

**PROPUESTA DE UNA LÍNEA Y FLUJO DE PROCESO PARA UNA PLANTA DE  
TRILLADO DE CAFÉ. CASO DE ESTUDIO.**



**José David Burgos Gallego  
Johny Fernando Rojas Alegría**

**Universidad del Cauca  
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones  
Departamento de Electrónica, Instrumentación y Control  
Ingeniería en Automática Industrial  
Popayán, Cauca  
2018**

**PROPUESTA DE UNA LÍNEA Y FLUJO DE PROCESO PARA UNA PLANTA DE  
TRILLADO DE CAFÉ. CASO DE ESTUDIO.**



**José David Burgos Gallego  
Johny Fernando Rojas Alegría**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de  
INGENIERO EN AUTOMÁTICA 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  
2018**

## Tabla de contenido

|  |    |
|--|----|
| 1. CONTEXTUALIZACIÓN .....   | 8  |
| 1.1 EL PROCESO PRODUCTIVO DEL CAFÉ:.....   | 8  |
| 1.1.1 Descripción del proceso del café: .....  | 8  |
| 1.1.2 Subproductos del proceso de obtención del café .....                                       | 11 |
| 1.1.3 Trillado y clasificado de café .....   | 12 |
| 1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE TRILLADO DE CAFÉ EN SUPRACAFÉ .....                               | 12 |
| 1.3 DIAGNÓSTICO TECNICO Y FUNCIONAL .....  | 18 |
| 1.3.1 Cadena de Valor .....  | 18 |
| 1.3.2 Modelos ISA S88 .....  | 19 |
| 1.3.3 Auditoria energética .....   | 32 |
| 1.3.4 Metodología de eficiencia energética.....  | 41 |
| 1.3.5 Requerimiento del proyecto .....   | 42 |
| 2. INGENIERIA BÁSICA .....   | 44 |
| 2.1. CUMPLIMIENTO DE REQUERIMIENTOS TÉCNICOS DEL PROCESO DE TRILLADO DE CAFÉ .....               | 46 |
| 2.1.1 Cumplimiento del requisito técnico 1.....  | 47 |
| 2.1.2 Cumplimiento del requisito técnico 2.....  | 54 |
| 2.1.3 Cumplimiento de los requisitos técnicos 3 y 4 .....  | 65 |
| 2.2 CUMPLIMIENTO DEL REQUERIMIENTO FUNCIONAL DEL PROCESO DE TRILLADO DE CAFÉ .....               | 65 |
| 2.2.1 Cumplimiento del requisito funcional 1.....  | 65 |
| 3. SIMULACIÓN DEL PROCESO .....  | 68 |
| 3.1 SIMULACIÓN DE LA LÍNEA ACTUAL DE TRILLADO DE CAFÉ DE LA EMPRESA SUPRACAFE COLOMBIA S.A. .... | 68 |
| 3.1.1 Requerimientos de simulación .....   | 68 |
| 3.1.2 Requerimientos de proceso .....  | 68 |
| 3.1.3 Requerimientos de equipos .....  | 70 |
| 3.2 SIMULACIÓN DEL PROCESO DE TRILLADO DE CAFÉ PERGAMINO   | 71 |
| 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....   | 79 |
| 4.1 CONCLUSIONES.....  | 79 |
| 4.2 RECOMENDACIONES .....  | 79 |

## Lista de figuras

|   |    |
|---|----|
| Figura 1. Proceso de producción de café [3].....  | 9  |
| Figura 2. Hacienda Los Naranjos. Instalación de la empresa SUPRACAFÉ. Fuente propia .....   | 12 |
| Figura 3. Ubicación Hacienda Los Naranjos. [5] .....  | 13 |
| Figura 4. a) Tolva inicial y b) Trilladora. Fuente Propia .....   | 14 |
| Figura 5. Criba densimetrica. Fuente propia .....   | 14 |
| Figura 6. Venturi y catadora. Fuente propia. ....   | 15 |
| Figura 7. Monitor de almendra. Fuente propia .....  | 15 |
| Figura 8. a) Pulidora y b) Mesa densimetrica. Fuente propia. ....   | 16 |
| Figura 9. Cadena de valor de la empresa SUPRACAFE COLOMBIA S.A. Fuente propia. ....   | 18 |
| Figura 10. Diagrama PFD de la línea de trillado de café excelso en la empresa caso de estudio. Fuente propia .....  | 20 |
| Figura 11. Modelo físico del proceso de elaboración de café trillado. Fuente propia .....   | 22 |
| Figura 12. Modelo de control procedimental de elaboración de café trillado. Fuente propia .....   | 23 |
| Figura 13. Modelo de control de proceso de elaboración de café trillado, Unidad I. Fuente propia. ....  | 24 |
| Figura 14. Diagrama P&ID de la línea de trillado de café excelso en la empresa caso de estudio. Fuente propia .....   | 26 |
| Figura 15. a) Resultados de “Nivel de dificultad de la labor (Complejidad)” - b) Resultados para media ponderada de “Nivel de dificultad de la labor (Complejidad)” ..... | 27 |
| Figura 16. a) Resultados de “Nivel de riesgo (Esfuerzo físico)” – b) Resultados para media ponderada de “Nivel de riesgo (Esfuerzo físico)”.....                          | 28 |
| Figura 17. a) Resultados de “Nivel de automatización del proceso” – b) Resultados para media ponderada de “Nivel de automatización del proceso”.....                      | 29 |
| Figura 18. Grafica de resultados de la pregunta “¿Cuenta la empresa con manuales referentes al proceso?” .....  | 29 |
| Figura 19. Grafica de resultados de la pregunta “¿Cuenta la empresa con los manuales de la maquinaria instalada?” .....   | 30 |
| Figura 20. Grafica de resultados de la pregunta “¿Hay plan de ejecución para emergencias e imprevistos?” .....  | 30 |
| Figura 21. Grafica de resultados de la pregunta “¿Hay un consolidado de información previa y posterior sobre el material utilizado en el proceso?” .....                  | 30 |
| Figura 22. Grafica de resultados de la pregunta “¿Cuenta la empresa con el conocimiento de cómo realizar el mantenimiento de la línea?” .....                             | 31 |
| Figura 23. Grafica de resultados de la pregunta “¿Cuenta la empresa con los manuales de la maquinaria instalada?” .....   | 31 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 24. Grafica de barras por niveles encuestados “Enfrentamiento de respuestas”.....   | 31 |
| Figura 25. Relación porcentual del consumo energético de los motores en la línea actual de trillado. Fuente propia .....   | 35 |
| Figura 26. Porcentaje de consumo energético de la línea de trillado de café actual y módulos de equipo en la empresa SUPRACAFE COLOMBIA S.A. Fuente propia. ....         | 37 |
| Figura 27. Método híbrido de eficiencia energética [10]. ....  | 42 |
| Figura 28. Línea actual de trillado representada en SuperPro Designer. Fuente propia .....   | 45 |
| Figura 29. Módulo de equipo Despedregadora. Fuente propia .....  | 47 |
| Figura 30. Módulo de equipo Clasificadora electrónica. Fuente propia .....   | 48 |
| Figura 31. Formato de recopilación de información en marco comparativo. Fuente propia .....  | 49 |
| Figura 32. Incorporación de nuevos módulos de equipo en la línea de trillado actual. Fuente propia.....  | 51 |
| Figura 33. Diagrama PFD de la línea de trillado reestructurada. Fuente propia....  | 54 |
| Figura 34. Consumo energético de la línea actual de trillado mediante herramienta de simulación SuperPro Designer. ....  | 55 |
| Figura 35. Consumo energético de la línea de trillado con la incorporación de nuevos módulos mediante simulación en SuperPro Designer. ....                              | 56 |
| Figura 36. Consumo energético de la línea de trillado con el cumplimiento del CP1 mediante simulación en SuperPro Designer. ....   | 57 |
| Figura 37. Consumo energético de la línea de trillado con el cumplimiento del CP2 mediante simulación en SuperPro Designer. ....   | 58 |
| Figura 38. Consumo energético de la línea de trillado con el cumplimiento del CP3 mediante simulación en SuperPro Designer. ....   | 59 |
| Figura 39. Porcentaje de consumo energético de la línea de trillado de café reestructurada y módulos de equipo en la empresa SUPRACAFE COLOMBIA S.A. Fuente propia ..... | 63 |
| Figura 40. Diagrama P&ID de la línea de trillado reestructurada. Fuente propia ..  | 64 |
| Figura 41. Modelo físico del proceso propuesto de elaboración de café trillado. Fuente propia .....  | 66 |
| Figura 42. Modelo de control procedimental del proceso propuesto de elaboración de café trillado. Fuente propia .....  | 66 |
| Figura 43. Modelo de control del proceso propuesto de elaboración de café trillado. Fuente propia .....  | 68 |
| Figura 44. Módulos de equipo y accesorios pertenecientes a la línea actual de trillado. Fuente propia.....   | 70 |
| Figura 45. Módulos de equipo y accesorios pertenecientes a la línea reestructurada de trillado. Fuente propia.....   | 71 |
| Figura 46. Línea actual simulada en SuperPro Designer. Fuente propia .....   | 72 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 47. Valores de recursos comprometidos (consumo energético y producción final) en la línea de trillado actual mediante simulación en SuperPro Designer. ... | 72 |
| Figura 48. Representación y consumo energético de la línea de trillado con nuevos módulos de equipo incursionados mediante simulación en SuperPro Designer. ..    | 73 |
| Figura 49. Representación y consumo energético de la línea de trillado con la implementación del CP1 mediante simulación en SuperPro Designer. ....               | 74 |
| Figura 50. Representación y consumo energético de la línea de trillado con la implementación del CP2 mediante simulación en SuperPro Designer. ....               | 75 |
| Figura 51. Representación y consumo energético de la línea de trillado con la implementación del CP3 mediante simulación en SuperPro Designer. ....               | 76 |
| Figura 52. Producción final de la línea de trillado reestructurada mediante simulación en SuperPro Designer. ....   | 77 |

