del sistema previo .

Se aclara, que existe una distinción entre PROFASOI y el proceso productivo general de la empresa, ya que PROFASOI hace referencia a la elaboración de sólidos impalpables y el proceso general considera adicionalmente, la elaboración de granos

Los tiempos de funcionamiento se obtuvieron teniendo en cuenta la medición en campo del tiempo de procesado y empaclado de cada producto fabricado en el mes de junio, e igualmente a partir de la entrevista realizada al operario encargado de la ejecución proceso, el cual aclara que se producen 5 lotes diariamente durante 6 días de la semana, es decir 120 lotes mensuales (ver Anexo D).

Con el fin de estimar el consumo energético del proceso en su estado actual, se hace uso de la ecuación (1) a partir de las especificaciones de cada elemento disipador de energía del proceso (ver anexo A). Dicha estimación se hizo a partir de la información técnica extraída en el trabajo de campo realizado en la empresa y teniendo en cuenta que el etiquetado se hace con un compresor adicional (para mayor información de los cálculos del consumo, ver anexo D).

$$kWh = \frac{\sqrt{3} * V * I * FP * horas}{1000} \quad (1)$$

kWh: kilo watts hora

V: voltaje

I: corriente

FP: factor de potencia

Horas: horas de operación por mes

De esta manera, se presenta el consumo de energía eléctrica de cada uno de los equipos que intervienen en el proceso, excluyendo el compresor de tornillo perteneciente al sistema de transporte neumático. La suma constituye al consumo total actual de proceso general (ver Tabla 6).

Tabla 6. Consumo energético actual del proceso.

Equipo	Voltaje [voltios]	Corriente [amperios]	Horas/ mes	FP	Consumo mensual [kWh]
Molino de martillos	220	34	62	0.83	666.70
Mezclador Ribbon Blender 1	220	5.9	16	0.81	29.14
Molino de discos	220	50	70	0.8	1066.94
Mezclador Ribbon Blender 2	220	11	30	0.83	104.37
Compresor de etiquetado	220	14.2	113.05	0.78	477.13
Empaquetadora1 LAP (motor principal)	220	6.7	113.05	0.76	219.35
Motor de arrastre	220	2.1	113.05	0.75	67.85
Motor de dosificación	220	3.9	113.05	0.75	126
Motor agitador	220	2.1	113.05	0.75	67.85
Motor banda transportadora	220	2.2	113.05	0.67	63.50
Empaquetadora2 (motor principal)	220	3.8	42.09	0.74	45.10

Motor de arrastre	220	6.7	42.09	0.75	80.59
Motor de dosificación	220	3.75	42.09	0.74	44.51
Motor banda transportadora	220	2.2	42.09	0.67	23.64
Total consumo					3082.67

Fuente: Propia, febrero del 2017.

De igual manera se presenta el consumo de energía eléctrica de cada uno de los equipos que intervienen en el PROFASOI, teniendo en cuenta el compresor de tornillo para la estimación del consumo del proceso con el sistema neumático previamente implementado (*ver Tabla 7*).

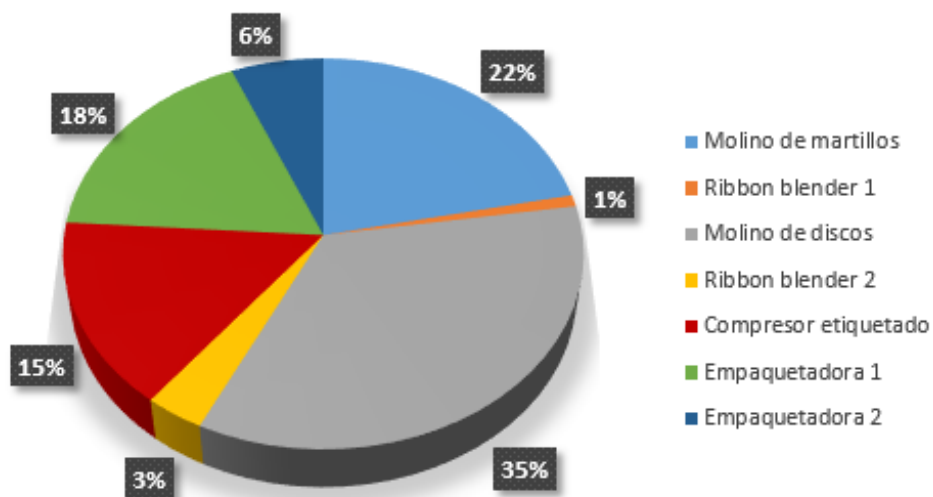
Tabla 7. Consumo del PROFASOI con el sistema neumático previo.

Equipo	Voltaje [voltios]	Corriente [amperios]	Horas/ mes	FP	Consumo mensual [kWh]
Molino de martillos	220	34	62	0.83	666.70
Mezclador Ribbon Blender 1	220	5.9	16	0.81	29.14
Molino de discos	220	50	70	0.8	1066.94
Mezclador Ribbon Blender 2	220	11	30	0.83	104.37
Empaquetadora1 LAP (motor principal)	220	6.7	113.05	0.76	219.35
Motor de arrastre	220	2.1	113.05	0.75	67.85
Motor de dosificación	220	3.9	113.05	0.75	126
Motor agitador	220	2.1	113.05	0.75	67.85
Motor banda transportadora	220	2.2	113.05	0.67	63.50
Empaquetadora2 (motor principal)	220	3.8	42.09	0.74	45.10
Motor de arrastre	220	6.7	42.09	0.75	80.59
Motor de dosificación	220	3.75	42.09	0.74	44.51
Motor banda transportadora	220	2.2	42.09	0.67	23.64
Compresor de tornillo	220	80	288	0.81	7111.33
Total consumo					9716.87

Fuente: Propia, febrero del 2017.

Con el fin de identificar el uso significativo de la energía en el presente caso de estudio, se realizó la estimación de los consumos individuales de los equipos presentes en el proceso productivo general de la empresa El Cocinerito. Los porcentajes de dichos consumos se representan gráficamente, relacionando de esta manera el consumo de cada unidad respecto al del proceso (ver *Figura 28*). Esto se hizo para el proceso en sus condiciones actuales al igual que el proceso en periodos anteriores donde el sistema de transporte neumático previo se encontraba en funcionamiento.

Figura 28. Consumo total en porcentajes de la operación actual de los equipos del proceso general.



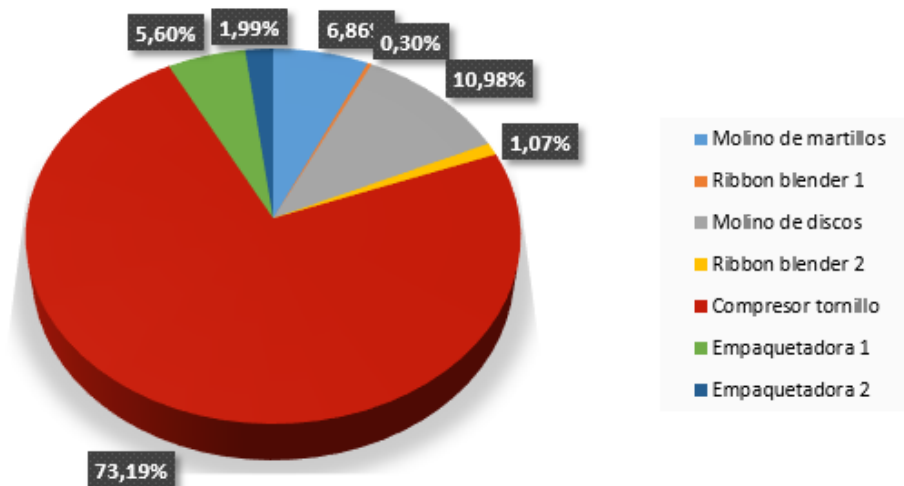
Fuente: propia, marzo del 2017.

Teniendo en cuenta la gráfica (ver *Figura 28*), se concluye que el mayor consumo está representado por el molino de martillos y el molino de discos, indicando así que actualmente el área de procesamiento es la que genera un mayor consumo del PROFASOI. Con el fin de asociar el consumo del proceso con el consumo total de la empresa, se lleva a cabo la comparación de la cantidad de energía utilizada por el proceso respecto a la energía total registrada en la factura del mes de junio, un total de 3582.72kWh.

La diferencia entre los valores estimados de consumo total actual del PROFASOI y los registrados en la factura mencionada, se debe a que la estimación no tiene en cuenta el consumo del área administrativa y la iluminación de la planta e igualmente a las variaciones en la demanda de producción que se presentan mensualmente.

Posteriormente se realizó la esquematización de los porcentajes del consumo total del PROFASOI con el compresor de tornillo (ver *Figura 29*), perteneciente al sistema neumático previamente implementado

Figura 29. Consumo total en porcentajes de los equipos del PROFASOI con sistema neumático previo.



Fuente: propia, marzo del 2017.

A partir de la información previamente graficada (ver *Figura 29*), es notable que el equipo que mayor consumo genera es el compresor de tornillo asociado al sistema neumático previo, lo que permite concluir que la propuesta de eficiencia energética estará asociada a dicho sistema.

1.10 Requerimientos PROFASOI

En relación al diagnóstico que se ha realizado previamente del proceso y el consumo energético, se reconocen los requerimientos para un mejor funcionamiento del proceso, estos se clasifican en: Requerimientos de automatización (RA) y requerimientos de documentación (RD).

1.10.1 Requerimientos de automatización

RA1. Diseñar el sistema de transporte neumático desde el área de procesamiento al área de empaque, a partir de las especificaciones de operación de caudal y presión requeridas, teniendo en cuenta el mínimo consumo de energía eléctrica.

1.10.2 Requerimientos de documentación

RD1. Diseñar la cadena de valor para PROFASOI

RD2. Detallar la secuencia del PROFASOI realizando el PFD con base en ISA-S5.1

RD3. Modelar PROFASOI haciendo uso de ISA-S88.01.

CAPITULO 2

DEFINICIÓN DEL MÉTODO DE EFICIENCIA ENERGÉTICA

Para la selección del método de eficiencia energética más idóneo en el planteamiento de la mejora de automatización del sistema neumático de PROFASOI, es necesario realizar una clasificación sistemática de la información asociada a metodologías y estrategias de eficiencia energética en procesos industriales. Para ampliar la información de la clasificación sistemática, (en el Anexo E, Revisión sistemática de artículos de eficiencia energética) se presenta el procedimiento detallado.

2.1 Métodos para la eficiencia energética en procesos industriales

Después de realizar la clasificación sistemática, el resultado fue la selección de quince artículos a partir de los cuales se obtienen métodos⁵ que desarrollan el tema de eficiencia energética en procesos industriales (*ver Tabla 8*).

Tabla 8. Artículos seleccionados de la revisión sistemática.

MÉTODOS	NOMBRE DE LOS ARTÍCULOS
M.1	A general methodology for energy efficiency of industrial chemical processes [19].
M.2	Simulation and optimization of energy consumption in cold storage chambers from the horticultural industry [20].
M.3	Framework methodology for increased energy efficiency and renewable feedstock integration in industrial clusters [21].
M.4	Potentials for reducing primary energy consumption through energy audit in the packaging paper factory [2].
M.5	Energy Audit as a Tool for Improving Overall Energy Efficiency in Serbian Industrial Sector [22].
M.6	The energy saving opportunity in targeting non-value added manufacturing activities-a structured approach [23].
M.7	A review on energy saving strategies in industrial sector [3].
M.8	Energy efficiency measurement in industrial processes [24].

⁵ Métodos: Se refiere a estrategias, metodologías y demás procesos para la eficiencia energética.

M.9	Development of an energy management system for a naphtha reforming plant:A data mining approach [25].
M.10	Energy saving in industrial processes using modern data acquisition systems [26].
M.11	Strategies to improve industrial energy efficiency [27].
M.12	Energy efficiency in the milling process of dehydrated products, using hammer mill [28].
M.13	Pneumatic conveying system optimization [29].
M.14	A framework for energy reduction in manufacturing process chains (E-MPC) and a case study from the Turkish household appliance industry [30] .
M.15	Novel method of benchmarking energetic efficiency of industrial systems [31].

Fuente: propia, marzo 2017.

2.2 Criterios para comparación y selección del método de eficiencia energética

Con el fin de determinar el método de eficiencia energética más apropiado en el desarrollo de la mejora de automatización, se plantean y aplican una serie de criterios para la selección del método para la eficiencia energética del sistema neumático, presente en el proceso de fabricación de sólidos impalpables.

El planteamiento de dichos criterios para la selección del método, se hizo teniendo en cuenta la información obtenida de la revisión sistemática desarrollada anteriormente, en la cual se obtuvo un conjunto de artículos que exponen y desarrollan una serie de metodologías y estrategias para la reducción del consumo energético en procesos industriales. Por tanto las pautas tenidas en cuenta en la determinación del método para la eficiencia energética, se plantearon a partir de métodos previamente estructurados y aplicados al sector industrial (*ver Tabla 9*).

Tabla 9. Criterios de selección de métodos para la eficiencia energética.

CRITERIOS	
C.1	¿Propone una metodología?
C.2	¿El método utiliza o propone el uso de normas técnicas o estándares?
C.3	¿Hace uso de formalismos matemáticos en su desarrollo?
C.4	¿Esta aplicada a un caso de estudio en particular?
C.5	¿Se puede aplicar de forma genérica a otros casos?
C. 6	¿Propone el uso de tecnología para la eficiencia energética?
C.7	¿Propone el uso de una auditoria energética?
C.8	¿Realiza el uso de simulación para cuantificar el consumo energético?

Fuente: propia, marzo 2017.

Los criterios planteados previamente se asocian a una serie de elementos utilizados en el desarrollo de los métodos para la reducción del consumo energético en

procesos industriales de los artículos obtenidos en la revisión sistemática, dichos criterios consisten en:

C1: Indica si en el desarrollo de la propuesta de eficiencia energética expuesta en el artículo, se plantea un conjunto de etapas organizadas constituyentes de una metodología.

C2: Hace referencia al uso de estándares y normas técnicas, en la estructuración y ejecución de la propuesta de eficiencia energética.

C3: Indica si en el planteamiento de la mejora de la eficiencia energética se utilizan formalismos matemáticos para caracterizar el consumo energético y demás aspectos del proceso.

C4: Se asocia a la aplicación del método para la eficiencia energética en un caso de estudio de la industria.

C5: Hace referencia a que el método desarrollado, se puede adaptar de manera general a otros casos de estudios diferentes a los propuestos en cada artículo.

C6: Corresponde a la identificación de posibles mejoras tecnológicas en la operación del proceso.

C7: Consiste en la aplicación de una auditoria energética para la caracterización y diagnóstico del consumo del proceso.

C8: Corresponde al uso de simulación para cuantificar y analizar el desempeño energético del proceso.

2.3 Definición del nivel de prioridad de los criterios

Posteriormente al planteamiento de los criterios para la selección del método de eficiencia energética más idóneo, es necesario la definición de un nivel de prioridad para cada uno de los criterios, ya que dichas pautas establecidas difieren una de la otra respecto a su relevancia en el desarrollo y aplicación del método en un contexto industrial. La asignación del nivel de prioridad mencionado, al igual que la posterior evaluación de cada método abordado se hace teniendo en cuenta las pautas planteadas en el artículo [32].

Para la definición de dicho nivel de prioridad se llevó a cabo una evaluación conjunta de los criterios propuestos anteriormente, en la cual los tres miembros del grupo de trabajo que desarrollan la propuesta de eficiencia energética para el caso de estudio, asignaron de manera individual un porcentaje de relevancia a cada uno de los criterios a partir del conocimiento adquirido en la investigación realizada respecto a métodos de eficiencia energética en procesos industriales.

Posteriormente a la asignación de los porcentajes del nivel de prioridad realizada, se llevó a cabo una ponderación de dichos valores con el fin de definir el nivel de prioridad de cada criterio evaluado (ver *Tabla 10*).

Tabla 10. Asignación de nivel de prioridad de cada criterio de selección.

Criterios	Evaluador. 1	Evaluador 2	Evaluador 3	Suma	Ponderado
C1.-Metodología	20 %	20 %	5 %	45 %	15 %
C2.-Estándares	5 %	10 %	20 %	35 %	11.67 %
C3.-Matemática	5 %	10 %	10 %	25 %	8.33 %
C4.-Caso Estudio	10%	15 %	5 %	30 %	10 %
C5. -Generalidad	15 %	10 %	20 %	45 %	15 %
C6. -Tecnología	10 %	20 %	10 %	40 %	13.33 %
C7. -Auditoria	15 %	5 %	20 %	40 %	13.33 %
C8. -Simulación	20 %	10 %	10 %	40 %	13.33 %
Total	100 %	100 %	100 %	300 %	100 %

Fuente: propia, marzo 2017.

2.4 Comparación de métodos

Los artículos analizados anteriormente proponen metodologías y estrategias para la reducción del consumo de energía eléctrica en procesos industriales. Para la selección del método que se implementara en la mejora, se lleva a cabo la evaluación de los métodos a partir de los criterios de selección previamente establecidos, con su respectivo nivel de prioridad [32], es decir que se asigna un nivel de prioridad nulo a los métodos que no cumplen el criterio evaluado y de igual manera se le asigna 100% del nivel de relevancia inferido, a aquel método que cumple dicho criterio (ver *Tabla 11*).

Tabla 11. Cumplimiento de criterios de los métodos evaluados.

	C.1	C.2	C. 3	C. 4	C.5	C.6	C.7	C.8	TOTAL
M.1	15%	0%	0%	10%	15%	13.33%	0%	0%	53.33%
M.2	15%	0%	8.33%	10%	0%	13.33%	0%	13.33%	59.99%
M.3	15%	0%	0%	10%	15%	13.33%	0%	13.33%	66.66%
M.4	15%	11.67%	0%	10%	15%	13.33%	13.33%	0%	78.33%
M.5	15%	0%	0%	0%	15%	13.33%	13.33%	0%	56.66%
M.6	0%	11.67%	8.33%	10%	15%	13.33%	0%	13.33%	71.66%
M.7	0%	11.67%	8.33%	0%	15%	0%	0%	0%	35%
M.8	15%	11.67%	8.33%	10%	15%	13.33%	0%	13.33%	86.67%
M.9	0%	0%	8.33%	10%	15%	13.33%	0%	13.33%	59.99%
M.10	0%	0%	0%	10%	15%	13.33%	0%	0%	38.33%
M.11	0%	0%	8.33%	0%	15%	13.33%	0%	0%	36.66%

M.12	15%	0%	0%	10%	15%	13.33%	0%	13.33%	66.66%
M.13	0%	0%	0%	0%	15%	13.33%	0%	0%	28.33%
M.14	0%	11.67%	8.33%	10%	15%	0%	0%	13.33%	58.33%
M.15	0%	0%	8.33%	10%	15%	13.33%	0%	13.33%	59.99%

Fuente: propia, marzo 2017.

La búsqueda sistemática a partir de la cual se realizó la comparación de artículos, se hizo partiendo de las referencias bibliográficas tenidas en cuenta inicialmente en el planteamiento de la propuesta de eficiencia energética para el caso de estudio, descritas en el estado del arte. Estos documentos aportan métodos para la eficiencia energética en procesos industriales, el caso de **M.1**, **M.2** y **M.8** en las que se plantean metodologías usadas en procesos de intercambio térmico para el mejoramiento del uso del recurso energético a partir de la implementación de mejoras tecnológicas en sus respectivos casos de estudio. Por otra parte en **M.7** se plantean estrategias genéricas para el aumento de la eficiencia energética en procesos industriales a partir de la gestión del recurso energético, uso de tecnologías y políticas de operación. Así mismo **M.13** plantea métodos generales para el mejoramiento de sistemas neumáticos a partir de un diseño específico según los requerimientos del proceso.

Los documentos obtenidos en la investigación, proponen una serie de metodologías y estrategias para la eficiencia energética a partir de múltiples medidas, tanto operativas como funcionales. En dichos documentos se desarrollan una serie de etapas en las cuales se plantea el uso distintas herramientas técnicas y funcionales para la reducción del consumo energético en procesos industriales, es el caso de **M.3** , **M.4** ,**M.5** y **M.12** los cuales plantean y aplican una metodología para la eficiencia energética en procesos industriales, de igual manera **M.3**, **M.4**, **M.5**, **M.6**, **M.9**, **M.10**, **M.11**,**M.12**, **M.13** y **M.15** proponen la implementación de maquinaria y tecnología para la eficiencia energética, por otra parte **M.4**, **M.7**, **M.8** y **M.14** en su desarrollo plantean el uso de estándares y normas técnicas para la estructuración de sus mejoras de eficiencia energética.

De igual manera **M.2** y **M.3** proponen la realización de auditorías energéticas para el estudio del consumo energético del proceso y de esta manera mejorar el uso de la energía eléctrica en el proceso industrial, también **M.3**, **M.6**, **M.8**, **M.9**, **M.12**, **M.14** y **M.15** utilizan la simulación para cuantificar y analizar el desempeño energético del proceso industrial y verificar la disminución del gasto energético, Teniendo en cuenta los procedimientos anteriormente mencionados y evaluados, se procede a realizar la selección de los métodos más representativos.

2.5 Determinación del método de eficiencia energética (MEE)

Por tanto a partir de la comparación y evaluación de los procedimientos obtenidos de la revisión sistemática respecto a métodos y estrategias para eficiencia energética en procesos industriales, se hizo la selección de los artículos más relevantes, a partir de la asignación del nivel de relevancia previamente definido. Para la definición del método de eficiencia energética, que de ahora en adelante se llamará MEE que se pretende utilizar en el caso de estudio, se hace una revisión de los elementos más representativos planteados en cada documento seleccionado, identificando los criterios comunes y no comunes de las publicaciones más relevantes (ver *Tabla 12*). Es decir que se determina el MEE a partir del cual se planteará la mejora de automatización, realizando el consolidado de los elementos más representativos de dichos documentos.

Tabla 12. Métodos con mayor nivel de relevancia.

MÉTODOS	CRITERIOS COMUNES	CRITERIOS NO COMUNES
(M.4) Potentials for reducing primary energy consumption through energy audit in the packaging paper factory	Estándares Caso de estudio Generalidad Tecnología	Metodología Auditoria
(M.6.) The energy saving opportunity in targeting non-value added manufacturing activities-a structured approach	Estándares Caso de estudio Generalidad Tecnología	Matemática Simulación
(M.8) Energy efficiency measurement in industrial processes	Estándares Caso de estudio Generalidad Tecnología	Metodología Matemática Simulación

Fuente: propia, marzo 2017.

Se especifica las etapas comprendidas en cada uno de los procedimientos evaluados con el fin de reconocer los elementos comunes en dichos procedimientos y de esta manera definir las pautas o pasos que permitirán determinar el MEE que se va a aplicar al caso de estudio (ver *Tabla 13*).

Tabla 13. Etapas de los 3 métodos seleccionados.

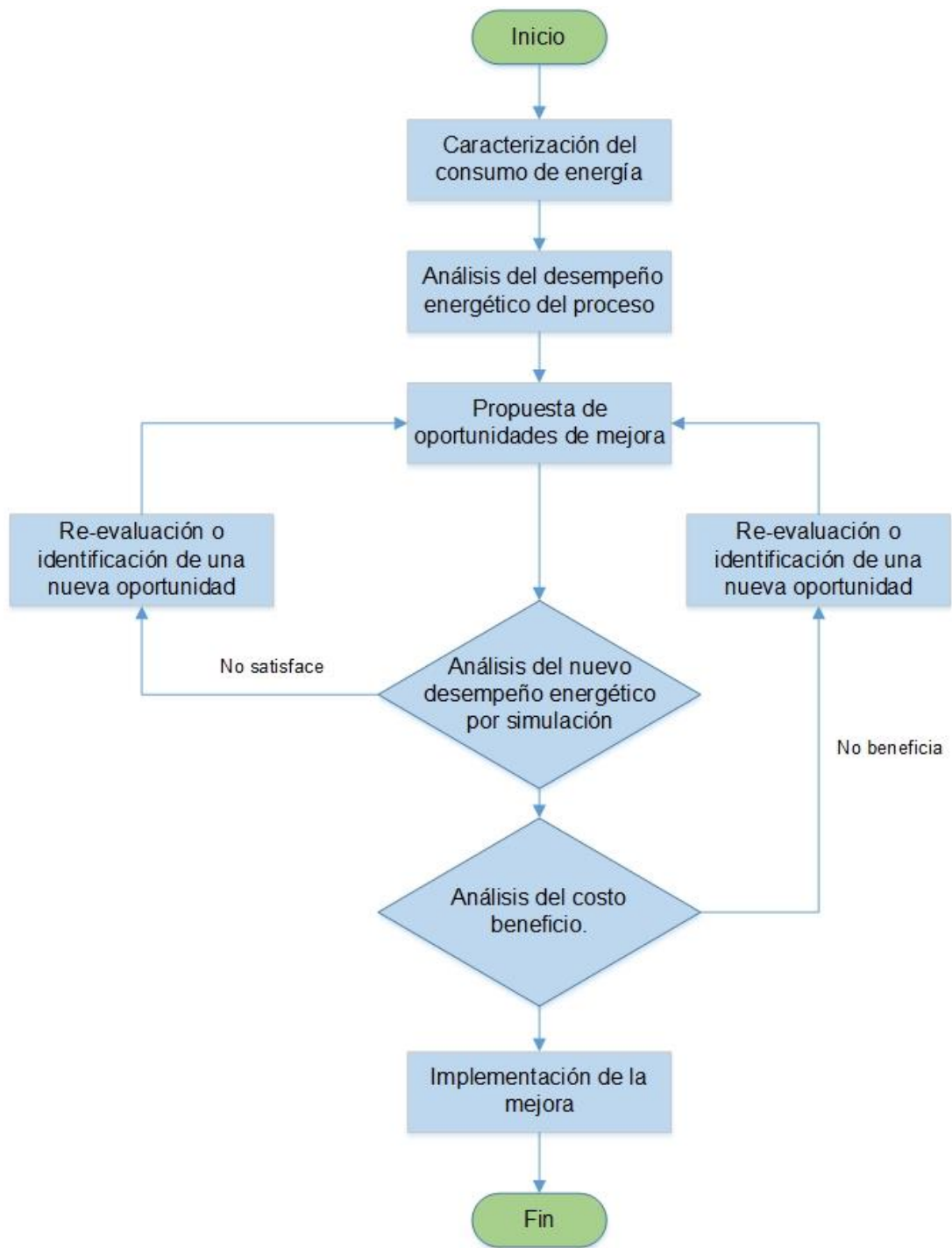
MÉTODOS	M.4	M.6	M.8
	1. Determinación de donde y como se consume la energía en el proceso de producción. 2. Definición de posibilidades para	1. Evaluación de energía y de recursos 2. Mapeo de energía y de recursos de fábrica.	1. Caracterización del consumo de energía. 2. Eficiencia energética del proceso

ETAPAS	reducir el consumo de energía primaria 3. Análisis técnico económico y evaluación de las medidas propuestas. 4. Definición de la lista de prioridades con medidas que contribuyan a la reducción continua del consumo de energía primaria en el proceso de producción	3. Identificación de oportunidades de equipos de producción. 4. Análisis del riesgo costo beneficio 5. Implementación piloto 6. Integración de fábrica	3. Identificación de oportunidades de ahorro energético 4. Análisis del desempeño energético por simulación
---------------	---	---	--

Fuente: propia, marzo 2017.

Se aprecia que los procedimientos previamente analizados, están constituidos por un conjunto de etapas comunes en las cuales se lleva a cabo acciones similares, con el fin de mejorar la eficiencia energética. Dichas etapas son: caracterización del consumo de energía, análisis del desempeño energético del proceso, identificación de oportunidades de mejora, simulación de la mejora para la eficiencia energética y análisis del costo beneficio. Sin embargo la aplicación de los métodos de manera individual, no permite desarrollar en su totalidad una propuesta de eficiencia energética para un sistema de transporte neumático. Por esto se hace necesario la recopilación de los 3 métodos seleccionados (ver *Tabla 13*) en un solo método que permita proponer y validar una propuesta de eficiencia energética para el presente caso de estudio. Teniendo en cuenta lo anterior, se propone el MEE a partir del cual se planteará la mejora de automatización en el caso de estudio (ver *Figura 30*).

Figura 30. Diagrama de flujo del MEE.



Fuente: propia, marzo 2017.

A continuación se describen los pasos contenidos en el MEE, a partir del cual se lleva a cabo la propuesta de eficiencia energética para el caso de estudio:

Paso 1: Caracterización del consumo de energía.

Con el fin de caracterizar el consumo eléctrico de PROFASOI se hace una recopilación de información respecto al consumo individual y conjunto de los equipos involucrados en la secuencia del proceso con el fin de procesar dicha información y cuantificar el consumo energético del proceso, para esto se llevan a cabo los siguientes elementos.

- Cuantificación del consumo energético del proceso en periodos de interés.
- Cuantificación del consumo energético individual de las unidades del proceso.

Paso 2: Análisis del desempeño energético del proceso

Luego de realizar la cuantificación del consumo eléctrico, se procede a realizar un análisis de los datos obtenidos para identificar las áreas de mayor consumo y estimar la relación del consumo energético respecto a variables de interés del proceso, para posteriormente proponer medidas correctivas y oportunidades de mejora. Para esto se tienen en cuenta los siguientes elementos.

- Indicadores de consumo energético.
- Análisis e interpretación del desempeño energético del proceso.

Paso 3: Propuesta de oportunidades de mejora

A partir de los pasos previamente definidos se identifican las áreas de mayor consumo y se propone una serie de medidas correctivas que involucran la implementación de tecnología para mejorar la eficiencia energética. Para esto es necesario conocer en detalle el funcionamiento y operación del proceso para proponer una mejora efectiva.

- Realizar una lista de oportunidades.
- Dimensionar y especificar los elementos de la oportunidad de mejora.

Paso 4: Análisis del nuevo desempeño energético por simulación

Con el fin de corroborar el desempeño idóneo del proceso con las oportunidades de eficiencia energética propuestas, se realiza la simulación de la secuencia del proceso con las modificaciones planteadas en la oportunidad de mejora.

- Simular secuencia del proceso sin la mejora
- Simular secuencia del proceso con la mejora

- Analizar el desempeño de los dos casos para cuantificar la nueva eficiencia energética.

Ya que en esta etapa se desarrolla un estudio de viabilidad de la mejora propuesta, es necesario corroborar la eficacia de la misma, lo que implica una reestructuración de dicha mejora en caso de no ser viable.

Paso 5: Análisis del costo-beneficio.

En esta sección se realiza un estudio de los costos que implica la implementación de la mejora planteada, con el fin de determinar la factibilidad de la medida propuesta y el tiempo de recuperación de la inversión.

- Costos de la oportunidad de mejora

Si el estudio económico no es viable se procede a realizar un nuevo estudio de una oportunidad de mejora

Paso 6: Implementación de la mejora.

En esta sección se lleva a cabo, la instalación y puesta en marcha de la oportunidad de mejora seleccionada y analizada anteriormente. Sin embargo, no es de interés para el presente trabajo de grado, realizar dicha implementación.

CAPÍTULO 3

APLICACIÓN DEL MEE, EN LA PROPUESTA DE MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE TRANSPORTE NEUMÁTICO DE LA EMPRESA EL COCINERITO.

Con el fin de realizar la propuesta de la mejora de automatización para el sistema neumático del caso de estudio, se lleva a cabo la aplicación del MEE. Teniendo en cuenta esto, en esta sección se desarrollan cada una de las etapas planteadas en dicho método, con el fin de proponer una mejora de automatización.

De igual forma, el desarrollo de las etapas establecidas en el MEE se basa en la información expuesta en el *CAPÍTULO 1*, respecto a la caracterización y diagnóstico del proceso productivo de la empresa El Cocinerito y el sistema de transporte neumático previamente implementado.

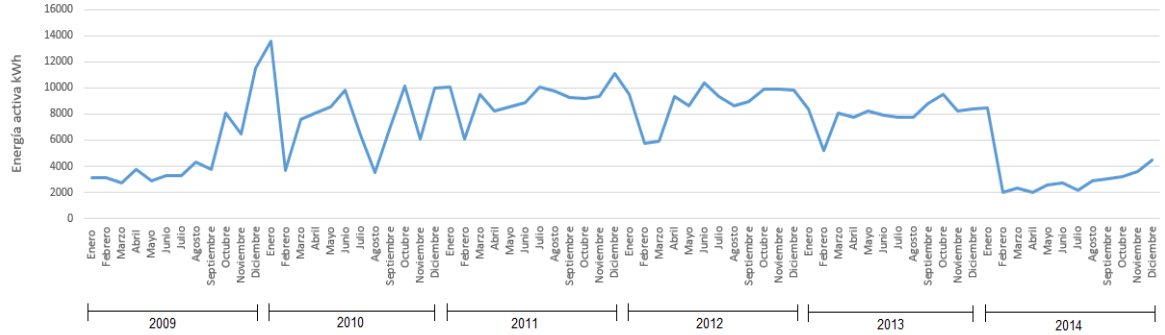
3.1 Caracterización del consumo de la energía (paso 1)

Con el fin de realizar la propuesta de eficiencia energética, se identifica los elementos del proceso que generan un consumo significativo y de esta manera proponer medidas correctivas que aumenten la eficiencia energética en el elemento que implica un mayor consumo de energía [2] [17]. Dichas medidas correctivas se plantean a partir del diagnóstico energético realizado en la sección 1.6, el cual está constituido por la siguiente información.

3.1.1 Cuantificación del consumo energético del proceso en los periodos de interés

Como se muestra en la sección 1.6.1, el análisis del consumo energético de la empresa indica la cantidad de energía consumida en el periodo comprendido entre el año 2009 y el año 2014, dicho consumo se plantea gráficamente a partir de la información registrada en las facturas de energía eléctrica de la organización (*ver Figura 31*).

Figura 31. Consumo de energía activa entre 2009 y 2014, de El Cocinerito.



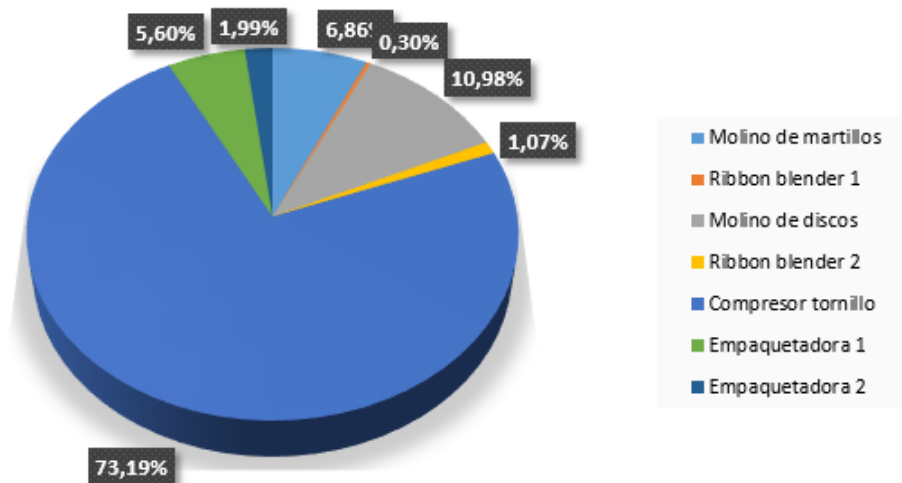
Fuente: propia, junio 2017.