## Lista de tablas

|   |    |
|---|----|
| Tabla 1. Diagrama de operaciones y flujos del proceso de trillado de café en la empresa SUPRACAFÉ. Fuente propia.....   | 17 |
| Tabla 2. Consumo eléctrico de la Hacienda Los Naranjos [5] .....  | 33 |
| Tabla 3. Valores de alimentación y consumo energético referenciado a módulos de equipo y accesorios en la línea de trillado. Fuente propia.....                 | 35 |
| Tabla 4. Distribución estadística con valores de consumo superior a 1700kWh ...   | 36 |
| Tabla 5. Distribución estadística con valores de consumo entre 1700kWh y 3000kWh .....  | 37 |
| Tabla 6. Eficiencia de motores instalados en línea de trillado de SUPRACAFE COLOMBIA S.A.....   | 38 |
| Tabla 7. Puntos críticos del proceso de trillado de café verde excelso en la empresa caso de estudio. ....  | 39 |
| Tabla 8. Comparación de líneas de trillado marco comparativo contra la línea referencia. ....   | 50 |
| Tabla 9. Indicadores energéticos entre línea actual y línea simulada, asociado a la producción.....   | 56 |
| Tabla 10. Consumo energético de módulos de equipo empleados para acciones de transporte en la línea de trillado actual. Fuente propia.....                      | 58 |
| Tabla 11. Variación de indicadores energéticos desde la línea actual hasta la línea final reestructurada, obtenidos mediante simulación.....                    | 60 |
| Tabla 12. Valores de alimentación y consumo energético referenciado a módulos de equipo y accesorios en la línea de trillado reestructurada. Fuente propia..... | 62 |
| Tabla 13. Materiales comprometidos en un batch diario del proceso de trillado. ..   | 69 |
| Tabla 14. Tiempos de compromiso de módulos de equipo y accesorios de la línea actual de trillado. Fuente propia .....   | 69 |
| Tabla 15. Tiempos de compromiso de módulos de equipo y accesorios incursionados a la línea de trillado. Fuente propia .....                                     | 70 |

|  |    |
|--|----|
| Tabla 16. Cambios del consumo energético con la implementación de los cambios propuestos mediante simulación en SuperPro Designer..... | 78 |
| Tabla 17. Comparación motor catadora (Venturi) y Motor propuesto.....  | 80 |

## **1. CONTEXTUALIZACIÓN**

### **1.1 EL PROCESO PRODUCTIVO DEL CAFÉ:**

En Colombia el café es reconocido por la calidad y suavidad de tasa, además se sitúa como el mayor productor de café arábico lavado en el mundo, con una exportación mayor a los 14.5 millones de sacos de 60 kg de café (equivalente al 9.4% de la producción mundial, la cual fue de 153,8 millones de sacos) para el año 2017 según cifras de la International Coffee Organization [1]. El departamento del Cauca, junto a Huila y Nariño, se consolida como el nuevo eje cafetero en el país, por su café de alta calidad y denominación de origen; donde se procura generar un producto con niveles de alta calidad, para brindar un café reconocido como excelso a nivel internacional. Para cumplir con los criterios, es clave disponer de una adecuada línea de producción de café trillado que asegure el proceso idóneo con una humedad del grano entre 10-12% y una granulometría que los filtre desde 0.9cm a 1.3cm [2], para una posterior selección manual y empaquetado; cabe recalcar que esta labor inicia desde la recolección directa del grano, la selección, el despulpado, la fermentación, el lavado y el secado de los mismos; finalmente el trillado, el tostado y la molienda para la obtención del producto final consumible.