Se aprecia en la anterior grafica (ver *Figura 31*) que existe un aumento considerable de energía eléctrica entre diciembre del 2009 y febrero del 2014, esto se debe a la implementación y operación de un sistema de transporte neumático en el proceso productivo.

3.1.2 Cuantificación del consumo energético individual de las unidades del proceso

En la sección 1.9.2, se realizó la cuantificación y representación gráfica del consumo energético de los equipos involucrados en el proceso productivo de la empresa El Cocinerito en sus condiciones actuales [18], al igual que en periodos anteriores donde el sistema de transporte neumático previo se encontraba en funcionamiento. A continuación se presenta la cuantificación del consumo de los equipos del proceso cuando este sistema estaba implementado (ver *Figura 32*).

Figura 32. Consumo total en porcentajes de los equipos del PROFASOI previo.



Fuente: propia, junio 2017.

Se aprecia en la anterior gráfica (ver *Figura 32*) que más del 70% corresponde al consumo del elemento que suministra el aire en el sistema de transporte neumático anteriormente utilizado, el cual es considerablemente mayor con respecto a los demás equipos.

3.2 Análisis del desempeño energético del proceso (paso 2)

A partir de la cuantificación del consumo energético del proceso con el sistema neumático previamente implementado realizada en el PASO 1, se logró identificar que el mayor porcentaje del consumo de PROFASOI corresponde al compresor de tornillo de dicho sistema. Es por esto que para llevar a cabo el análisis del desempeño energético del proceso y del sistema mencionado, es necesario el planteamiento de indicadores energéticos que relacionen el consumo de energía con las variables de interés.

3.2.1 Indicadores de consumo energético (IE)

Con el fin de monitorear el consumo energético tanto del proceso productivo como del sistema de transporte neumático, se plantean una serie de indicadores de eficiencia energética respecto a las áreas de interés de la empresa. Dichos indicadores se definen teniendo en cuenta el levantamiento de información previamente realizado respecto a las variables de interés del proceso y su consumo de energía [18][24].

IE1 (Cantidad de energía /Unidades producidas):

Es la razón entre la cantidad de energía utilizada en la fabricación un producto, respecto al número de unidades producidas del mismo, obteniendo así la cantidad de energía para la producción de una unidad.

$$IE1 = \text{Cantidad de energía} / \text{Unidades producidas}$$

$$IE1 = 396.8 \text{ kWh} / 12500 \text{ unidades equivalente a } 0.03 \text{ kWh} / \text{unidades}$$

IE 2 (Cantidad de energía /Cantidad de material transportado): indica la relación, entre la cantidad de energía que requiere el sistema de transporte neumático, para movilizar 1 batch de producto específico, respecto a la cantidad de material que se transporta en dicho lote.

$$IE2 = \text{Cantidad de energía} / \text{Cantidad de material transportado}$$

$$IE2 = 58.16 \text{ kWh} / 150 \text{ kg equivalente a } 0.39 \text{ kWh} / \text{kg}$$

Los indicadores anteriormente establecidos se definieron a partir de la información contenida en la sección 4.2.1 del capítulo 4, mediante la herramienta computacional.

3.2.2 Análisis de los indicadores energéticos del PROFASOI con sistema neumático previo

Teniendo en cuenta los indicadores planteados, se lleva cabo el análisis del desempeño energético a partir de la relación de las acciones del proceso y la cantidad de energía requerida para su ejecución, permitiendo así cuantificar el desempeño energético del proceso para su posterior análisis. Dicho análisis se realiza en la sección 4.2.1, partiendo de los datos que brinda la herramienta computacional.

3.3 Propuesta de oportunidades de mejora (paso 3)

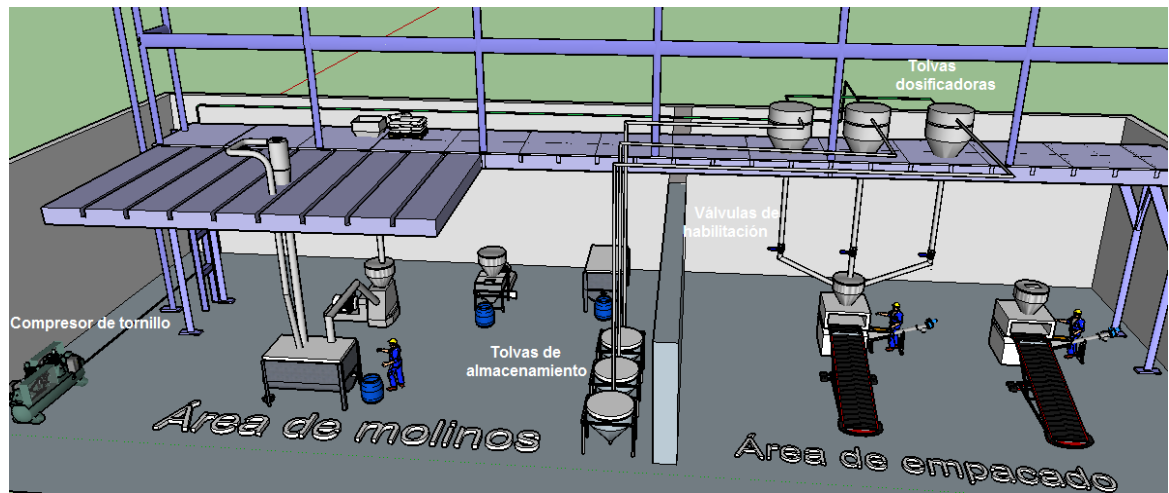
A partir de la caracterización y diagnóstico energético previamente realizado se lleva a cabo el planteamiento de una propuesta de mejoramiento, la cual consiste en el diseño de un nuevo sistema de transporte neumático, para lo que se requiere el dimensionamiento y selección de una nueva tecnología para la generación de vacío de dicho sistema.

Sistema de transporte neumático previamente implementado

Con el fin de proponer una mejora efectiva se requiere conocer en detalle el funcionamiento y operación, tanto del sistema de transporte neumático como del proceso productivo. Teniendo en cuenta esto, se procede a describir el funcionamiento de dicho sistema previamente implementado en la empresa El Cocinerito (*ver Figura 33*), el cual se utilizaba para la movilización del producto final al área de empaquetado.

El elemento esencial de este sistema era un compresor de tornillo de 30 HP, el cual generaba un flujo de aire positivo constante a lo largo de un sistema de tuberías de policloruro de vinilo, para posteriormente crear presión de vacío por medio de un banco de tubos Venturi, lo que permitía la succión de materiales pulverulentos, desde el área de molinos al área de empaquetado a través de un sistema de tuberías de acero inoxidable. Sin embargo debido al funcionamiento permanente del compresor del sistema de transporte y a la alta potencia que demanda el motor, el consumo de energía de la empresa aumentó, lo que implicó el aumento en los costos de operación de la empresa de manera significativa.

Figura 33. Esquema del sistema de transporte neumático previamente utilizado.



Fuente: propia, julio del 2017.

Teniendo en cuenta el sistema anteriormente planteado se llevó a cabo la caracterización del circuito neumático, utilizado en el transporte entre unidades. A continuación se detallan las longitudes y volúmenes de cada sección del sistema de tuberías mencionado (ver Tabla 14). Para mayor información sobre los cálculos de los volúmenes, dirigirse a la sección 6.1 del Anexo F.

Tabla 14. Longitud y volumen de los tramos de las secciones de la tubería.

Tramo	Longitud (cm)	Volumen (cm ³)
Sección 1		
T1	94	1700.98
T2	200	3619.11
T3	94	1700.98
T4	1095	19814.65
Longitud y volumen total	1483	42135.72
Sección 2		
T5	94	1700.98
T6	237	4288.65
T7	94	1700.98
T8	985	17824.14
Longitud y volumen total	1410	25514.75
Sección 3		
T9	94	1700.98
T10	274	4958.19
T11	94	1700.98
T12	1124	20339.42
T13	94	1700.98
T14	168	3040.05
Longitud total	1848	33440.6

Fuente: propia junio del 2017

Por tanto a partir de la caracterización previa, se llevará a cabo la definición de las especificaciones de operación respecto a la cantidad de aire desplazado por unidad de tiempo y su respectiva presión de vacío. Para mayor información de los cálculos de las especificaciones de operación del sistema neumático, dirigirse a la sección 6.3, del Anexo F.

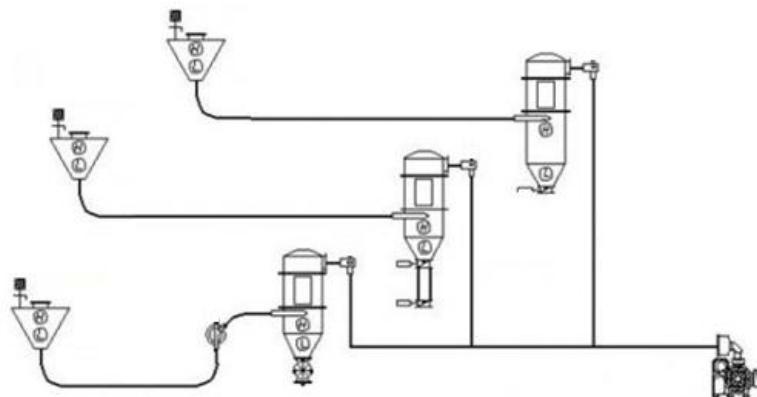
3.3.1 Lista de oportunidades de mejora

Ya que se requiere llevar a cabo el diseño de un nuevo sistema de transporte que posea un mínimo consumo de energía eléctrica, garantizando un flujo constante de aire a una presión de vacío determinada, se evalúan dos oportunidades para el diseño de un nuevo sistema que cumpla dichos requerimientos.

Sistema de transporte Centralizado

El esquema centralizado hace uso de un único elemento de suministro de vacío (ver *Figura 34*), el cual genera un flujo de aire que se distribuye entre múltiples líneas de transporte neumático, con el fin de movilizar el polvo a distintos puntos de almacenamiento. De esta manera se opera todo el sistema neumático haciendo uso de una sola máquina, que se dimensiona según las especificaciones de caudal y presión del sistema.

Figura 34. Esquema de un sistema de transporte neumático centralizado.

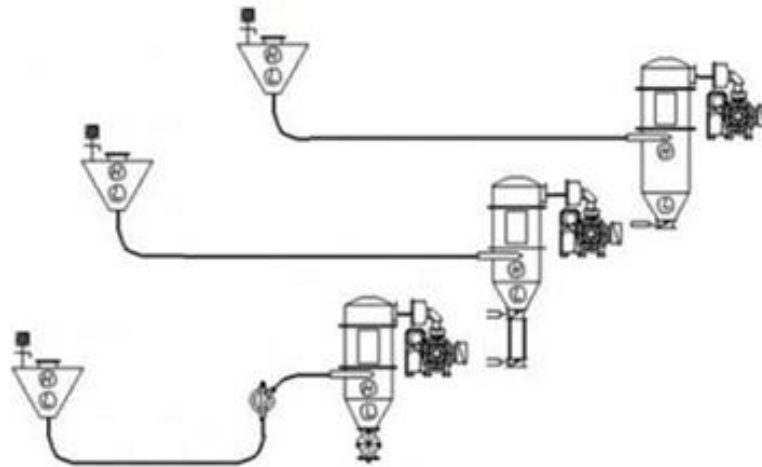


Fuente: Modificada de[33], junio del 2017.

Sistema de transporte de líneas independientes

En el sistema de líneas independientes existen tantos elementos generadores de vacío como líneas de transporte (ver *Figura 35*), es decir que en este tipo de sistema se moviliza el polvo a partir de la operación de múltiples máquinas, cuya activación depende del punto de almacenamiento al que se requiere transportar el producto.

Figura 35. Esquema de un sistema de transporte neumático de líneas independientes.



Fuente: Modificada de[33], junio del 2017.

3.3.2 Dimensionamiento y especificación del elemento generador de vacío de las de las oportunidades de mejora.

Teniendo en cuenta, la información previa y que se requiere la reutilización del circuito neumático del sistema previo, se procede a definir los requerimientos de operación del sistema neumático para cada oportunidad de mejora planteada y posteriormente realizar la selección del medio de generación de vacío, lo cual constituye el elemento esencial de la propuesta de mejoramiento. Esto se hace a partir del cálculo del caudal y presión de vacío requeridos en la operación del sistema neumático.

Cálculo de las especificaciones de operación de las oportunidades de mejora del sistema de transporte neumático

En esta sección se lleva a cabo el cálculo de las especificaciones de operación del sistema de transporte neumático, respecto al caudal y presión requerida para el transporte de 6 Kg por minuto, según el requerimiento del cliente. Con el fin de obtener dichos valores se consideran dos opciones para la realización de este cálculo, la primera hace uso de un modelo teórico-empírico para hallar estos valores y la segunda se realiza a partir de la medición de los volúmenes en el circuito neumático del sistema de transporte.

- **Cálculo para sistema de transporte de líneas independientes**

Para esta oportunidad de mejora el esquema propuesto consta de tres líneas de transporte, las cuales presentan un flujo independiente en cada una y poseen longitudes distintas. Este sistema consta de tres máquinas que funcionan de manera independiente y que poseen las mismas especificaciones de operación, ya que las líneas de transporte poseen dimensiones similares y por tanto dicha máquina se selecciona teniendo en cuenta la línea de mayor longitud, siendo esta la que más energía requiere en su transporte.

- **Opción 1:** Teniendo en cuenta las expresiones planteadas en el modelo teórico-empírico Keys&Chambers [6] [12] [34], se hallan las pérdidas de carga del sistema haciendo uso de la ecuación (3), para posteriormente obtener la presión de vacío requerida. De igual forma el caudal se calcula a partir de la ecuación (2).

$$Q = Va \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \quad (2)$$

$$Q = 117 \text{ m}^3/\text{h}$$

Con la siguiente ecuación (3) se hallan las pérdidas de línea:

$$\Delta P_{\text{linea}} = \Delta P_{ac} + \Delta P_v + \Delta P_H + \Delta P_{\text{codos}} \quad (3)$$

$$\Delta P_a = 119.829 \text{ mmH}_2\text{O}$$

$$\Delta P_H = 1186.68 \text{ mmH}_2\text{O}$$

$$\Delta P_v = 83.769 \text{ mmH}_2\text{O}$$

$$\Delta P_{\text{codos}} = 106.114 \text{ mmH}_2\text{O}$$

$$\Delta P_{\text{linea}} = 14396.392 \text{ mmH}_2\text{O} = 14674.59 \text{ Pa}$$

Con la siguiente ecuación (4) ,se halla la presión de vacío:

$$P_{\text{vacío}} = \Delta P_{atm} - \Delta P_{\text{linea}} \quad (4)$$

$$P_{\text{vacío}} = 89325.73 \text{ Pa} - 14674.59 \text{ Pa}$$

$$P_{\text{vacío}} = 74651.14 \text{ Pa} = 746.51 \text{ mbar}$$

Los valores de presión y caudal obtenidos previamente se hallaron a partir de la sistematización de las ecuaciones del modelo teórico-empírico en la herramienta Matlab, la cual permitió el desarrollo de un interfaz para la obtención de las especificaciones de operación, para mayor información de los cálculos ver sección 6.3 del Anexo F.

- **Opción 2:** Para llevar a cabo el cálculo del volumen de aire que se requiere desplazar en la línea de transporte del sistema neumático, se realizó la medición

y posterior cálculo del volumen de las tuberías y las tolvas de almacenamiento que lo componen.

Volumen de la tolva dosificadora

$$V_{ta} = 57423.6 \text{ cm}^3$$

Volumen tubería de la sección 1

$$V_{ts1} = 26835.72 \text{ cm}^3$$

Volumen total sección 1

$$V_{totals1} = V_{ts1} + V_{ta}$$

$$V_{totals1} = 26835.72 \text{ cm}^3 + 57423.6 \text{ cm}^3$$

$$V_{totals1} = 84259.32 \text{ cm}^3$$

Volumen tubería de la sección 2

$$V_{ts2} = 25514.75 \text{ cm}^3$$

Volumen total sección 2

$$V_{totals2} = V_{ts2} + V_{ta}$$

$$V_{totals2} = 25514.75 \text{ cm}^3 + 57423.6 \text{ cm}^3$$

$$V_{totals2} = 82938.35 \text{ cm}^3$$

Volumen tubería de la sección 3

$$V_{ts3} = 33340.6 \text{ cm}^3$$

Volumen total sección 3

$$V_{totals3} = 33340.6 + 57423.6 \text{ cm}^3$$

$$V_{totals3} = 90864.2 \text{ cm}^3$$

Caudal por sección

$$Q = V/t$$

Sección 1

$$Q_1 = 84259.32 \text{ cm}^3/\text{seg}$$

Sección 2

$$Q_2 = 82938.35 \text{ cm}^3/\text{seg}$$

Sección 3

$$Q_3 = 90864.2 \text{ cm}^3/\text{seg}$$

De esta manera se halla el caudal requerido para cada línea de transporte en la generación del flujo del sistema en mención, como la razón entre el volumen de aire desplazado en cada línea por unidad de tiempo. El proceso de medición y cálculo del volumen de las tuberías y las tolvas de almacenamiento que lo componen, se lleva a cabo en la sección 6.1 del Anexo F.

- **Cálculo para Sistema de transporte Centralizado**

Esta oportunidad de mejora propone un esquema de un solo elemento generador de vacío, el cual crea un flujo para múltiples líneas de transporte. Con el fin de dimensionar y seleccionar dicha máquina se realiza el cálculo del caudal requerido en cada línea de transporte mediante las dos opciones de cálculo consideradas anteriormente y posteriormente se suman con el fin de hallar la presión requerida para dicho caudal, de esta manera se obtienen las especificaciones de operación para el sistema de transporte centralizado.

- **Opción 1:** Teniendo en cuenta las expresiones planteadas en el modelo teórico-empírico Keys&Chambers [6] [12] [34], se hallan las pérdidas de carga del sistema para posteriormente obtener la presión de vacío requerida. De igual forma el caudal para cada línea de transporte se calcula a partir de la ecuación (2), para posteriormente sumar dichos valores y obtener un caudal total, de esta manera a partir de dicho caudal total se lleva a cabo el cálculo de la presión de operación del sistema neumático.

$$Q = Va. \frac{\pi. d^2}{4} \quad (5)$$

$$Q1 = 117 \text{ m}^3/h$$

$$Q2 = 117 \text{ m}^3/h$$

$$Q3 = 117 \text{ m}^3/h$$

Se suman los caudales

$$Q_{total} = Q1 + Q2 + Q3 = 351 \text{ m}^3/h = 0.0975 \text{ m}^3/s$$

Con la ecuación (3) se hallan las pérdidas de línea:

$$\Delta P_a = 49.481 \text{ mmH2O}$$

$$\Delta P_H = 1642 \text{ mmH2O}$$

$$\Delta P_v = 82.877 \text{ mmH2O}$$

$$\Delta P_{codos} = 129.497 \text{ mmH2O}$$

$$\Delta P_{linea} = 1903.855 \text{ mmH2O} = 18670.439 \text{ Pa}$$

Con la ecuación (4) ,se halla la presión de vacío:

$$P_{vacío} = 89325.73 \text{ Pa} - 18670.439 \text{ Pa}$$

$$P_{vacío} = 70655.291 \text{ Pa} = 706.553 \text{ mbar}$$

- **Opción 2:** Para llevar a cabo el cálculo del volumen de aire que se requiere desplazar en las líneas de transporte del sistema neumático, se realizó la medición y posterior cálculo del volumen de las tuberías y las tolvas de almacenamiento que lo componen. Sin embargo para hallar el caudal total del esquema centralizado, es necesario sumar los volúmenes parciales de cada línea de transporte, calculados previamente, para finalmente obtener el volumen total por unidad de tiempo que se requiere desplazar.

Volumen total sección 1

$$V_{total1} = 84259.32 \text{ cm}^3$$

Volumen total sección 2

$$V_{total2} = 82938.35 \text{ cm}^3$$

Volumen total sección 3

$$V_{total3} = 90864.2 \text{ cm}^3$$

Caudal por sección

$$Q = V/t$$

Sección 1

$$Q_1 = 84259.32 \text{ cm}^3/\text{seg}$$

Sección 2

$$Q_2 = 82938.35 \text{ cm}^3/\text{seg}$$

Sección 3

$$Q_3 = 90864.2 \text{ cm}^3/\text{seg}$$

Caudal total del sistema

$$Q_{total} = Q_1 + Q_2 + Q_3 = 258061.87 \text{ cm}^3/\text{s}$$

Teniendo en cuenta el valor de caudal anteriormente calculado en la opción 2 para el sistema centralizado, se infiere el valor de velocidad de transporte que dicho caudal hallado implica.

$$V_a = \frac{4 * Q}{\pi * d^2}$$

$$V_a = 14261.04 \text{ cm/s}$$

$$V_a = 142.6104 \text{ m/s}$$

Sin embargo esta velocidad excede el rango adecuado para el transporte de polvos ligeros, el cual se encuentra en un rango aproximado de 12-17 m/s [12], lo que permite concluir que los valores de caudal hallados a partir de la medición del volumen del sistema no son los idóneos. Por tanto no se tienen en cuenta en el cálculo de la presión y posteriormente en la definición de las especificaciones de operación del sistema de transporte.

Es por esto que los valores obtenidos a partir del modelo teórico empírico considerado en la opción 1 en ambas oportunidades de mejora, brindan mayor veracidad, sustento conceptual y práctico respecto a los cálculos realizados. Por tanto para la definición de los requerimientos operativos del sistema respecto a caudal y presión se tienen en cuenta los valores obtenidos en la opción 1.

3.3.3 Selección de tecnología generadora de vacío para el sistema de transporte neumático.

Con el fin de llevar a cabo la selección del tipo de tecnología que se requiere utilizar en la propuesta de automatización para la generación de vacío del sistema de transporte neumático, se plantean una serie de características que permiten la evaluación del desempeño de los elementos que se pueden usar para generar vacío en el sistema mencionado. Dichos elementos son bomba de vacío y blower los cuales constituyen los medios de generación de vacío de un sistema neumático existentes.

Elementos de suministro de vacío para las especificaciones de operación requeridas.

A partir de la información disponible respecto a la oferta actual de sistemas de vacío industriales en el mercado por parte de fabricantes nacionales e internacionales, se llevó a cabo la evaluación del desempeño de cada tipo de tecnología involucrada en las oportunidades de mejora propuestas, para la posterior selección de una maquina en particular, que cumpliera las especificaciones de operación calculadas en la sección 3.3.2, para el presente caso de estudio.

En primera instancia se lleva a cabo la búsqueda de información respecto a las tecnologías generadoras de vacío disponibles en el mercado para el sistema de líneas independientes (*ver Tabla 15*):

Tabla 15. Elementos de suministro de vacío para el sistema de líneas independientes.

Número	Tipo de tecnología	Referencia de la maquina	Fabricante
1	Bomba de vacío	R5 RA 0100f	BUSCH
2	Bomba de vacío	Mink MM 1102BV	BUSCH
3	Bomba de vacío	Mink MI 2122 BV	BUSCH
4	Bomba de vacío	Dolphin LX 0140 B	BUSCH
5	Blower	Samos SB 0140 DO	BUSCH
6	Bomba de vacío	EKL 0200	SAE
7	Bomba de vacío	Monoblock TRMB TRVB 40-110	SAE
8	Blower	EKZ 130-58	SAE
9	Blower	EKS 10	SAE

Fuente: tomada de [35] [36], junio del 2017.

Posteriormente se realizó la búsqueda de información de las tecnologías generadoras de vacío disponibles a nivel comercial, respecto al sistema de transporte centralizado (ver *Tabla 16*). Ya que las requerimientos de operación de ambos esquemas de mejora difieren en cuanto sus especificaciones de operación.

Tabla 16. Elementos de suministro de vacío para sistema centralizado.

Número	Tipo de tecnología	Referencia de la maquina	Fabricante
1	Bomba de vacío	Cobra NX 0450 A	BUSCH
2	Bomba de vacío	Huckepack HO 0437F	BUSCH
3	Blower	Samos SB 0530 DO	BUSCH
4	Bomba de vacío	EKL 500	SAE
5	Blower	EKZ 620-114	SAE
6	Blower	2BH1 800-7AH07	ELMO RIESCHLE
7	Bomba de vacío	C-VLR 401	ELMO RIESCHLE

Fuente: tomada de [35] [36][37], junio del 2017.

A partir de la verificación del rango de operación de cada máquina ver Anexo G, se asegura que dichas tecnologías generadoras de vacío cumplen con los requerimientos operativos planteados, de esta manera se concluye que todas las tecnologías evaluadas (ver *Tabla 15* y ver *Tabla 16*) cumplen con las restricciones funcionales. Posteriormente se llevará a cabo la selección de la tecnología que cumpla los requerimientos en mayor medida.

Comparación de las oportunidades de mejora a evaluar

Con el fin de seleccionar la oportunidad de mejora más idónea para el sistema de transporte neumático, se lleva a cabo la comparación de las tecnologías consideradas en cada esquema de mejora propuesto. Debido a que el parámetro principal que se debe tener en cuenta es el consumo energético, se evalúa la potencia nominal de cada una de las máquinas disponibles en el mercado, para cada tipo de sistema de transporte planteado en las oportunidades de mejora.

Para saber que esquema es más eficiente, se analiza previamente a la selección sus características operativas. Inicialmente se muestran dichas características para los elementos de vacío asociados al sistema de líneas independientes (*ver Tabla 17*):

Tabla 17. Especificaciones operativas para sistema de líneas independientes

Fabricante	Modelo	Tecnología	Nivel sonoro (dB(A))	Potencia nominal (Kw)
BUSH	R5 RA 0100f	Bomba de vacío	68	3.4
	Mink MM 1102BV	Bomba de vacío	79	3.4
	Mink MI 2122 BV	Bomba de vacío	84	6.8
	Dolphin LX 0140 B	Bomba de vacío	70	5.5
	Samos SB 0200 DO	Blower	70	1.5-2.1
SAE	EKL 0200	Bomba de vacío	68	3
	Monoblock TRMB TRVB 40-110	Bomba de vacío	68	4
	EKZ 130-58	Blower	60	1.5
	EKS 10	Blower	--	4

Fuente: tomada de [35][36], junio del 2017

Posteriormente se muestran dichas características para los elementos de vacío asociados al sistema centralizado (*ver Tabla 18*):

Tabla 18. Especificaciones operativas para sistema centralizado.

Fabricante	Modelo	Tecnología	Nivel sonoro (dB(A))	Potencia nominal (Kw)
BUSH	Cobra NX 0450 A	Bomba de vacío	70	9.5
	Hucke pack HO 0437 f	Bomba de vacío	73	15
	Samos SB 0530 DO	Blower	74	4.6-6.3

SAE	EKL 500	Bomba de vacío	77	8.6
	EKZ 620-114	Blower	76	17.3
ELMO RIESCHLE	2BH1 800-7AH07	Blower	74	7.6
	C-VLR 401	Bomba de vacío	81	9

Fuente: tomada de [35][36] [37], junio del 2017

Según las especificaciones operativas de las tecnologías de vacío, de cada oportunidad de mejora planteada (*ver Tabla 17 y ver Tabla 18*). Se aprecia que tanto el consumo energético como el nivel ruido de las máquinas asociadas al sistema de líneas independientes, son significativamente menor respecto al sistema centralizado. Por tanto se concluye que la oportunidad de mejora más eficiente para el problema abordado es la del sistema de líneas independientes, ya que es la solución que posee un mejor desempeño respecto a los requerimientos operativos mencionados.

3.3.4 Criterios para la comparación y selección de la tecnología generadora de vacío para sistema de transporte neumático:

A continuación se definen y describen dichas características que constituyen los criterios de evaluación de los medios de generación de vacío (*ver Tabla 19*), a partir de la información disponible de los distintos fabricantes y distribuidores de sistemas de vacío. Con el fin de realizar la distinción de cuál es la tecnología más adecuada para el requerimiento del caso de estudio, se plantean los siguientes criterios de selección.

Tabla 19. Criterios de evaluación para selección de la tecnología generadora de vacío.

CRITERIOS	
C.1	Eficiencia energética
C.2	Nivel de ruido
C.3	Necesidad de mantenimiento

Fuente: propia, junio del 2017.

Los criterios planteados previamente permiten evaluar el desempeño del elemento generador de vacío, para una posterior selección de la máquina más idónea en el funcionamiento del sistema neumático, a partir de los requerimientos solicitados por la empresa se define un umbral para cada criterio establecido. A continuación se describen dichos criterios:

C1: Se refiere a cuál de las tecnologías presenta un consumo menor a 5 Hp (3.7 kW).

C2: Indica que maquina genera un nivel de ruido menor a 65 dB.

C3: Hace referencia a cuál de las tecnologías es libre mantenimiento.

Definición del nivel de prioridad de los criterios

Con el fin de definir la relevancia de cada uno de los criterios anteriormente establecidos, se lleva a cabo la asignación de un nivel de prioridad para cada uno de ellos y de esta manera priorizar estos principios de selección.

Para la definición de dicho nivel de prioridad se llevó a cabo una evaluación conjunta de los criterios propuestos anteriormente, en la cual los desarrolladores del presente proyecto en conjunto con el ingeniero de planta de la empresa objeto del caso de estudio, asignaron de manera individual un porcentaje de relevancia a cada uno de los criterios a partir del conocimiento adquirido en la investigación realizada respecto a tecnologías para transporte neumático por vacío y la experiencia previa del ingeniero (*ver Tabla 20*).

Tabla 20. Asignación de nivel de prioridad de cada criterio de selección.

Criterios	Evaluador 1	Evaluador 2	Evaluador 3	Suma	Ponderado
C1. Eficiencia energética	50%	50 %	45%	145%	48.33%
C2. Nivel de ruido	35%	25%	30%	90%	30%
C3. Mantenimiento	15%	25%	25%	65%	21.66%
Total	100 %	100%	100%	300	100%

Fuente: propia, junio del 2017.

3.3.5 Evaluación de desempeño de las tecnologías de suministro de vacío

Ya que la oportunidad de mejora más eficiente es el sistema de transporte de líneas independientes, las maquinas relacionadas a este esquema , las cuales cumplen con los requerimientos de operación del sistema de transporte neumático en cuestión, difieren una de la otra respecto a sus parámetros funcionales (*ver Tabla 21*). Por lo tanto con el fin de realizar correctamente la selección de dicha maquina se analiza su desempeño respecto a los parámetros de interés, a partir de los criterios de selección previamente establecidos con su respectivo nivel de prioridad.

En la asignación de dicho nivel de prioridad se tiene en cuenta el porcentaje de cumplimiento de cada máquina respecto a los criterios mencionados, por esto se asigna un nivel de prioridad nulo a la máquina que no cumple con el requerimiento operativo y de igual forma se le asigna el nivel de relevancia inferido a aquella tecnología que cumple el criterio en su totalidad. Por otra parte existen casos en los que solo se cumple parcialmente el criterio, para estos se asigna un valor intermedio para el requerimiento en cuestión.

Tabla 21. Cumplimiento de criterios de las tecnologías generadoras de vacío evaluadas.

	C1	C2	C3	Total
Bomba de vacío de paletas rotativas R5 RA 0063/0100 F	48.33%	0%	10.83%	59.16%
Bomba de vacío con rotores de uña Mink MM 1102BV	48.33%	0%	21.66%	69.99%
Bomba de vacío con rotores de uña Mink MI 2122 BV	0%	0%	21.66%	21.66%
Bomba de vacío de anillo líquido Dolphin LX 0140 B	0%	0%	0%	0%
Blower de canal lateral Samos SB 0140 DO	48.33%	0%	21.66%	69.99%
Bomba de vacío de paletas lubricadas EKL 0200	48.33%	0%	0%	48.33%
Bomba de vacío de anillo líquido Monoblock TRMB TRVB 40-110	0%	0%	0%	0%
Blower regenerativo EKZ 130-58	48.33%	30%	0%	78.33%
Blower EKS 10	0%	0%	10.83%	10.83%

Fuente: propia, junio del 2017.

Por tanto esta selección se lleva a cabo a partir del porcentaje de cumplimiento de los criterios previamente establecidos, para finalmente seleccionar la tecnología que cumpla en mayor medida los requerimientos funcionales del sistema en cuestión. En este caso la máquina que cumple en mayor medida los criterios definidos es el **blower regenerativo EKZ 130-58 del distribuidor nacional SAE.**

3.3.6 Selección del elemento de vacío

Debido a que se requiere seleccionar el elemento que cumple en mayor medida los criterios de desempeño previamente planteados, así como las restricciones de operación del caso de estudio en cuestión. Se escoge la tecnología generadora de vacío que posee el menor consumo energético, el menor nivel de ruido y cuyas especificaciones de caudal y presión de vacío generadas se adecuen a los requerimientos operativos anteriormente calculados (*ver Figura 36*).

Figura 36. Elemento de vacío seleccionado.

BLOWER EKZ 130-58

Model: EKZ 130-58	Pressure: 400 (mbar) 5.8 (Psi)
Phase: Three	Weight: 18 (kg)
Power: 1.5 (kw)	Air Flow: 130 (m3/h)
Sound: 60 dB (A)	Vacuum: -260 (mbar)
Frequency: 60 (Hz)	Stage: Double
Voltage: 208-220V/440-460V	
Suction and discharge Ports: 1-1/4" NPT	



Fuente: tomada de [35], junio del 2017

Es por esto que dichas características son los elementos clave para la selección del **blower regenerativo EKZ 130-58 del distribuidor nacional SAE** (ver Figura 36), con un costo de \$ 2'593.800(19 Julio 2017), siendo este un criterio secundario que no restringe la escogencia de dicha máquina, por tanto la cotización se realiza posteriormente a la evaluación de su desempeño para finalmente concluir esta selección. Para mayor información de la cotización dirigirse al anexo digital L, Cotizacion_EL_cocinerito.

3.3.7 Listado de recursos técnicos

Para la implementación de la propuesta de mejoramiento planteada, se requiere un conjunto de dispositivos físicos asociados al esquema final de la mejora de automatización del sistema neumático de la empresa El Cocinerito, dichos recursos técnicos se listan a continuación (ver Tabla 22):

Tabla 22. Dispositivos físicos requeridos para la mejora de automatización del sistema neumático.

Elemento	Número de unidades	Función
Blower regenerativo EKZ 130-58	3	Crear un flujo de transporte, cuya presión es menor a la atmosférica, generando aspiración a través de una tubería de transporte de manera directa.
Filtro de aire	3	Es un dispositivo que se ubica a la entrada del Blower

		para evitar que lleguen partículas de polvo al rotor.
Válvula de alivio	3	Es un dispositivo que permite disminuir la presión en la línea neumática.
Vacuostato	3	Es un indicador que entrega una señal eléctrica proporcional al nivel de vacío en la línea neumática
Líneas de transporte (tubería)	3	Es una trayectoria cerrada, compuesta por tubos de acero inoxidable de 4.8 cm de diámetro para transportar material.
Tolva de almacenamiento	3	Es un dispositivo destinado al depósito de producto final, para su almacenamiento y posterior movilización.
Tolva de descarga	3	Es un dispositivo destinado al depósito de producto final, el cual a través de una compuerta mecánica descarga el material al área de empaclado.