La actividad de trillado dentro de una línea de proceso de café es indispensable para la clasificación del grano o almendra en sus distintos eslabones de calidad, para su disposición en el mercado asignado dentro del proceso debe ser catalogado como un café excelso. Las calidades de la normativa excelsa que se presentan como consecuencia del trillado adecuado del café en el departamento del Cauca van desde *UGQ (Usuality Good Quality)* hasta *Premium* [2].

#### **1.1.1 Descripción del proceso del café:**

La elaboración de alimentos cada vez se compone de más tecnología en su producción para cumplir con los estándares de calidad y expectativas del mercado. Los productores se ven obligados a actualizar sus líneas y flujos de proceso aunque su poder económico no se los permita, por lo que optan por instalaciones parciales de plantas de proceso ya que en el territorio nacional se maneja en gran cantidad el uso de procedimientos manuales y artesanales para conservar la esencia del producto.

La producción de café colombiano refleja la situación presentada anteriormente, donde en la actualidad se ha aumentado el interés sobre este sector, que ve en incremento de la demanda del producto solicitando, altos niveles de calidad, lo que afecta la inversión en las medianas y pequeñas empresas productoras de café.

Los estudios en el campo de producción de café son reducidos en comparación a la importancia del producto dentro del mercado a nivel nacional e internacional. En [3] se observa una amplia caracterización de la cadena de valor y el proceso de elaboración de café utilizando la metodología de análisis de funciones.



La descripción del proceso de producción de café inicia desde su cultivo y culmina en el empaque del café idóneo para la comercialización, regulada por los agentes asignados por la Federación Nacional de cafeteros, ver Figura 1.

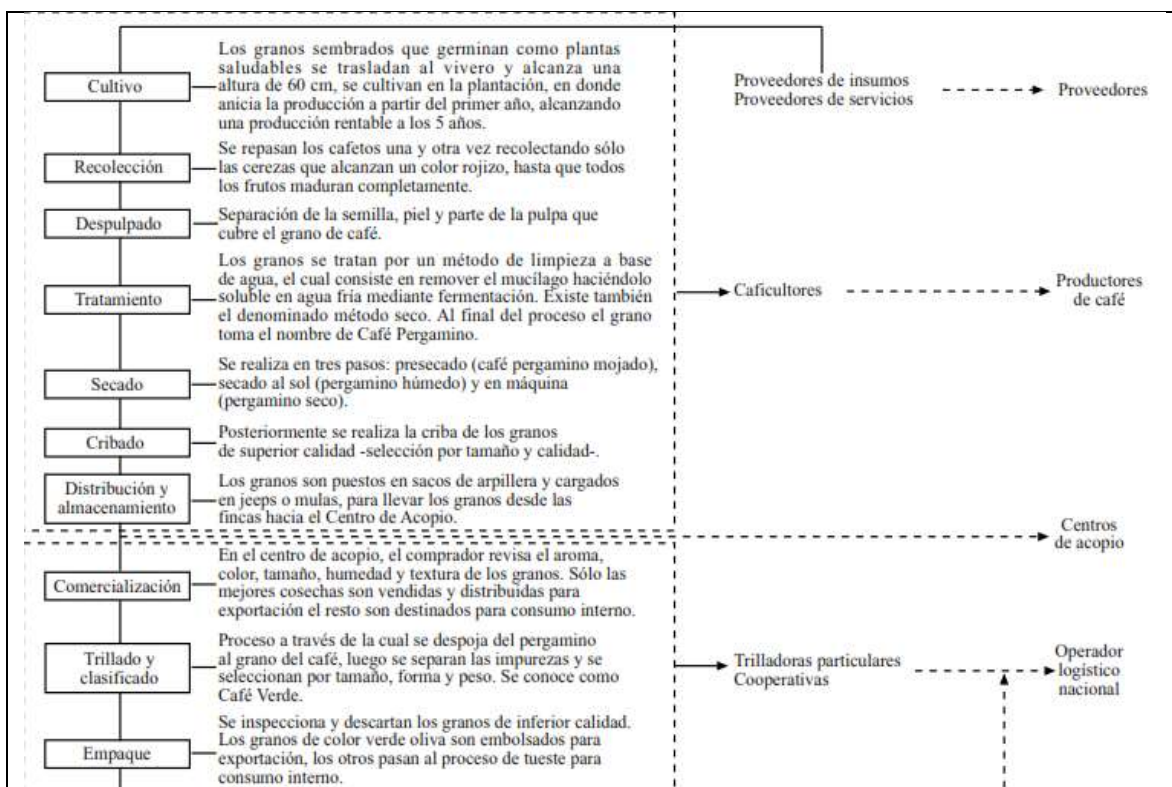


Figura 1. Proceso de producción de café [3]

## Etapas del proceso de producción de café

El proceso especificado es una recopilación del procedimiento genérico de las etapas a desarrollar en cualquier línea de proceso de café tradicional, en el mismo orden, las mismas indicaciones y con los mismos objetivos. Por lo cual se procede a explicar detalladamente como son desarrolladas por caficultores las etapas de cultivo, recolección, despulpado, tratamiento, secado, cribado, distribución y almacenamiento. Las cooperativas de caficultores entran al proceso en las labores de comercialización, trillado y clasificación para el posterior empaque [3].

Las etapas presentes en el proceso llevan el siguiente orden:

1. Cultivo: El cafetal exige un clima caluroso y húmedo, a temperaturas constantes (20 - 23 °C) y precipitaciones que varíen entre 1.500 y 1.800 milímetros por año por lo que las zonas tropicales reúnen las características propicias para el cultivo del café. Las plantaciones están situadas en la montaña o en mesetas, para la especie arábica, o en las planicies o llanuras, para la especie robusta. El cultivo en Colombia inicia en el vivero, donde se plantan los granos cuidadosamente seleccionados. Estos se siembran cerca los unos de los otros y se cubren con tierra rica y fértil. Unas ocho semanas más tarde, las semillas germinan y las raíces se desarrollan. Las plantas más

saludables son seleccionadas y trasplantadas en el vivero, donde se les nutre cuidadosamente durante seis meses. Cuando los brotes alcanzan una altura de aproximadamente sesenta (60) centímetros, son trasplantados a la plantación, donde se cultivan con cuidado. Cada árbol de café produce una libra (455 gramos) en promedio de café en un año [3].

2. **Recolección:** Para la especie arábica ocurre de 6 a 8 meses después de la floración y para la especie robusta el evento ocurre entre 9 a 11 meses después de la floración. La recolección de los granos de café es un proceso largo y minucioso. Primero han de madurar las cerezas hasta que alcancen un color rojizo y luego los recolectores repasan los cafetos y recolectan una a una las cerezas maduras; así, el proceso se alarga hasta que todos los frutos maduran completamente [3].
3. **Despulpado:** En este proceso se realiza la separación de la pulpa y las semillas que se encuentran en el centro de cada cereza, mediante una máquina despulpadora [3].
4. **Tratamiento:** Aún envueltos en una dura cáscara apergaminada, los granos son puestos en enormes tanques de concreto. Allí se colocan en remojo en agua fría de montaña durante 24 horas. El remojo provoca una suave fermentación, vital para el aroma del café. Durante este proceso se separa la pulpa y se seleccionan los granos [3].
5. **Secado:** Los granos son recogidos y puestos en grandes canastas de mimbre, luego son esparcidos en grandes terrazas al aire libre, donde se les da vuelta una y otra vez hasta que el sol y el aire los seca. Este proceso se realiza en tres pasos: pre-secado (café pergamino mojado), secado al sol (café pergamino húmedo) y en máquina (café pergamino seco). Es necesario cubrir los granos cuando llueve y durante la noche para que no absorban humedad. Posteriormente se realiza la criba de los granos de calidad superior [3]. Productores con procesos tecnificados usualmente realizan el secado en silos o guardiolas adecuadas para obtener los valores de humedad estandarizados.
6. **Distribución:** Los granos son puestos en sacos de arpillera y cargados en camperos. En algunas regiones, las mulas aún son importantes medios de transporte para llevar los granos desde las fincas hacia el mercado [3].
7. **Comercialización:** El comprador revisa los granos para comprobar el aroma, el color, el tamaño, la humedad y la textura del café verde. Solo las mejores cosechas son vendidas y distribuidas para exportación, el resto son destinados para el consumo interno [3].
8. **Trillado y clasificado:** Los granos de café verde son luego llevados al molino, donde son introducidos en máquinas que les quitan la cáscara apergaminada y plateada que envuelve a cada grano. Los granos son sometidos a varios

procesos, en los cuales son separados de todas las impurezas y seleccionados por tamaño, forma y peso [3].

9. Empaque: En esta etapa es crucial llevar a cabo una inspección y descartar los granos de inferior calidad. A partir de ese momento, los granos de color verde oliva están listos para ser embolsados y sellados para exportación [3].

Terminadas las nueve (9) etapas del proceso, se generan dos (2) etapas adicionales necesarias para mantener los estándares de calidad exigidos por la Federación Nacional de cafeteros:

10. Sello de aprobación: La entidad encargada del aseguramiento de los estándares de calidad del café (Federación Nacional de Cafeteros para Colombia [Federacafe]) se reserva el derecho de otorgar su sello de aprobación antes de que las bolsas sean selladas. El proceso se divide en dos: inicialmente una muestra es extraída, pesada y calificada, momento en que ocurre una primera selección; luego se obtiene otra muestra de los sacos obtenidos de la primera escogencia, que es tostada, molida y degustada en una taza de café debidamente preparada. Los expertos dan puntaje por aroma, acidez y uniformidad. Si los expertos no están satisfechos con la calidad de una cosecha en particular, es rechazada para su exportación [3].
11. Regulación: Se realiza por entidades que intervienen en el mercado cafetero interno y externo con el fin, no solo de promover el consumo del producto, sino de regular la oferta y la demanda del café y así buscar un régimen estable de precios. El precio interno al productor del café es un precio de sustentación que se fija por concertación entre las organizaciones de apoyo del sector y el gobierno nacional de un país. Desde un punto de vista técnico, las prácticas inadecuadas durante el secado del café pueden causar 10 de los 14 defectos establecidos por los estándares de calidad aplicados al Café de Colombia. Estos parámetros exigen un contenido de humedad entre 10-12% en los granos, con el fin de asegurar la calidad establecida para comercializar un producto excelso [3].

### **1.1.2 Subproductos del proceso de obtención del café**

A lo largo del desarrollo de la transformación se obtienen cambios en el estado del café para la posterior comercialización, definido en [3], denominados subproductos. Estos subproductos fluyen a medida que avanza el proceso y ocurren cambios que se aprecian en las siguientes definiciones:

**Café pergamino:** Es el fruto del cafeto compuesto por la semilla, desprovisto del pericarpio y mesocarpio. Este producto se obtiene al finalizar el proceso denominado tratamiento. El café pergamino es la materia prima de entrada para el proceso de secado.

**Café verde:** Es el grano o almendra de café libre de las capas que lo recubren; es el producto que se obtiene del proceso de trillado, mediante el cual se

descascara el café pergamino, se limpia o eliminan impurezas, se clasifica el grano (por tamaño, densidad y color) y se pule para eliminar el episperma o “película plateada”.

### 1.1.3 Trillado y clasificado de café

Una vez que se recibe el producto, en este caso el café pergamino en bultos, se almacena de forma monitoreada para referenciar su sitio de origen, día y hora de llegada; la misma información que se debe conservar al almacenar el café verde excelso después de terminar el proceso de trilla. El café pergamino llega a iniciar su proceso de trillado con un 10-12% de humedad, característica que se obtiene con el proceso preliminar de secado [4].

Posterior al trillado, el café verde se selecciona y clasifica cuidadosamente, teniendo en cuenta su tamaño, peso, color y apariencia física (defectos). Este café verde excelso es el insumo para la elaboración del café tostado, del café soluble y de los extractos de café; el café verde se caracteriza por el color asociado a su nombre, y un olor característico de café fresco [4].

## 1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE TRILLADO DE CAFÉ EN SUPRACAFÉ

En el Cauca, la empresa SUPRACAFÉ COLOMBIA S.A. lidera, junto a otros caficultores de la región, estrategias de producción y exportación de café y sus derivados con el montaje del primer Parque Tecnológico de Café en el sur occidente colombiano; donde se tiene como objetivo empresarial la obtención de niveles de calidad elevados en la producción de café sacando provecho de las condiciones geográficas. La empresa desarrolla todo el nivel de producción asociado al producto café molido, el cual abarca desde la siembra, recolecta, selección, despulpado, fermentado, lavado y secado del grano de café para una posterior trilla, tostado y molienda, ver Figura 2.



Figura 2. Hacienda Los Naranjos. Instalación de la empresa SUPRACAFÉ. Fuente propia

Las locaciones de la empresa se encuentran estratégicamente ubicadas en una hacienda que brinda una disposición completa de siembra de café arábico, café castillo, café Colombia entre otras variedades para cumplir con la objetividad planteada de mercadeo. La empresa está ubicada en la vereda La Venta, del

municipio de Cajibío, a 29km al norte de la ciudad de Popayán y a 200m de la vía Panamericana, sobre la ruta Popayán-Silvia, ver Figura 3. Ubicación Hacienda Los Naranjos. [5]



Figura 3. Ubicación Hacienda Los Naranjos. [5]

SUPRACAFE COLOMBIA S.A., cuenta con una línea de trillado completa que ha presentado un continuo crecimiento, desde sus unidades básicas como: elevador neumático, trilladora, catadora, monitor de almendra, elevador de cangilones y banda escogedora; además se adquirieron unas últimas unidades como: pulidora y mesa densimétrica, debido a un aumento en la demanda del producto final. En la actualidad la empresa tiene una capacidad de procesamiento de 24000 kg de café pergamino en un periodo de 15 días, para obtener una producción final de 19800 kg de café excelso representando un factor de rendimiento del 82.5%. La línea instalada cumple con la labor mencionada, realizando la ejecución del trillado y clasificada dentro de la misma línea de producción, y se compone de las siguientes operaciones indispensables:

### **Trillado de café pergamino**

Para dar inicio al proceso de trilla se empieza la operación de Transporte 1, la cual consta de depositar los bultos de café pergamino en la tolva inicial, ver Figura 4, donde posteriormente un elevador neumático transporta la materia prima hasta un primer filtro de impurezas que desecha toda clase de objetos no pertinentes a ella.