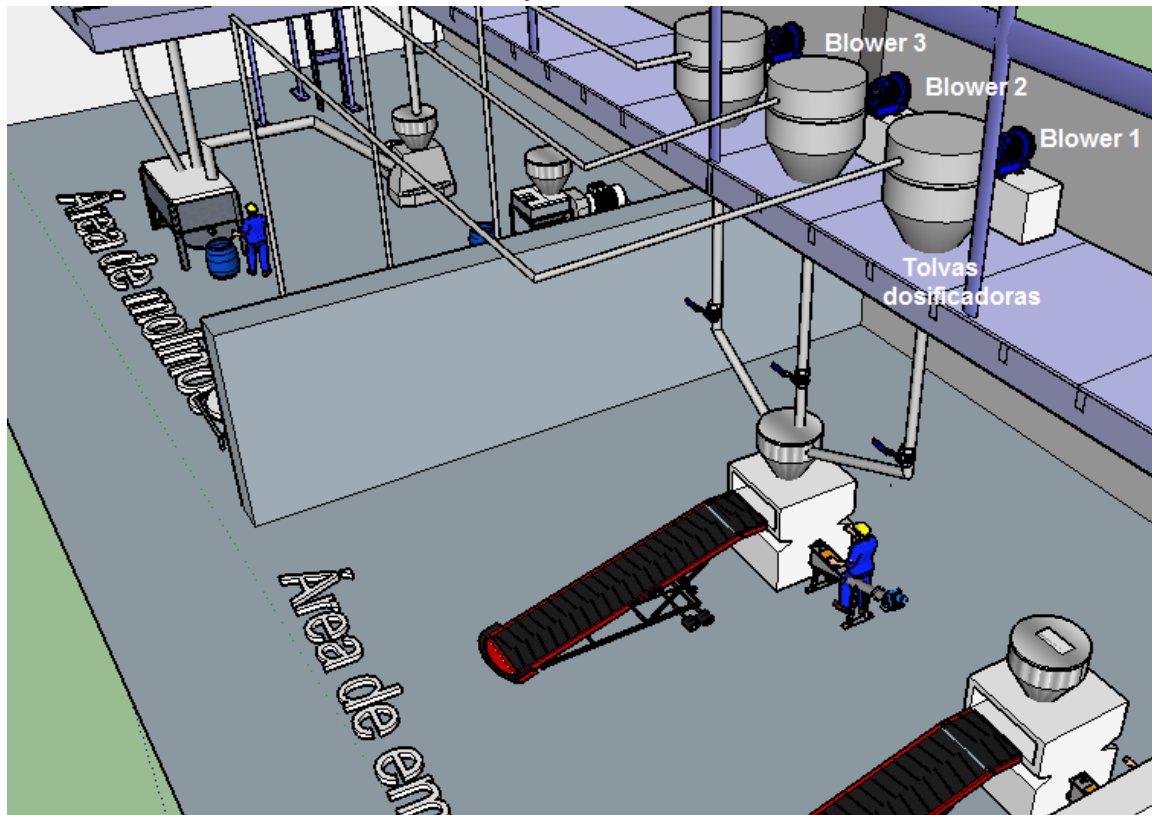
Fuente: propia, junio del 2017

Cabe resaltar que para la implementación de la mejora de automatización, se requiere la reutilización de ciertos equipos pertenecientes al sistema de transporte previo, tales como: las líneas de transporte neumático, las tolvas almacenamiento y las tolvas de descarga. Los elementos anteriormente listados constituyen la mejora de automatización del sistema de transporte neumático.

3.3.8 Esquema final de la mejora de automatización, del sistema de transporte neumático de la empresa El Cocinerito.

La propuesta de mejora planteada se adapta a las condiciones actuales del proceso, reutilizando la línea neumática previamente utilizada para el transporte de material. De esta manera se plantea el esquema final de dicha propuesta con la tecnología seleccionada (*ver Figura 37*).

Figura 37. Esquema del sistema de transporte neumático con la propuesta de mejoramiento.



Fuente: propia, junio del 2017.

Este esquema (ver Figura 37) establece la distribución física de los elementos del sistema del transporte neumático, teniendo en cuenta las modificaciones propuestas. Estas consisten en la definición de un nuevo elemento de suministro de vacío directo para cada una de las líneas de transporte existentes en el proceso y el cual no requiere presión positiva para generar vacío.

3.3.9 Estimación del consumo energético del proceso, con el sistema neumático mejorado

Para llevar a cabo, la estimación de la cantidad de energía que requiere la mejora propuesta, se hace uso de la ecuación (1). Teniendo en cuenta las especificaciones de operación del blower EKZ 130-58 suministradas por el fabricante en la ficha técnica (ver anexo digital L, cotización_EI_Cocinerito), se calcula el consumo energético asociado a la propuesta de mejoramiento planteada y posteriormente del proceso. El resultado de esta estimación es 3369.6 kWh y se desarrolla en la sección 4.3.3 del Anexo D.

3.4 Análisis del nuevo desempeño energético por simulación (PASO 4)

La especificación del nuevo desempeño energético del PROFASOI con la mejora propuesta, se realiza a partir de la información obtenida en la simulación del proceso con las modificaciones planteadas en la propuesta de eficiencia energética. Este análisis se realiza teniendo en cuenta los indicadores de consumo energético establecidos en el PASO 2, los cuales permiten cuantificar la energía consumida respecto a las variables de interés.

IE1 (Cantidad de energía / Unidades producidas): Es la razón entre la cantidad de energía utilizada en la fabricación un producto, respecto al número de unidades producidas del mismo, obteniendo así la cantidad de energía para la producción de una unidad.

$$IE1 = \text{Cantidad de energía} / \text{Unidades producidas}$$

$$IE1 = 127.35 \text{ kWh} / 12500 \text{ unidades equivalente a } 0.01 \text{ kWh} / \text{unidades}$$

IE 2 (Cantidad de energía / Cantidad de material transportado): indica la relación, entre la cantidad de energía que requiere el sistema de transporte neumático, para movilizar 1 batch de producto específico, respecto a la cantidad de material que se transporta en dicho lote.

$$IE2 = \text{Cantidad de material transportado} / \text{Cantidad de energía}$$

$$IE2 = 0.63 \text{ kWh} / 150 \text{ kg equivalente a } 0.0042 \text{ kWh} / \text{kg}$$

El análisis de estos indicadores se lleva a cabo en la sección 4.2.2 del capítulo 4, donde se especifica el nuevo consumo de energía del proceso incluyendo la propuesta de mejoramiento, a partir de valores cuantificables obtenidos en la simulación. Esto constituye el análisis del nuevo desempeño energético por simulación del PROFASOI.

3.5 Análisis del costo beneficio (paso 5)

En esta sección se definen los costos que implica la implementación de la mejora planteada, al igual que el ahorro potencial que se puede obtener. De esta manera se estudia la factibilidad de la medida propuesta y el tiempo de recuperación de la inversión [2].

3.5.1 Ahorro potencial de energía

Teniendo en cuenta la información obtenida en la simulación, respecto a la sección 4.3 del capítulo 4, se establece la cantidad de energía que se ahorra en comparación al sistema previo (ver Tabla 23).

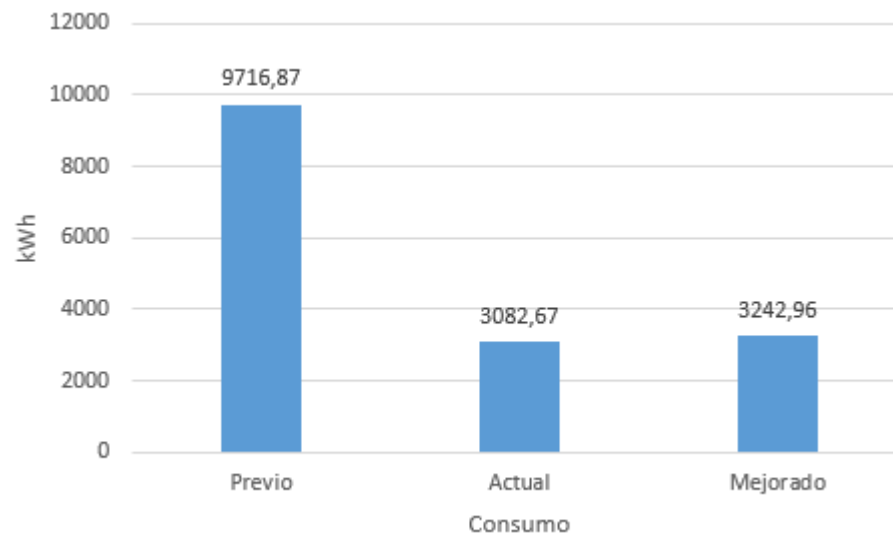
Tabla 23. Comparación del consumo energético del proceso con sistema neumático previo y mejorado.

Consumo del proceso con sistema previo (kWh)	Consumo del proceso con sistema mejorado(kWh)	Ahorro potencial (kWh)	Ahorro (COP)
Mensual			
9320.51	3242.96	6077.55	2'532.989.134
Anual			
111846.12	38915.52	72930.6	30'395.869.61

Fuente: propia, julio del 2017

Teniendo en cuenta la comparación del consumo energético del sistema previo y mejorado, se observa que existe una reducción de la cantidad de energía utilizada por el sistema de transporte neumático, lo que indica que la propuesta de mejoramiento planteada permite aumentar la eficiencia energética de dicho sistema.

Figura 38. Comparación del consumo energético del proceso previo, actual y mejorado.



Fuente: propia, julio del 2017

Por otra parte, a partir de lo mostrado en la gráfica anterior (*ver Figura 38*), se observa que el consumo energético del proceso con el sistema neumático mejorado es considerablemente menor respecto al consumo del proceso con el sistema neumático previamente implementado. Sin embargo existe un aumento de la cantidad de energía eléctrica utilizada respecto al proceso sin sistema neumático como se encuentra actualmente, ya que el uso de una nueva tecnología implica un consumo adicional, pero de igual manera el uso de dicha tecnología conlleva múltiples beneficios en la ejecución de las operaciones del área productiva.

3.5.2 Beneficios del sistema

El sistema neumático mejorado además de aumentar la eficiencia de energía respecto al sistema previo, permite aumentar la eficiencia en la ejecución de las fases correspondientes a la operación de transporte de material que se realiza del área de molinos al área de empaquetado, que actualmente se realiza de manera manual, obteniendo los siguientes beneficios en cuanto a calidad del producto y aprovechamiento del recurso humano:

- Reduce el contacto con el producto terminado, mejorando la calidad y las condiciones del mismo, permitiendo cumplir en mayor medida la normatividad respecto a la manipulación de materiales, evitando sanciones de entes regulatorios.
- Reduce el esfuerzo físico de los operarios que ejecutan la etapa de empaquetado, ya que se requiere transportar de manera manual grandes cantidades de producto, lo que genera detrimento a la integridad física del personal.
- Permite ejecutar de manera más idónea y con menor dificultad la dosificación del material para empaquetado, reduciendo también las pérdidas de producto a empaquetar.
- Disminuye los tiempos de transporte de materiales entre áreas del proceso.

CAPÍTULO 4

Simulación del PROFASOI en SuperPro Designer

En el presente capítulo, se efectúa la simulación de la secuencia de todo el proceso productivo de la empresa El Cocinerito, haciendo uso de la herramienta computacional SuperPro Designer, al igual que la información de los modelos, tablas y datos obtenidos durante la aplicación del estándar ISA S.88.01.

El desarrollo de la validación de la propuesta de eficiencia energética del sistema de transporte neumático, está constituida por dos elementos principales, primeramente los requerimientos de simulación, en los cuales se definen las especificaciones del proceso y por otra parte el análisis del consumo energético del PROFASOI con el sistema de transporte neumático previo y con la propuesta de mejoramiento.

4.1 Requerimientos de simulación

Para ejecutar la simulación, se establecen condiciones de operación y parámetros específicos que provienen de los modelos del estándar ISA S-88.01, abordados en detalle en la *sección 1.4 del capítulo 1*. Por tanto, los requerimientos se agrupan de la siguiente manera: primeramente los del proceso, que corresponden a las cantidades de materia prima y productos intermedios, al igual que los tiempos de ejecución de cada una de las fases del proceso. Por otra parte se encuentran los requerimientos de equipos, que corresponden a las unidades físicas y dispositivos utilizados en la ejecución del proceso, tanto del sistema previo como del sistema con mejora.

4.1.1 Requerimientos de Proceso

Cantidades de material en las etapas de PROFASOI

A partir de la información planteada en la *sección 1.3.2 del capítulo 1 (ver Tabla 1)* y teniendo en cuenta que la cantidad de material manejada en todo el proceso es la misma, se definen los requerimientos de proceso considerados en la simulación, respecto a las etapas que componen el proceso y sus proporciones de material (*ver Tabla 24*).

Tabla 24. Proporciones de entradas y salidas de PROFASOI.

ENTRADA	Cantidad (kg)	ETAPA	SALIDA	Cantidad (kg)
Materia prima	150	OBTENCIÓN DE MATERIAL TRITURADO	Material triturado	150
Material triturado	150	HOMOGENEIZADO DE MATERIAL TRITURADO	Material triturado homogeneizado	150
Material triturado homogeneizado	150	OBTENCIÓN DE POLVO	Polvo	150
Polvo	150	VENTILADO DE POLVO	Polvo ventilado	150
Polvo ventilado	150	EMPACADO DE POLVO	Producto final	150

Fuente: propia, julio del 2017.

Tiempos de ejecución de las fases de PROFASOI

Los equipos del proceso poseen un rango de funcionamiento según el tipo de producto que se requiere elaborar, el cual se define en el modelo de control procedimental (*ver Tabla 4*). Teniendo en cuenta esto, el tiempo de ejecución de cada fase de la simulación, es el valor máximo del rango de funcionamiento mencionado. De igual manera para establecer el tiempo total de simulación de 1 batch, se suman los tiempos parciales de cada fase (*ver Tabla 25*).

Sin embargo hay que tener en cuenta que las fases de ingresar materia prima y aditivos, descargar materia prima y aditivos, triturar materia prima y aditivos y separar material triturado se ejecutan de manera paralela, por esta razón, para la definición del tiempo total de simulación, se toma el tiempo de la fase de mayor duración. De igual forma, el empacado 1 y 2 se realizan simultáneamente, por lo que se tiene en cuenta el empacado que posee un mayor tiempo.

Tabla 25. Tiempos de duración de cada fase de PROFASOI.

Fases	Tiempo (minuto)	Tiempo (hora)
Ingresar materia prima y aditivos	28	0.47
Descargar materia prima y aditivos	31	0.52
Triturar materia prima y aditivos	30	0.5
Separar material triturado	31	0.52
Mezclar material triturado	8	0.13
Transportar material triturado	2	0.03
Moler material triturado	35	0.58
Transportar polvo	5	0.08

Mezclar polvo	15	0.25
Ingresar polvo ventilado 1	1	0.02
Ingresar polvo ventilado 2		
Ingresar polvo ventilado 3		
Transportar polvo ventilado 1	25	0.42
Transportar polvo ventilado 2		
Transportar polvo ventilado 3		
Ingresar polvo ventilado 1	1	0.02
Ingresar polvo ventilado 2		
Ingresar polvo ventilado 3		
Descargar polvo ventilado 1	1	0.02
Descargar polvo ventilado 2		
Descargar polvo ventilado 3		
Habilitar línea 1		
Habilitar línea 2		
Habilitar línea 3		
Empacado 1	56	0.93
Empacado 2	21	0.35
Total	180	3

Fuente: Propia Agosto 2017.

Por otra parte, se considera que las fases involucradas en la secuencia del proceso con el sistema mejorado, son las mismas definidas anteriormente y requieren un tiempo igual para su ejecución. Por tanto los tiempos definidos para la simulación del proceso con la propuesta de mejoramiento son iguales.

4.1.2 Requerimientos de Equipos

- **Equipos utilizados en el proceso con sistema neumático previo**

Para el planteamiento, de la secuencia del proceso productivo a nivel de simulación, se requiere definir los distintos dispositivos físicos involucrados en este. Dicha definición, se hace a partir de las etapas establecidas en el diagrama de flujo del proceso (ver Figura 23), respecto al sistema neumático previamente implementado (ver Tabla 26).

Tabla 26. Equipos del proceso con sistema neumático previo.

Etapas	Equipos
Obtención de material triturado	Tolva dosificadora 1
	Molino de martillos
Homogeneizado de material triturado	Ciclón
	Agitador Ribbon Blender 1
Obtención de polvo	Molino de discos
Ventilado de polvo	Agitador Ribbon Blender 2
	Tolva almacenamiento 1

Transporte	Tolva almacenamiento 2
	Tolva almacenamiento 3
	Compresor tornillo
Empacado	Tolva descarga 1
	Tolva descarga 2
	Tolva descarga 3
	Válvula mariposa 1
	Válvula mariposa 2
	Válvula mariposa 3
	Empaquetadora LAP para solidos impalpables
Empaquetadora PULTAMA para granos	

Fuente: Propia Agosto 2017.

- **Equipos utilizados en el proceso con propuesta de mejoramiento**

Para establecer la simulación de la secuencia del proceso con la propuesta de mejoramiento, se especifican los dispositivos físicos, respecto al proceso y en particular a dicha propuesta. Teniendo en cuenta, que las etapas asociadas al proceso productivo son las mismas anteriormente definidas y los equipos para la ejecución del transporte de productos al área de empaçado poseen nuevas características (*ver Tabla 27*).