A continuación el café pergamino cae por acción gravitatoria hacia la trilladora para ejecutar la operación de descascarado, donde se separa completamente la almendra del grano del pergamino, obteniendo así un flujo de café verde, ver Figura 4.



Figura 4. a) Tolva inicial y b) Trilladora. Fuente Propia

### Clasificación de café verde

Con la obtención del flujo de café verde, se continúa a la operación Selección 1, donde actúa la criba densimétrica para separar los granos del flujo de proceso por densidad, ver Figura 5. En este punto los granos de café pergamino que continúen hacia esta operación quedan en el primer filtro densimetrico y se someten a una realimentación para retornar al punto de inicio del proceso, es decir a la tolva inicial.



Figura 5. Criba densimetrica. Fuente propia

Continuando con la operación Clasificación 1, se procede a pasar por la catadora con la acción neumática de un Venturi, clasificando el café verde mediante el peso de sus granos, ver Figura 6. Esta acción se lleva a cabo con una corriente de aire constante que desplaza el flujo entrante de almendras hacia la catadora que cuenta con 4 canales específicos para esta parte del proceso, donde 2 canales brindan la medida idónea del café verde, denominado como café verde optimo y permite seguir con el flujo normal del proceso; y en los otros 2 canales se descarta como pasilla al café que cae en ellos al no tener las medidas esperadas en el proceso, clasificados como livianos y muy livianos.



Figura 6. Venturi y catadora. Fuente propia.

El café verde óptimo, continúa en el proceso hacia la operación Clasificación 2, donde este café cae al monitor de almendra, el cual lo clasifica por tamaño debido a cinco (5) mallas que posee el monitor con diferentes diámetros en sus agujeros, ver Figura 7. La incorporación de las mallas se realiza para descartar los dos tamaños más pequeños permitiendo solamente el paso del café que tenga medidas de 0.9cm a 1.3cm [2] correspondiente a las mallas restantes, donde se denomina café verde idóneo.



Figura 7. Monitor de almendra. Fuente propia

Posteriormente, el café verde idóneo recae a la operación Transporte 2, en donde un tornillo sin fin lo desplaza desde la salida del monitor de almendra hasta la pulidora para darle continuidad a la etapa de clasificación. El flujo de café verde idóneo continua a la operación de Pulido, donde se depositan los granos en la pulidora para una limpieza total de los mismo, removiendo la episperma o “película plateada” y posibles residuos que hayan avanzado hasta este punto del proceso, ver Figura 8.a, dando como subproducto un flujo de café verde limpio.

Por medio de un elevador de cangilones se desarrolla la operación Transporte 3, donde se eleva el café verde limpio hacia la mesa densimétrica para culminar la

última clasificación del café por densidad, ver Figura 8.b. Como penúltimo paso, la operación Clasificación 3 se desarrolla dentro de la mesa densimétrica, obteniendo 2 calidades para continuar con el proceso por cumplimiento de densidades del producto esperado denominado como café verde excelso; otra calidad dentro de la clasificación se desplaza hacia una realimentación en la misma mesa densimétrica, y por último, una calidad restante se considera como pasilla y se descarta del proceso.

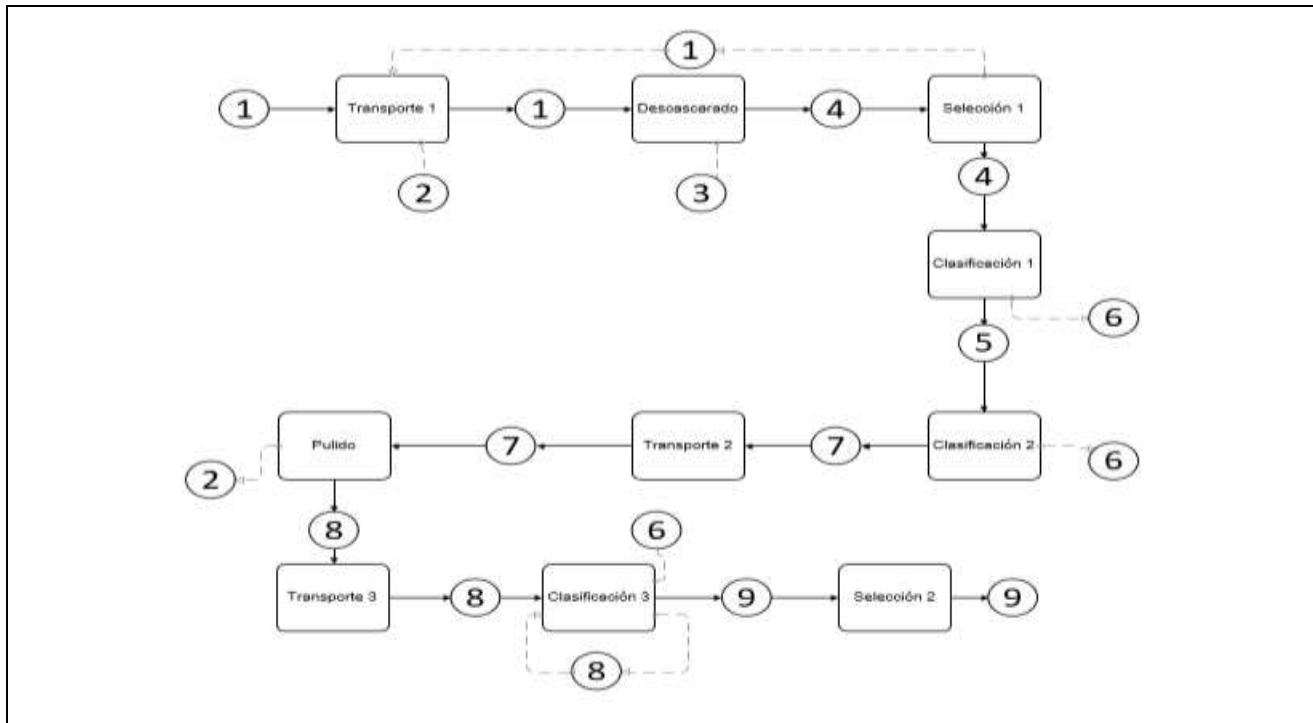


Figura 8. a) Pulidora y b) Mesa densimétrica. Fuente propia.

La última operación del proceso se denomina Selección 2, donde se encuentra la banda escogedora y la labor desarrollada manualmente por parte del talento humano cumpliendo con niveles de calidad estipulados por la normativa vigente del café verde excelso.

Dentro de la ejecución del proceso se presentan cambios en el flujo de materia prima y subproductos, los cuales poseen características relevantes para su clasificación en el proceso de trilla realizado en la empresa, ver Tabla 1.





| ID | FLUJOS             | DESCRIPCION  |
|----|--------------------|--|
| 1  | Café pergamino     | Titulo referente al café seco, con una humedad del grano entre 10-12% y recubierto por una cáscara protectora conocida como cascarilla [6].  |
| 2  | Impurezas          | Elementos no pertenecientes al flujo normal de materia prima en el proceso como lo son piedras, objetos metálicos, plásticos y demás basuras.  |
| 3  | Pergamino o cisco  | Se refiere a la cascarilla cartilaginosa de color blanco amarillento que recubre los granos del café.  |
| 4  | Café verde         | Denominación del café pergamino después de pasar por la operación de descascarado, la cual se encarga de dejar los granos de café sin pergamino.   |
| 5  | Café verde optimo  | Referencia en el proceso al café verde clasificado por peso de grano.  |
| 6  | Pasilla            | Café con valores de medida fuera del rango de clasificación dentro de las diversas operaciones de Clasificación dentro del proceso   |
| 7  | Café verde idóneo  | Definición de café verde óptimo posterior a la clasificación por tamaño, con un rango de 0.9cm a 1.3cm.  |
| 8  | Café verde limpio  | Referencia posterior al café verde idóneo, al cual se le remueve la episperma o "película plateada" y posibles residuos que continúen en el proceso.   |
| 9  | Café verde excelso | Producto final del proceso de trillado, el cual conserva la humedad de 10-12%, libre de olores extraños, densidad y tamaño óptimo previamente corroborados, como también un aspecto típico asociado a un café fresco y bien beneficiado [6]. |

Tabla 1. Diagrama de operaciones y flujos del proceso de trillado de café en la empresa SUPRACAFÉ. Fuente propia

En Tabla 1 se recoge el primer flujo de proceso identificado en SUPRACAFE COLOMBIA S.A. donde se especifica que en la línea de trillado actual se inicia con el ingreso de café pergamino (1), para posteriormente retirar impurezas (2) de la materia prima y los desperdicios referentes a la operación de descascarado (3).

Continuando el flujo de proceso, se obtiene el café verde (4) a procesar en las diferentes operaciones de la unidad de Clasificado, logrando así los cambios que los clasifican como café verde óptimo (5), idóneo (7), limpio (8) y finalmente obtener la calidad del café referente en la línea de trillado para un producto de exportación, denominado café verde excelso (9).

### 1.3 DIAGNÓSTICO TECNICO Y FUNCIONAL

#### 1.3.1 Cadena de Valor

La disposición de una cadena de valor se plantea como un modelo de análisis que permite a las empresas conocer su perfil competitivo, mejorarlo y desarrollar verdaderas ventajas competitivas. Este modelo comprende un modo de evaluar a la empresa en sus distintos sectores/funciones a fin de clarificar los aportes que hacen éstos a la generación de la utilidad final [7].

Esta evaluación, determina también las debilidades a fortalecer así como las verdaderas ventajas competitivas que hacen posible el éxito o al menos, la capacidad de supervivencia. La empresa caso de estudio comprende varios eslabones en su estructuración comprendiendo cada acción presentada en el proceso productivo del café, ver Figura 9, al igual que los agentes reguladores de cada una de las actividades.

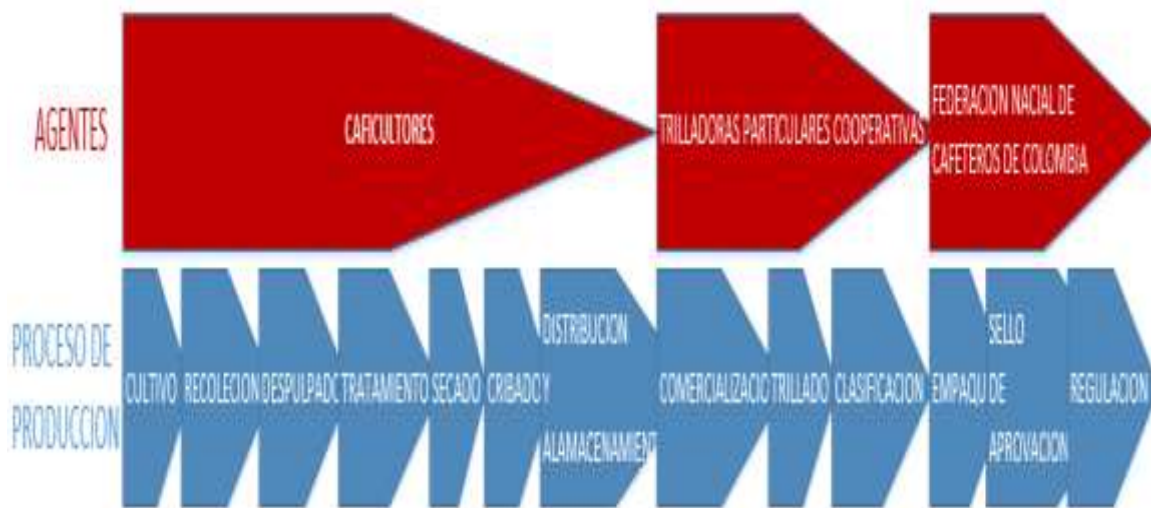


Figura 9. Cadena de valor de la empresa SUPRACAFE COLOMBIA S.A. Fuente propia.

La empresa SUPRACAFE COLOMBIA S.A. se subdivide en los eslabones presentados en la cadena de valor presente en Figura 9, donde se presentan en su estructura un par de niveles recalcados en códigos de colores; un primario de color rojo donde se tienen los agentes reguladores y un nivel secundario de color azul donde se representa el proceso de producción vinculado a cada agente.

Para los primeros (7) siete eslabones de producción (cultivo, recolección, despulpado, tratamiento, secado, cribado, distribución y almacenamiento) se asocia el ente regulador de caficultores. En el conjunto de eslabones anteriormente nombrados se lleva a cabo el proceso desde su inicio con la semilla hasta obtener un producto listo para distribución y almacenaje de café pergamino.

Para los siguientes (3) tres eslabones (comercialización, trillado y clasificación) se dispone la regulación de los agentes presentes en trilladoras particulares y cooperativas. En esta parte de la cadena de valor se presenta el producto comercializado, en este caso café pergamino, para posteriormente pasar por la trilla y clasificación obteniendo como resultado un café verde excelso.