Tabla 27. Equipos del proceso sistema neumático mejorado.

Etapas	Equipos
Obtención de material triturado	Tolva dosificadora 1
	Molino de martillos
Homogeneizado de material triturado	Ciclón
	Agitador Ribbon Blender 1
Obtención de polvo	Molino de discos
Ventilado de polvo	Agitador Ribbon Blender 2
Transporte	Tolva almacenamiento 1
	Tolva almacenamiento 2
	Tolva almacenamiento 3
	Blower 1
	Blower 2
	Blower 3
Empacado	Tolva descarga 1
	Tolva descarga 2
	Tolva descarga 3
	Válvula mariposa 1
	Válvula mariposa 2
	Válvula mariposa 3
	Empaquetadora LAP para solidos impalpables
Empaquetadora PULTAMA para granos	

Fuente: propia, julio del 2017.

Los elementos físicos anteriormente listados, los cuales constituyen la secuencia del proceso con el sistema neumático previo (*ver Tabla 26*) y con la propuesta de mejoramiento (*ver Tabla 27*), difieren uno del otro, respecto a los equipos asociados a la etapa de transporte. Ya que, en el primer caso se usa un equipo centralizado y en el segundo caso se requieren 3 equipos independientes.

4.2 Simulación de PROFASOI

Para el planteamiento estructurado de las secuencias simulación para un batch de producto (150 Kg), se hace uso de los modelos del estándar ISA S-88.01 planteados para PROFASOI, para esto es necesario reconocer la terminología y conceptos que maneja la herramienta computacional. El software SuperPro Designer, define una “sección” como un conjunto de “procedimientos de unidad”, que se agrupan en operaciones unitarias, las cuales corresponden a la tarea más básica que se ejecuta en un equipo. De acuerdo a lo anterior se realiza una comparación de la terminología de los modelos ISA respecto a los conceptos de la herramienta (*ver Tabla 28*).

Tabla 28. Relación entre modelos ISA S-88.01 y SuperPro Designer.

SuperPro Designer	ISA-S88.01 Modelo de proceso	ISA-S88.01 Modelo de control procedimental
Documento de simulación	Proceso	Procedimiento
Sección	Etapa de proceso	Procedimiento de unidad
Procedimiento de unidad	Operación de proceso	Operación
Operación unitaria	Acción de proceso	Fase

Fuente: propia, julio del 2017.

El proceso de configuración, de las potencias nominales de los equipos y sus tiempos de operación, se especifica en el anexo G.

Consideraciones específicas

Se debe resaltar, que es una restricción de la herramienta computacional que exista un flujo ininterrumpido a lo largo de la secuencia del proceso, por tanto la dosificación manual de las tolvas de almacenamiento en el área de molinos, desde donde se realiza el transporte neumático, se representa en la simulación con un demultiplexor cuyas salidas corresponden a uno o múltiples productos.

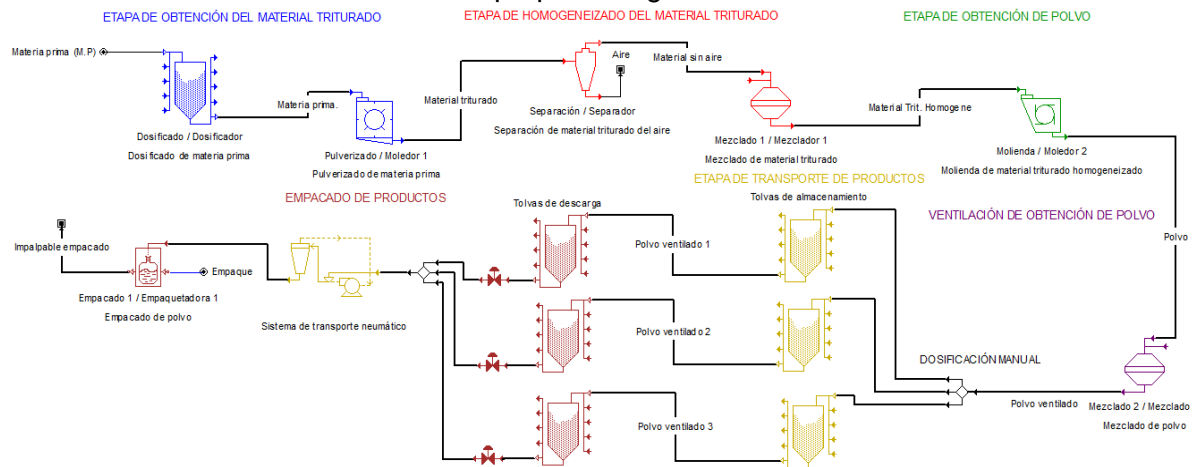
Para el planteamiento de ambos esquemas de simulación, se debe tener en cuenta que al final de la etapa de ventilación de polvo, se preserva el producto en tolvas de almacenamiento, para su posterior transporte a la etapa de empaclado. Sin embargo, a pesar de que se puede realizar el transporte neumático de diferentes

productos de manera simultánea, solo se empaquetar el producto de la línea de transporte que se encuentra habilitada por su respectiva válvula.

4.2.1 Simulación de PROFASOI con sistema neumático previo

Luego de establecer los requerimientos de la simulación, se procede a plantear la secuencia del proceso con el sistema neumático previo, para esto, se plasmaron las 5 etapas del modelo de proceso, las cuales corresponden a las secciones de la simulación (ver Figura 39). En este esquema se hace uso de un sistema de transporte neumático centralizado, para la movilización del producto desde el área de molinos al área de empaçado.

Figura 39. Secuencia del PROFASOI con sistema neumático previo, simulado en Superpro Designer.



Fuente: propia, julio del 2017.

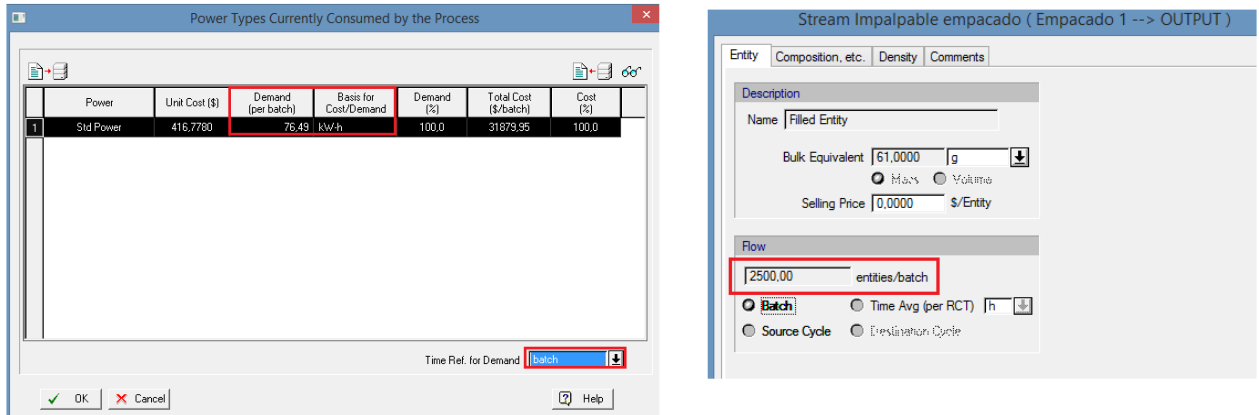
Cuantificación de indicadores de consumo para PROFASOI, con sistema neumático previo

A partir de la secuencia del proceso planteada y los datos obtenidos respecto a la simulación con el sistema neumático previo, se procede a establecer los indicadores de consumo de energía asociados a PROFASOI, a partir de los cuales se lleva a cabo el análisis del desempeño energético del proceso.

- **Definición del indicador IE1 a partir de la información obtenida en la simulación**

El planteamiento de este indicador de desempeño, el cual muestra la relación entre la cantidad de energía requerida para realizar la producción de un día y el número de unidades producidas (ver Figura 40).

Figura 40. Cantidad de energía vs Unidades producidas por batch



Fuente: propia, julio del 2017.

Debido a que, el valor entregado por la simulación se asocia a la producción de un batch y el indicador establecido requiere los datos para un día en el cual se elaboran 5 batches, se multiplica el valor de la simulación por el número de batches al día.

$$\text{Unidades producidas} = 2500 \frac{\text{unidades}}{\text{batch}} \times 5 \frac{\text{batch}}{\text{día}} = 12500 \frac{\text{unidades}}{\text{día}}$$

$$\text{Cantidad de energía} = 76.49 \frac{\text{kWh}}{\text{batch}} \times 5 \frac{\text{batch}}{\text{día}} = 382.45 \frac{\text{kWh}}{\text{día}}$$

$$IE1 = \frac{\text{Cantidad de energía}}{\text{Unidades producidas}}$$

$$IE1 = \frac{382.45 \text{ kWh}}{12500 \text{ unidades}} = 0.03 \frac{\text{kWh}}{\text{Unidades}}$$

- **Definición del indicador IE2 a partir de la información obtenida en la simulación**

El planteamiento de este indicador de desempeño, el cual muestra la relación entre la cantidad de energía utilizada por el sistema neumático para transportar 1 batch de producto y la cantidad de material movilizado en dicho transporte, se hace a partir de los datos obtenidos en la simulación (ver Figura 41).

Figura 41. Cantidad de material transportado vs energía consumida por batch

Power Type	End (h)	Cons. Time per Batch (h)	Power (kW)	Amount kWh/batch	Usage (%)
Std Power	3.00	3.00	(25.50)	76.49	
Main Section	3.00	3.00	(25.50)	76.49	100.0
Pulverizado	0.52	0.52	(8.88)	4.62	6.0
Transporte	2.60	2.60	(22.37)	58.16	76.0
TRANSPORTAR POLVO VEN...	2.60	2.60	22.37	58.16	76.0
Mezclado 1	0.65	0.13	(1.00)	0.13	0.2
Molenda	1.27	0.59	(13.25)	7.82	10.2
Mezclado 2	1.60	0.25	(2.68)	0.67	0.9
Empacado 1	3.00	0.93	(5.47)	5.09	6.7

Component	Flowrate (kg/batch)	Mass Comp. (%)	Concentration (g/L)	Extra-Cell (%)
1 MATERIA PRIMA	150.00000	100.0000	994.194025	100.00

Fuente: propia, julio del 2017.

Teniendo en cuenta los resultados suministrados por el software, se especifica el indicador IE2 para los distintos casos que se pueden presentar en el sistema de transporte neumático. Dichos casos se definen teniendo en cuenta el número de líneas neumáticas en funcionamiento, lo cual implica que las cantidades de producto transportados varían según las líneas habilitadas, sin embargo el consumo energético asociado al sistema de transporte previo (*ver Figura 39*), es el mismo para los 3 casos, ya que sin importar el número de líneas de transporte habilitadas, la máquina asociada al sistema neumático siempre funciona a plena carga:

- **Para una línea de transporte:** en este caso solo se transporta material, a través de una sola línea neumática, lo que implica que se moviliza un solo batch de producto en el sistema.

$$IE2 = \frac{\text{Cantidad de energía}}{\text{Cantidad de material transportado}}$$

$$\text{Cantidad de energía} = 58.16 \text{ kWh}$$

$$\text{Cantidad de material transportado} = 150 \text{ Kg}$$

$$IE2 = \frac{58.16 \text{ kWh}}{150 \text{ Kg}} = 0.39 \text{ kWh/Kg}$$

- **Para dos líneas de transporte:** en este caso se transporta material, a través de dos líneas neumáticas, lo que implica que se movilizan dos batches, de uno o múltiples productos en el sistema.

$$IE2 = \frac{\text{Cantidad de energía}}{\text{Cantidad de material transportado}}$$

$$\text{Cantidad de energía} = 58.16 \text{ kWh}$$

$$\text{Cantidad de material transportado} = 300 \text{ Kg}$$

$$IE2 = \frac{58.16 \text{ kWh}}{300 \text{ Kg}} = 0.19 \text{ kWh/Kg}$$

- **Para tres líneas de transporte:** para este caso, se transporta material a través de tres líneas neumáticas de manera simultánea, lo que implica que se movilizan tres batches de uno o varios productos.

$$IE2 = \frac{\text{Cantidad de energía}}{\text{Cantidad de material transportado}}$$

$$\text{Cantidad de energía} = 58.16 \text{ kWh}$$

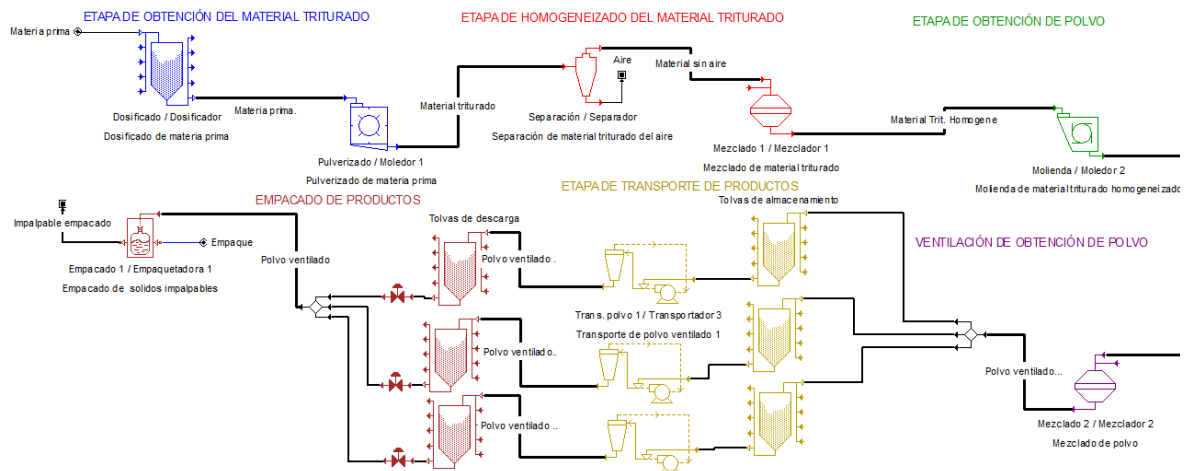
$$\text{Cantidad de material transportado} = 450 \text{ Kg}$$

$$IE2 = \frac{58.16 \text{ kWh}}{450 \text{ Kg}} = 0.13 \text{ kWh/Kg}$$

4.2.2 Simulación de PROFASOI con propuesta de mejoramiento del sistema neumático

Teniendo en cuenta los requerimientos de la simulación anteriormente definidos, se procede a plantear la secuencia del proceso con la propuesta de mejoramiento del sistema neumático, para esto se plasmaron las 5 etapas del modelo de proceso, las cuales corresponden a las secciones de la simulación. En este esquema se hace uso de un sistema de transporte neumático de líneas independientes (*ver Figura 42*), para la movilización del producto desde el área de molinos al área de empaclado.

Figura 42. Secuencia del PROFASOI con sistema neumático mejorado, simulado en Superpro.



Fuente: propia, julio del 2017.

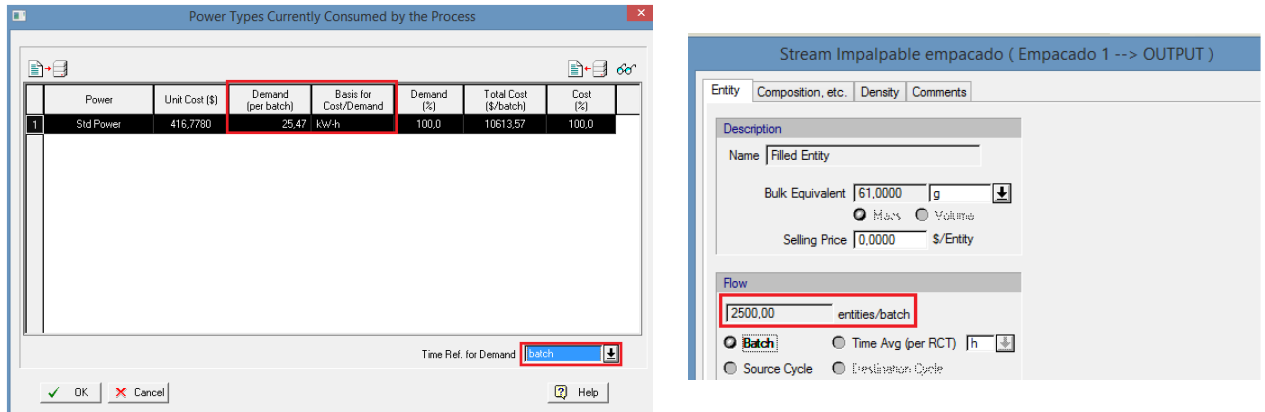
Cuantificación de indicadores de consumo para PROFASOI, con sistema neumático mejorado.

A partir de la secuencia del proceso planteada y los datos obtenidos respecto a la simulación con la propuesta de mejora del sistema neumático, se procede a establecer los indicadores de consumo de energía asociados al desempeño energético de PROFASOI, a partir de los cuales se lleva a cabo el análisis del nuevo desempeño energético del proceso.

- **Definición del indicador IE1 a partir de la información obtenida en la simulación**

El planteamiento de este indicador de desempeño, el cual muestra la relación entre la cantidad de energía requerida para realizar la producción de un día y el número de unidades producidas, se hace a partir de los datos obtenidos en la simulación (ver Figura 43).

Figura 43. Unidades producidas vs cantidad de energía por batch



Fuente: propia, julio del 2017.