Para los últimos (3) tres eslabones de producción (empaquete, sello de aprobación y regulación), la Federación Nacional de Cafeteros (FNC) de ahora en adelante, es el ente regulador asociado.

Para culminar el proceso se tiene en cuenta el empaque del café verde excelso y los estándares de calidad presentados por el último ente regulador que brinda un sello de aprobación posterior a la inspección del producto. La Federación Nacional de Cafeteros busca promover el consumo del producto calificado y aprobado, al igual que regular la oferta y la demanda del café con finalidades de establecer régimen estable de precios que favorezca a todo el conjunto de agentes involucrados y economía del producto.

Partiendo del conocimiento obtenido en la especificación de la línea de trillado, se procede a la inclusión de una representación acorde al nivel técnico y administrativo del proyecto, haciendo uso de regulaciones internacionales para llevarlo a cabo.

### **1.3.2 Modelos ISA S88**

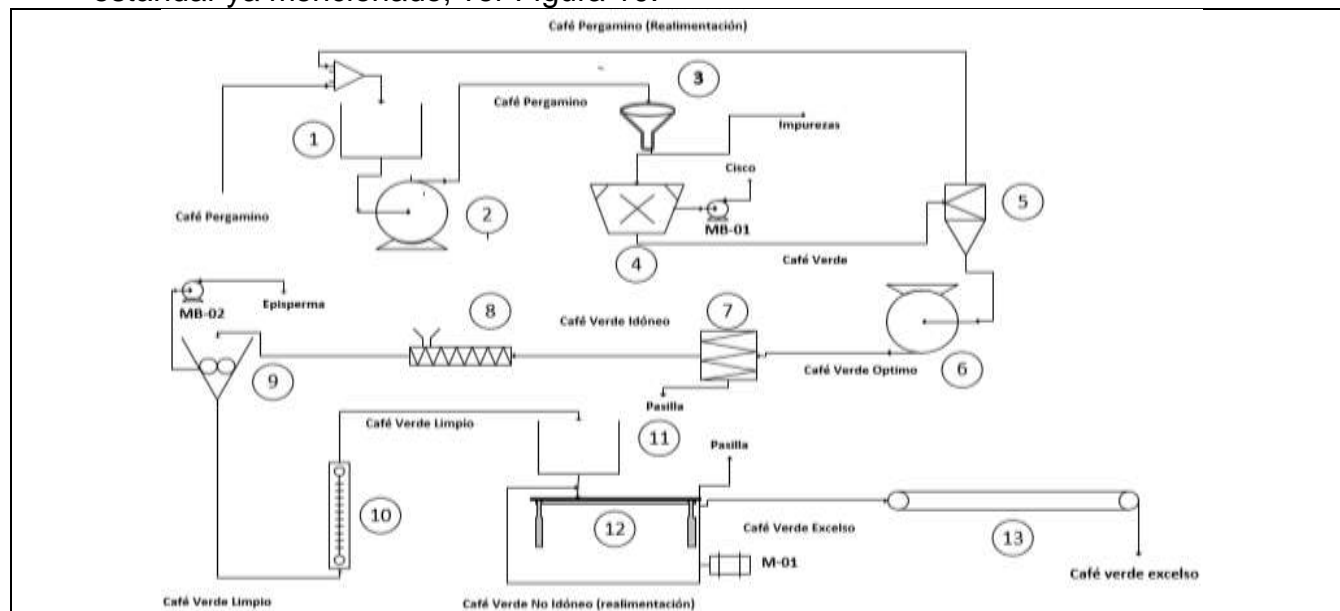
A nivel internacional existen normativas para la representación de procesos, las cuales brindan pautas de desarrollo de modelos de fácil comprensión hacia quien los desarrolla y hacia quien los observa finalmente. El estándar ISA 88 es un documento en el que se especifica cómo se deben elaborar estas representaciones.

Se plantean representaciones gráficas de la línea de trillado de café expresadas dentro del estándar ISA 5.1 con las que se obtienen mejores apreciaciones de la locación, maquinaria e instrumentación mencionada a lo largo del documento.

### **PFD del proceso de trillado de café pergamino**

Las interconexiones de los equipos y flujos de materia prima presentes en una línea de producción se representan de manera adecuada a “alta escala” en los diagramas llamados “Diagramas de Flujo de Proceso o Process Flow Diagrams”. [8]

Se denomina diagrama PFD al esquema donde se registra las unidades junto a los equipos y accesorios dentro del proceso. Partiendo de Tabla 1, donde su imagen asociada especifica el flujo de la materia prima a lo largo del proceso, se expresa la totalidad de la línea de trillado en detalles más específicos como se plantea en el estándar ya mencionado, ver Figura 10.



| ID | MODULOS DE EQUIPO Y ACCESORIOS DE LA UNIDAD | OPERACIÓN  |
|----|---|--|
| 1  | Tolva inicial                               | Encaminar el flujo de café pergamino para el posterior transporte a la acción de trilla  |
| 2  | Elevador neumatico                          | Transportar el café pergamino hacia la trilladora para la acción de descascarado   |
| 3  | Filtro de impurezas                         | Extraer el cisco e impurezas del café pergamino, producto de la acción desarrollada en el descascarado   |
| 4  | Trilladora                                  | Descascarar y limpiar los granos de café pergamino   |
| 5  | Criba densimetrica                          | Seleccionar el café verde posterior a la trilla y enrutarlo a clasificaciones, al igual que realizar la realimentación de los granos de café pergamino |
| 6  | Catadora                                    | Clasificar por peso el café verde mediante la elevación del mismo y encaminado por niveles para otra posterior clasificación                           |
| 7  | Monitor de almendra                         | Clasificar por tamaño el café verde y alimentar el tornillo sin fin con café verde denominado como idóneo  |
| 8  | Tornillo sin fin                            | Transportar el café verde hacia la pulidora para la siguiente limpieza de los granos   |
| 9  | Pulidora                                    | Pulir el café verde idoneo y alimentar el elevador de cangilones con café verde limpio   |
| 10 | Elevador de cangilones                      | Transportar el café verde limpio posterior al pulido, y alimentar la tolva asociada a la mesa densimetrica.  |
| 11 | Tolva de mesa densimetrica                  | Encaminar el flujo de café verde limpio para la posterior clasificación en la mesa densimetrica  |
| 12 | Mesa densimetrica                           | Clasificar el café verde mediante valores de densidad paradar cumpliendo a la ultima operación de la línea   |
| 13 | Banda transportadora                        | Módulo de equipo sobre el cual se lleva a cabo la selección final del café verde considerado como café excelso   |

Figura 10. Diagrama PFD de la línea de trillado de café excelso en la empresa caso de estudio.