Teniendo en cuenta la información suministrada por la herramienta computacional respecto al número de unidades producidas y la cantidad de energía requerida en su elaboración, se plantea el indicador de consumo IE1, a continuación:

$$\textit{Unidades producidas} = 2500 \frac{\textit{unidades}}{\textit{batch}} \times 5 \frac{\textit{batch}}{\textit{día}} = 12500 \frac{\textit{unidades}}{\textit{día}}$$

$$\textit{Cantidad de energía} = 25.47 \frac{\textit{kWh}}{\textit{batch}} \times 5 \frac{\textit{batch}}{\textit{día}} = 127.35 \frac{\textit{kWh}}{\textit{día}}$$

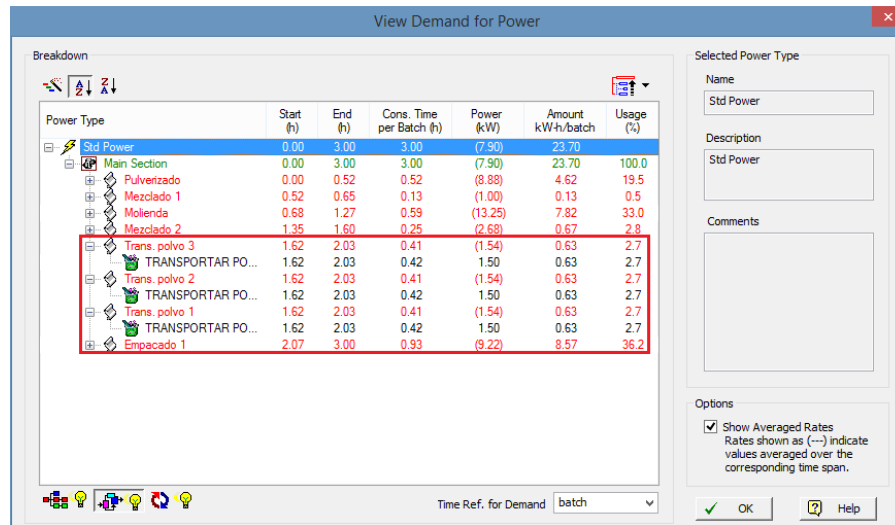
$$\textit{IE1} = \frac{\textit{Cantidad de energía}}{\textit{Unidades producidas}}$$

$$\textit{IE1} = \frac{127.35 \textit{kWh}}{12500 \textit{unidades}} = 0.01 \frac{\textit{kWh}}{\textit{unidades}}$$

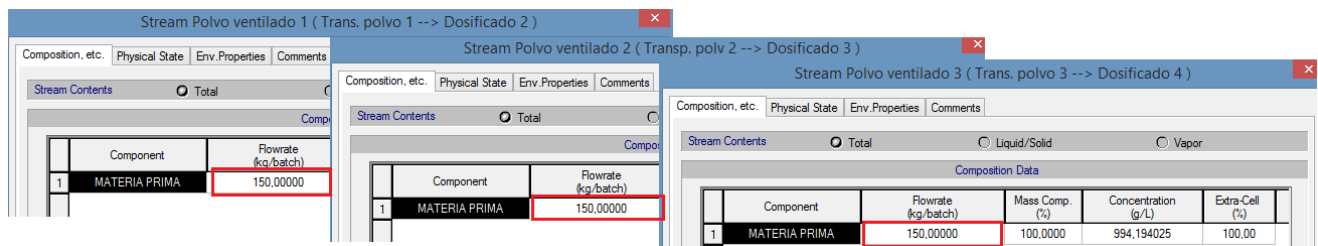
Definición del indicador IE2 a partir de la información obtenida en la simulación

El planteamiento de este indicador de desempeño, el cual muestra la relación entre la cantidad de energía utilizada por el sistema neumático para transportar 1 batch de producto y la cantidad de material movilizado en dicho transporte, se hace a partir de los datos obtenidos en la simulación (ver Figura 44).

Figura 44. Cantidad de energía consumida vs Cantidad de material transportado por batch .



a) consumo energetico asociado a cada linea.



b) cantidades de producto por línea.

Fuente: propia, julio del 2017.

Teniendo en cuenta los resultados suministrados por el software, se especifica el indicador IE2 para los distintos casos que se pueden presentar en el sistema de transporte neumático con mejora. Dichos casos se definen teniendo en cuenta el número de líneas neumáticas en funcionamiento, lo cual implica que las cantidades de producto transportados varían según las líneas habilitadas (ver Figura 44.a), sin embargo el consumo energético asociado al sistema de transporte mejorado (ver Figura 44.b), es la suma de los consumos parciales de las máquinas que estén en funcionamiento.

- **Para una línea de transporte:** en este caso solo se transporta material, a través de una sola línea neumática, lo que implica que se moviliza un solo batch de producto en el sistema.

$$IE2 = \frac{\text{Cantidad de energía}}{\text{Cantidad de material transportado}}$$

$$\text{Cantidad de energía} = 0.63kWh$$

$$\text{Cantidad de material transportado} = 150 Kg$$

$$IE2 = \frac{0.63 kWh}{150 Kg} = 0.0042 kWh/Kg$$

- **Para dos líneas de transporte:** en este caso se transporta material, a través de dos líneas neumáticas, lo que implica que se movilizan dos batches, de uno o múltiples productos en el sistema.

$$IE2 = \frac{\text{Cantidad de energía}}{\text{Cantidad de material transportado}}$$

$$\text{Cantidad de energía} = 0.63kWh$$

$$\text{Cantidad de material transportado} = 150 Kg$$

$$IE2 = \frac{1.26 kWh}{300 Kg} = 0.0042 kWh/Kg$$

- **Para tres líneas de transporte:** para este caso, se transporta material a través de tres líneas neumáticas de manera simultánea, lo que implica que se movilizan tres batches de uno o varios productos.

$$IE2 = \frac{\text{Cantidad de energía}}{\text{Cantidad de material transportado}}$$

$$\text{Cantidad de energía} = 0.63kWh$$

$$\text{Cantidad de material transportado} = 150 Kg$$

$$IE2 = \frac{1.89 kWh}{450 Kg} = 0.0042 kWh/Kg$$

4.3 Validación de la propuesta de eficiencia energética del sistema de transporte neumático.

En esta sección, se realiza la validación de la propuesta de eficiencia energética, la cual se divide en dos partes. Inicialmente se pretende demostrar por medio de la herramienta computacional Superpro Designer, que la estimación del consumo energético del sistema neumático previo (*ver Tabla 6*) y del sistema neumático mejorado en la *sección 3.3.9 del capítulo 3*, es válida. Esto se hace partir de la comparación de los valores de consumo de energía cuantificados matemáticamente y los estimados por la herramienta computacional, permitiendo así, verificar el nivel de exactitud de la información suministrada por el software.

Posteriormente se analiza el desempeño energético del sistema neumático mejorado respecto al sistema neumático previo, este análisis se hace a partir de la información brindada por SuperoPro Designer.

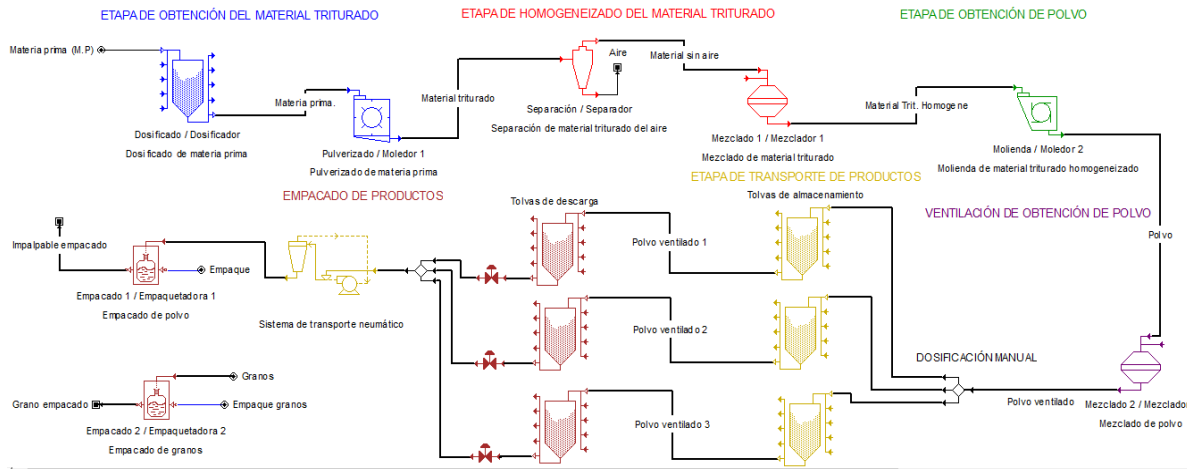
4.3.1 Análisis del consumo energético del proceso estimado, respecto al consumo energético obtenido por simulación.

El análisis del consumo energético del proceso, se hace a partir de la simulación de todos los equipos involucrados en la secuencia productiva y la cuantificación del consumo energético mensual, que suministra la herramienta computacional.

Consumo energético del proceso con sistema neumático previo, obtenido mediante SuperPro Designer.

La simulación de la secuencia del proceso productivo con el sistema neumático previo (*ver Figura 45*), permite obtener la información del consumo energético, anteriormente asociado al área productiva de la empresa.

Figura 45. Secuencia del proceso de la empresa El Cocinerito con sistema neumático previo, simulado en Superpro.



Fuente: propia, julio del 2017.

A partir del esquema anterior, se obtiene mediante el software el valor del consumo por kW-h en un mes (ver Figura 46). La configuración del período de tiempo del consumo energético, se plantea en el Anexo G.

Figura 46. Estimación de consumo energético mensual mediante SuperPro Designer con sistema neumático previo.

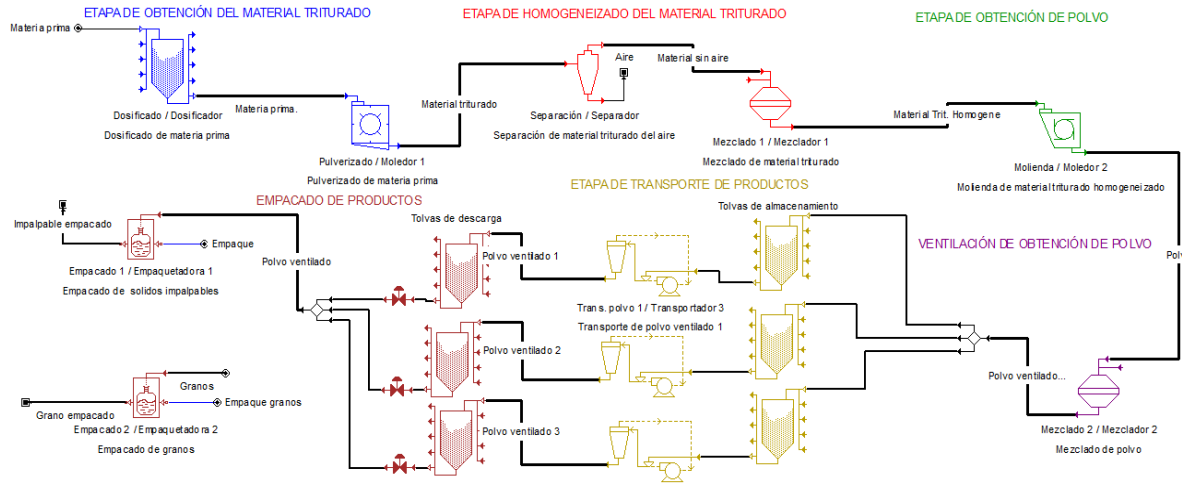
Power	Unit Cost (\$)	Demand (per campaign)	Basis for Cost/Demand	Demand (%)	Total Cost (\$/campaign)	Cost (%)
1 Std Power	416.7780	9320.51	kW-h	100.0	3884584.35	100.0

Fuente: propia, julio del 2017.

Consumo energético del proceso con sistema neumático mejorado, obtenido mediante SuperPro Designer.

Se realiza la simulación de la secuencia del proceso productivo con el sistema neumático mejorado (ver Figura 47), a partir de la cual se obtiene la información del nuevo consumo energético, asociado al área productiva de la empresa.

Figura 47. Secuencia del proceso de la empresa El Cocinerito con sistema neumático mejorado, simulado en Superpro. Designer.



Fuente: propia, julio del 2017.

A partir del esquema anterior, se estima mediante el software el valor del consumo energético en un mes (ver Figura 48).

Figura 48. Estimación de consumo energético mensual mediante SuperPro Designer del proceso con sistema neumático mejorado.

Power	Unit Cost (\$)	Demand (per campaign)	Basis for Cost/Demand	Demand (%)	Total Cost (\$/campaign)	Cost (%)
1 Std Power	416.7780	3242.96	kWh	100.0	1351592.93	100.0

Time Ref. for Demand: campaign

Fuente: propia, julio del 2017.

Comparación del consumo energético del proceso estimado, respecto al consumo energético obtenido por simulación.

Teniendo en cuenta los valores de consumo de energía del proceso con el sistema neumático previo y mejorado, se procede a llevar a cabo la comparación de los valores de consumo de energía cuantificados matemáticamente y los estimados por la herramienta computacional (ver Tabla 29), permitiendo así, verificar el nivel de

exactitud de la información suministrada por el software. Por otra parte, se calcula el error relativo, entre los valores de consumo estimados analíticamente y los datos suministrados por la herramienta computacional, para cuantificar el grado de aproximación de dicha información.

Tabla 29. Comparación de consumos estimados analíticamente vs consumos estimados por SuperPro Designer del sistema previo y mejorado.

Tipo de sistema	Consumo Estimado (kWh)	SuperPro Designer (kWh)	Error relativo (%)
Previo	9716.4	9320.51	4.07
Con mejora	3369.6	3242.96	3.74

Fuente: propia, julio del 2017.

Se aprecia que existe una pequeña diferencia entre los datos cuantificados matemáticamente y los valores suministrados por SuperPro Designer, dicha diferencia se ve reflejada en el porcentaje de error de cada tipo de sistema, siendo menor al 5% en ambos casos. Esta diferencia se debe a que los datos obtenidos analíticamente se hacen a partir de todas las características nominales de las máquinas del proceso y la estimación computacional tiene en cuenta solo la potencia nominal y el tiempo de funcionamiento.

De esta manera, se concluye que la información proporcionada por el software es confiable, por tanto, se procede a analizar el desempeño energético del sistema de transporte neumático, haciendo uso de esta herramienta computacional.

4.3.2 Comparación del desempeño energético del sistema neumático previo y con propuesta de mejoramiento.

Con el fin de realizar la validación de la propuesta de eficiencia energética del sistema de transporte neumático de la empresa El Cocinerito, se lleva a cabo la comparación del desempeño energético del sistema neumático previamente implementado y el con la propuesta de mejoramiento, a partir de la cual se pretende corroborar que el consumo energético del sistema mencionado, disminuye en relación al esquema anteriormente implementado. De igual forma, cabe resaltar que el sistema de transporte neumático, permite la conmutación de las distintas líneas de transporte que lo componen, a partir de la activación del blower asociado a cada línea.

Análisis indicador IE1 del sistema de transporte neumático con mejora y sin mejora.

El indicador IE1 permite analizar el desempeño energético del proceso productivo, en relación a la cantidad de energía eléctrica que requiere para fabricar una cantidad específica de material. A continuación, se muestra el valor del indicador asociado a cada esquema del sistema del sistema de transporte neumático (ver *Tabla 30*).

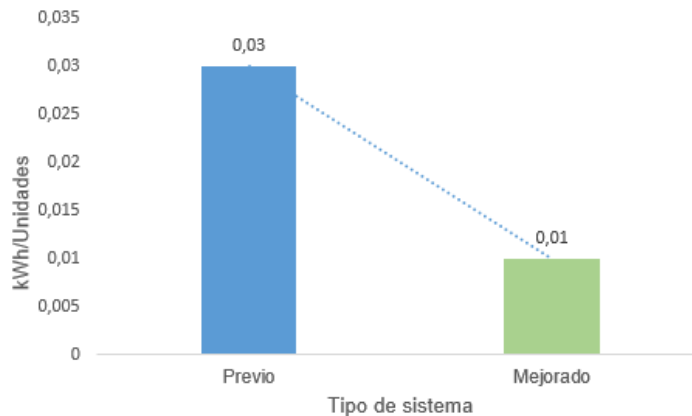
Tabla 30. Comparación del indicador IE1.

Indicador IE1	Unidad de medida	Sistema neumático previo	Sistema neumático mejorado
Producción vs consume energético	$\frac{kWh}{Unidades\ producidas}$	0.03	0.01

Fuente: propia, julio del 2017.

El indicador IE1 es directamente proporcional al consumo de energía, ya que a medida que el consumo aumenta, el valor del indicador aumenta, lo anterior significa que la eficiencia energética es inversamente proporcional al consumo [24].

Figura 49. Representación gráfica del indicador IE1, para el sistema neumático previo y con mejora.



Fuente: propia, Julio del 2017.

A partir de los valores del indicador IE1, para el sistema de transporte neumático previo y mejorado (ver *Figura 49*), se evidencia que el valor asociado al sistema neumático mejorado es 66.66% menor, respecto al valor del sistema previo, por tanto la eficiencia energética del proceso con la mejora propuesta aumenta.

Análisis del indicador IE2 del sistema con mejora y sin mejora.

El indicador IE2, permite analizar el desempeño energético del sistema de transporte neumático, en relación a la cantidad de material transportado en un batch de producto. A continuación, se muestra el valor del indicador, asociado a cada caso del sistema de transporte neumático (ver *Tabla 31*), respecto a la cantidad de líneas de transporte activadas.

Tabla 31. Comparación del indicador IE2

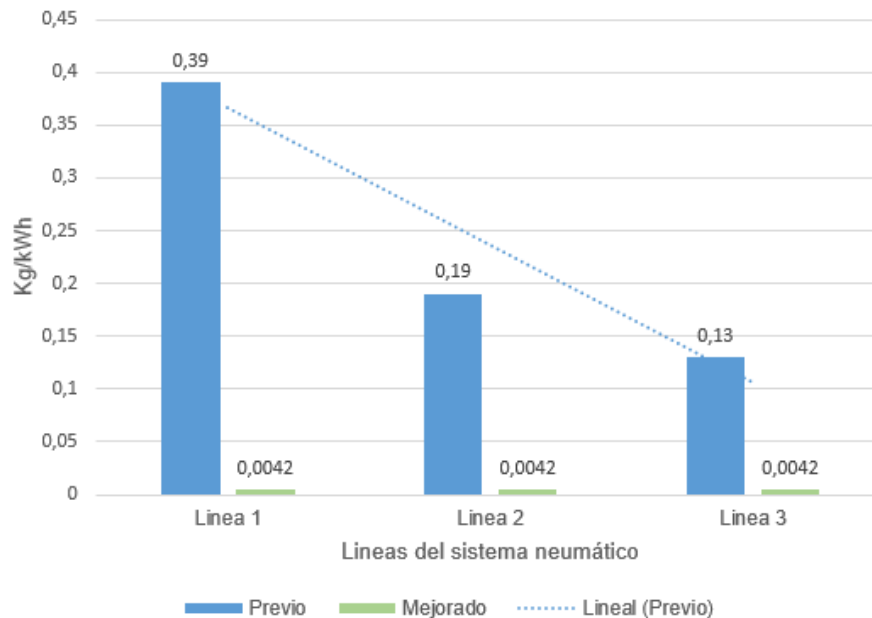
Indicador IE2	Unidad	Número de líneas	Sistema neumático previo	Sistema neumático mejorado
Cantidad de material transportado vs Consumo energético	$\frac{kWh}{kg}$	1	0.39	0.0042
		2	0.19	0.0042
		3	0.13	0.0042

Fuente: propia, Julio del 2017.

El valor numérico asociado al indicador IE2, es directamente proporcional al consumo de energía eléctrica, ya que a medida que el consumo aumenta, el valor del indicador aumenta y viceversa, teniendo en cuenta lo anterior la eficiencia energética es inversamente proporcional al consumo de energía. Particularmente, para el sistema de transporte neumático previo, se observa que el indicador es mayor, a medida que se reduce el número de líneas activadas, esto se debe, a que sin importar el número de líneas en funcionamiento para el transporte de material, el consumo es el mismo.

Por otra parte, se aprecia que los indicadores asociados al sistema neumático mejorado, poseen el mismo valor numérico, lo que permite concluir que el consumo energético asociado al funcionamiento de cada línea es el mismo, es decir, que el desempeño energético del sistema mejorado es igualmente eficiente, sin importar el número de líneas de transporte activadas. A continuación, se representan gráficamente los valores asociados al indicador energético IE2 (ver *Figura 50*).

Figura 50. Representación gráfica de los indicadores del sistema neumático previo y con mejora.



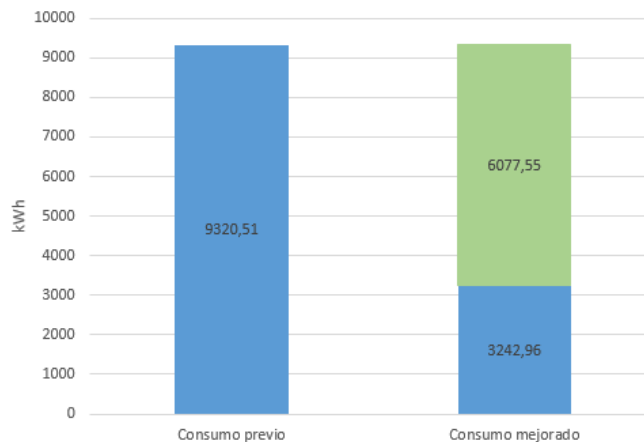
Fuente: propia, Julio del 2017.

Teniendo en cuenta, los valores del indicador IE2, para el sistema de transporte neumático previo y mejorado (ver Figura 50), se evidencia que con el sistema mejorado, el consumo asociado al sistema con un línea de transporte activada, disminuyó en un 98.02%; para el sistema con dos líneas de transporte habilitadas se redujo en un 97.79% y finalmente con las tres líneas en funcionamiento el sistema disminuyó su consumo en un 96.77%. Es decir, que el consumo del sistema mejorado respecto al sistema previo, es significativamente menor, por tanto, se concluye que la eficiencia energética del sistema de transporte neumático con la mejora propuesta, aumenta.

4.3.3 Reducción del consumo energético del proceso, con la propuesta de eficiencia energética del sistema de transporte neumático.

Con el fin de, cuantificar la reducción del consumo energético del proceso con la mejora propuesta, se representa gráficamente, la diferencia entre el consumo de energía del proceso con el sistema neumático previo y mejorado (ver Figura 51).

Figura 51. Diferencia del consumo energético del proceso con sistema neumático previo y mejorado.



Fuente: propia, Julio del 2017.

Según la gráfica anterior (*ver Figura 51*), se aprecia que el consumo de energía del proceso con la propuesta de eficiencia energética se reduce significativamente, dicha reducción corresponde al 65.2%, con respecto al consumo del sistema neumático anteriormente implementado. Por tanto, a partir de estos datos, se afirma que la mejora propuesta permite aumentar la eficiencia energética del sistema de transporte neumático de la empresa El cocinerito y de esta manera del proceso en su totalidad.

4.3.4 Alcances y consideraciones de SuperPro Designer

El proceso de validación anteriormente realizado, se hace a partir de la cuantificación del consumo de los equipos de PROFASOI, para los esquemas abordados (mejorado y previo), sin embargo debido a que la estimación del consumo energético con esta herramienta se hace a partir de valores nominales, los resultados obtenidos son válidos desde un punto de vista ideal, ya que la simulación no considera las variaciones en la demanda energética del proceso, pérdidas de energía en los equipos y demás consideraciones asociadas al funcionamiento de una máquina eléctrica.

Por otra parte, se aclara que este software no permite especificar los parámetros asociados a las cargas de presión y flujo del sistema de transporte, por tanto para realizar un estudio más detallado respecto a la capacidad y desempeño del sistema neumático, es necesario abordar otras herramientas de simulación que corroboren que la mejora propuesta cumple con las restricciones operativas de caudal y presión definidas.

CAPÍTULO 5

Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

El diseño de la mejora de automatización, para el sistema de transporte neumático de la empresa El Cocinerito, que se planteó en el presente trabajo de grado, da solución al problema existente, respecto al aumento en el consumo energético del área productiva y por tanto permite no solo reducir los costos de operación asociados al consumo de energía eléctrica del proceso productivo, sino, que constituye el diseño de una solución de automatización, planteado a partir de un diagnóstico energético apoyado en normas ISA, para posteriormente no solo aumentar la eficiencia energética del mismo, sino mejorar la ejecución de las tareas de producción asociadas a este.

A partir, del desarrollo de la revisión sistemática para la determinación del método de eficiencia energética, utilizado en el planteamiento de la mejora de automatización para el sistema de transporte neumático. Se logra definir un método híbrido, que consolida los elementos más representativos de distintas metodologías definidas y aplicadas a casos de estudio en procesos industriales, donde se requiere aumentar la eficiencia energética, a partir, de la implementación de tecnología en la ejecución de estos procesos. Debido a que, los métodos planteados en cada caso mencionado, no consideraban en su totalidad los requerimientos de la mejora de automatización, del caso de estudio abordado.

La aplicación del método de eficiencia energética determinado, permitió diseñar y validar una mejora de automatización para el sistema de transporte de materiales triturados, a partir, de la cual se aumentó la eficiencia energética del sistema mencionado y en consecuencia la de su proceso productivo. Siendo esto corroborado, a partir de la validación por simulación planteada en el método determinado, en la cual se lleva a cabo la cuantificación del consumo energético de la mejora de automatización diseñada, con el fin de analizar el desempeño energético y viabilidad de la mejora propuesta, previamente a su implementación.

A partir, de la definición de los indicadores de consumo, asociados al análisis del desempeño energético del proceso, se logra cuantificar el consumo de energía asociado, tanto al proceso, como al sistema al cual se le aplica la mejora. Permitiendo analizar a partir de estos valores, el desempeño energético del sistema de transporte, antes y después del planteamiento de la mejora propuesta y de esta manera analizar y cuantificar mediante una herramienta computacional, el

desempeño energético en ambos casos, para finalmente cuantificar la reducción del consumo de energía del proceso y en particular del sistema de interés.

El análisis del desempeño energético de la mejora de automatización propuesta, haciendo uso de la herramienta computacional SuperPro Designer, es un aspecto fundamental en la propuesta de eficiencia energética del sistema de transporte neumático, ya que, a partir de este software se logra validar, que la mejora de automatización diseñada, permite reducir el consumo de energía del sistema mencionado y por tanto aumentar la eficiencia energética del mismo. Sin embargo, esta herramienta no permite definir los parámetros de presión y caudal del sistema de transporte neumático, para analizar su desempeño operativo y corroborar que este cumpla los requerimientos.

5.2 Recomendaciones

Debido a que, en la empresa El Cocinerito se fabrica una amplia gama de productos triturados con distintas características y al igual que sólidos impalpables requieren ser movilizados y dosificados entre áreas de la empresa, se recomienda que se diseñe un sistema de transporte neumático para otras líneas de producto de la empresa, teniendo en cuenta una metodología de eficiencia energética, que permita proponer un sistema que requiera la menor cantidad de energía eléctrica en su funcionamiento y que de igual manera se valide previamente a su implementación.

Se recomienda, el diseño de un sistema de control para el sistema neumático objeto de la mejora de automatización, con el fin de operar de manera automática, la movilización de material entre áreas del proceso y de esta manera aumentar la eficiencia operativa del mismo.

Finalmente, se recomienda proponer el uso de un sistema de gestión de la información, entre el área gerencial y productiva, ya que, teniendo en cuenta el diagnóstico realizado a la empresa El Cocinerito, se evidenció que el flujo de información entre áreas de la empresa no es eficiente.

Bibliografía

- [1] M. G. Patterson, "What is energy efficiency? Concepts, indicators and

- methodological issues,” *Energy Policy*, vol. 24, no. 5, pp. 377–390, 1996.
- [2] N. Tanasi, G. Jankes, M. Stameni, A. Nikoli, M. Trnini, and T. Simonovi, “Potentials for reducing primary energy consumption through energy audit in the packaging paper factory,” *3rd Int. Symp. Environ. Friendly Energies Appl. EFEA 2014*, pp. 2–6, 2014.
 - [3] E. A. Abdelaziz, R. Saidur, and S. Mekhilef, “A review on energy saving strategies in industrial sector,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, no. 1, pp. 150–168, 2011.
 - [4] B. Journal, L. M. Gomes, and A. L. A. Mesquita, “On The Prediction of pickup and saltation velocities in pneumatic conveying,” *Chem. Eng.*, vol. 31, no. 1, pp. 35–46, 2014.
 - [5] F. Cabrejos, M. Isabel, and J. Rojas, “Transporte neumático de materiales sólidos a granel,” in *Congreso CONAMET/SAM*, 2004.
 - [6] P. Walper, “Transporte neumático de alimento peletizado,” Tesis de pregrado, Austral de Chile, Valdivia, Chile, 2011.
 - [7] G. E. Klinzing, F. Rizk, R. Marcus, and L. S. Leung, *Pneumatic conveying of solids: A Theoretical and practical approach*, 3rd ed. London: Springer, 2010.
 - [8] N. Vásquez, K. Jacob, R. Cocco, S. Dhodapkar, and G. E. Klinzing, “Visual analysis of particle bouncing and its effect on pressure drop in dilute phase pneumatic conveying,” *Powder Technol.*, vol. 179, no. 3, pp. 170–175, 2008.
 - [9] D. Mills, *Pneumatic Conveying Design Guide*, 3rd ed. Australia: Elsevier Ltd, 2016.
 - [10] PDVSA, “Manual de diseño de proceso: Manejo de materiales sólidos a granel.” 2015.
 - [11] V. I. Basmanov and M. D. Shakhmukhametov, “Vacuum system for the pneumatic transport of samples,” *Metallurgist*, vol. 47, no. 3, pp. 108–109, 2003.
 - [12] R. M. Ursula Acuña, “Diseño de un sistema de transporte neumático para Quinoa,” Tesis de pregrado, Pontificia universidad Católica del Perú, 2006.
 - [13] N. Yoshimura, *Vacuum Technology*. Berlin: Springer, 2008.
 - [14] Cocinerito, “El Cocinerito.” [Online]. Available: <http://www.cocinerito.com>. [Accessed: 10-Feb-2017].
 - [15] ANSI-ISA, “Batch control - Part 1: Models and terminology,” 1995.
 - [16] Edgardo Martínez Narváez, “Propuesta de Escalamiento Industrial del Proceso de Extrusión para Películas Biodegradables bajo el Marco del Proyecto ‘Investigación y Desarrollo de Empaques Biodegradables,’” Tesis de pregrado, Universidad del Cauca, 2015.

- [17] M. Ortiz-gallego, S. Yepes-zuluaga, J. Alvarez-salazar, and M. V. J. Ardila-marín, "Modelo de predicción del consumo eléctrico para la industria Electric consumption prediction model for industry," *Agron. Colomb.*, vol. 34, pp. 48–50, 2016.
- [18] J. M. Caicedo Cuchimba and V. Tobar Escobar, "Modelo de estudio y análisis de la eficiencia energética para el sector industrial en Colombia, aplicado a un caso de estudio en una empresa del sector del plástico," Tesis de pregrado, Universidad del Cauca, 2016.
- [19] N. Pouransari, M. Mercier, G. N. Sauvion, and F. Maréchal, "A general methodology for energy efficiency of industrial chemical processes," *Comput. Aided Chem. Eng.*, vol. 34, pp. 411–416, 2014.
- [20] P. Brito, P. Lopes, P. Reis, and O. Alves, "Simulation and optimization of energy consumption in cold storage chambers from the horticultural industry," *Int. J. Energy Environ. Eng.*, vol. 5, no. 2–3, pp. 1–15, 2014.
- [21] R. Hackl and S. Harvey, "Framework methodology for increased energy efficiency and renewable feedstock integration in industrial clusters," *Appl. Energy*, vol. 112, pp. 1500–1509, 2013.
- [22] M. Stamenić, G. Jankes, N. Tanasić, M. Trninić, and T. Simonović, "Energy audit as a tool for improving overall energy efficiency in Serbian industrial sector," *2nd Int. Symp. Environ. Friendly Energies Appl. EFEA 2012*, vol. 1, pp. 118–122, 2012.
- [23] N. Aughney and G. E. O'Donnell, "The energy saving opportunity in targeting non-value added manufacturing activities - A structured approach," *J. Clean. Prod.*, vol. 86, pp. 191–200, 2015.
- [24] E. Giacone and S. Mancò, "Energy efficiency measurement in industrial processes," *Energy*, vol. 38, no. 1, pp. 331–345, 2012.
- [25] D. Velázquez, R. González-Falcón, L. Pérez-Lombard, L. Marina Gallego, I. Monedero, and F. Biscarri, "Development of an energy management system for a naphtha reforming plant: A data mining approach," *Energy Convers. Manag.*, vol. 67, pp. 217–225, 2013.
- [26] J. Janutėnienė and T. Lenkauskas, "Energy saving in industrial processes using modern data acquisition systems," *IEE*, vol. 1, pp. 124–126, 2012.
- [27] K. O'Rielly and J. Jeswiet, "Strategies to improve industrial energy efficiency," *Procedia CIRP*, vol. 15, pp. 325–330, 2014.
- [28] F. Silva, W. Freire, and M. Pilatasig, "Energy efficiency in the milling process of dehydrated products , using hammer mill," *IEE*, vol. 1, 2016.
- [29] C. G. Toomey, "Pneumatic Conveying System Optimization," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 50, no. 6, pp. 4319–4323, 2014.
- [30] M. U. Uluer, H. O. Unver, G. Gok, N. Fescioglu-Unver, and S. E. Kilic, "A

framework for energy reduction in manufacturing process chains (E-MPC) and a case study from the Turkish household appliance industry,” *J. Clean. Prod.*, vol. 112, pp. 3342–3360, 2016.

- [31] C. D. Pitis and Z. A. Al-Chalabi, “Novel method of benchmarking energetic efficiency of industrial systems,” *9th Annu. IEEE Int. Syst. Conf. SysCon 2015 - Proc.*, pp. 359–364, 2015.
- [32] T. Schudeleit, S. Züst, and K. Wegener, “Methods for evaluation of energy efficiency of machine tools,” *Energy*, vol. 93, pp. 1964–1970, 2015.
- [33] D. Industry, “Direct Industry.” [Online]. Available: <http://www.directindustry.es/prod/clyde-process-limited/product-32078-440710.html>. [Accessed: 03-Jun-2017].
- [34] S. Keys and Chambers, “Scaling pneumatic conveying characteristics for pipeline pressureite,” in *National Conference on Bulk Materials Handling: Preprints, Institution of Engineers, Australia*, 1993, p. 205.
- [35] SAE, “Soluciones Avanzadas de Energía-SAE Ltda.” [Online]. Available: <https://www.presionyvacio.com/product-page/soplador-eks-80-100?gclid=CPja0fuirNQCFcZAhgodUI4BNw>. [Accessed: 01-Jun-2017].
- [36] BUSCH, “Bombas y Sistemas de Vacío.” [Online]. Available: <https://www.buschvacuum.com/co/es>. [Accessed: 01-Jun-2017].
- [37] G. Denver, “Elmo Rietschle.” [Online]. Available: <http://www.gd-elmorietschle.com/products>. [Accessed: 01-Jun-2017].