Fuente propia

El diagrama PFD de la línea de trillado, representado en Figura 10, inicia con la entrada de café pergamino depositado en una tolva inicial (1), posteriormente pasa al elevador neumático (2) cuya función es transportar el café pergamino al filtro de impurezas (3) para seguir a la trilladora (4), después de trillar el café pasa a ser clasificado en la criba densimétrica (5), donde se presenta la primera realimentación efectuada sobre el café que no presenta una trilla adecuada y no se considera café verde, regresándolo hasta la tolva inicial.

Siguiendo el transcurso normal del proceso, el café verde se desplaza hacia la catadora (6) donde se clasifica por el peso de sus almendras. El café verde de peso óptimo avanza al monitor de almendra (7) para ser clasificado por tamaño de acuerdo a estándares de medida en selección con la objetividad de un café excelso. El café verde se desplaza mediante un tornillo sin fin (8) hasta la pulidora (9) para hacer la limpieza de la episperma. El flujo de café verde se desplaza por medio del elevador de cangilones (10) hasta una tolva elevada (11) sobre la mesa densimétrica (12), la cual clasifica por última vez mediante el uso de la densidad de cada almendra. En este punto del proceso se aprecia la segunda realimentación automática del flujo de materia prima, en donde el café clasificado como “no óptimo” se ingresa de nuevo a la mesa densimétrica para una segunda medida de densidad. El café verde que continúa en el proceso es llevado a una selección manual por parte del personal indicado, operación que se realiza en la banda transportadora (13) dando como resultado un café verde excelso listo para empacar y posteriormente ser exportado.

El estándar ya mencionado contiene el modelo físico que comprende la maquinaria e instrumentación del proceso; el modelo de procedimiento que referencia las acciones que deben cumplirse a cabalidad en cada elemento presente en el modelo físico para una correcta culminación del proceso de elaboración del producto; y modelo de proceso, el cual representa una relación entre los equipos del modelo físico y las actividades del modelo de procedimiento, ver Anexo A.

### **Modelo físico del proceso de trilla de café pergamino**

El modelo físico del proceso comprende en su totalidad la representación de los equipos tecnológicos presentes en la planta de la línea de trillado y necesarios para desarrollar la producción, donde se abarcan los niveles de producción hasta la manufactura empleada.

Dentro de SUPRACAFÉ S.A. se cuenta con una línea de trillado de café compuesta por las unidades de Trillado de café pergamino y Clasificado de café verde, ver Figura 11.

| Célula de proceso           | Unidad                      | Módulo de equipo             | Módulo de control                   |
|-----------------------------|-----------------------------|------------------------------|-------------------------------------|
| Producción de café trillado | Trillado de café pergamino  | Elevador neumático           | Dosificar café pergamino (operario) |
|                             |                             |                              | Motobomba elevador neumático        |
|                             |                             | Filtro de impurezas          | Limpieza de filtro (operario)       |
|                             |                             | Trilladora                   | Motor trilladora                    |
|                             | Motobomba de impurezas      |                              |                                     |
|                             | Clasificación de café verde | Criba densimetrica           | Motor criba                         |
|                             |                             | Catadora                     | Motobomba Venturi                   |
|                             |                             | Monitor de almendra          | Motor monitor                       |
|                             |                             | Tornillo sin fin             | Motor tornillo sin fin              |
|                             |                             | Pulidora                     | Motor pulidora                      |
|                             |                             |                              | Motobomba de pulido                 |
|                             |                             | Elevador de cangilones       | Motor elevador cangilones           |
|                             |                             | Mesa densimetrica            | Motor vibración mesa                |
|                             |                             |                              | Motor realimentación mesa           |
|                             |                             |                              | Motobomba mesa densimetrica         |
|                             | Banda transportadora        | Motor banda                  |                                     |
|                             |                             | Selección café verde excelso |                                     |

Figura 11. Modelo físico del proceso de elaboración de café trillado. Fuente propia

### Modelo de control procedimental del proceso de trilla de café pergamino

El modelo representa en su estructura un procedimiento (Elaboración de café trillado), el cual se compone de: Dos (2) unidades, diez (10) operaciones y diecisiete (17) fases. Ver Figura 12.

| Procedimiento                | Procedimiento de unidad     | Operación del proceso | Fase                             |
|------------------------------|-----------------------------|-----------------------|----------------------------------|
| Elaboración de café trillado | Trillado de café pergamino  | Transporte 1          | Suministrar café pergamino       |
|                              |                             |                       | Elevar café pergamino            |
|                              |                             |                       | Limpiar filtro                   |
|                              |                             | Descascarado          | Limpiar café pergamino           |
|                              | Extraer cisco               |                       |                                  |
|                              | Clasificación de café verde | Selección 1           | Seleccionar café verde           |
|                              |                             | Clasificación 1       | Clasificar café verde por peso   |
|                              |                             | Clasificación 2       | Clasificar café verde por tamaño |
|                              |                             | Transporte 2          | Desplazar café                   |
|                              |                             | Pulido                | Pulir café verde                 |
| Extraer episperma            |                             |                       |                                  |

|  |  |                 |                                    |
|--|--|-----------------|------------------------------------|
|  |  | Transporte 3    | Desplazar café verde               |
|  |  | Clasificación 3 | Mover café verde                   |
|  |  |                 | Clasificar café verde por densidad |
|  |  |                 | Realimentar café verde excluido    |
|  |  | Selección 2     | Desplazar café verde               |
|  |  |                 | Seleccionar café verde excelso     |

Figura 12. Modelo de control procedimental de elaboración de café trillado. Fuente propia

El proceso de trilla de café consta de un gran número de unidades compuestas de motores, los cuales conllevan un consumo eléctrico asociado a los costos de producción por lo cual se expresa dentro del proyecto que esta comparación es la que se afronta para obtener una eficiencia del recurso energético eléctrico, y lograr una reducción del mismo sin afrontar inconvenientes en la línea y el flujo de proceso.

### Modelo de control de proceso del trillado de café pergamino

En la elaboración de los modelos de control de proceso se referencia el proceso (trillado de café) el cual se compone de: Dos (2) etapas de proceso, once (11) operaciones de proceso y dieciséis (16) acciones de proceso. Como modelos de control de procesos en la línea de trillado de café en la empresa SUPRACAFÉ S.A. se referencian las labores a ejecutar, ver Figura 13.

| Proceso          | Etapas de proceso  | Operaciones de proceso                  | Acciones de proceso  |
|------------------|--|---|--|
| Trillado de café | Trillar café pergamino   | Transportar café pergamino              | Suministrar sacos de 40kg de café pergamino con humedad de 10-12% (operario)                                   |
|                  |  |   | Elevar café pergamino a potencia máxima de la motobomba hacia el filtro de impurezas                           |
|                  |  | Filtrar impurezas                       | Limpiar de cisco y demás elementos no pertenecientes al flujo de materia prima                                 |
|                  |  | Descascarar café pergamino              | Encender motor asociado al pistón de la trilladora   |
|                  | Encender extractor de pergamino con potencia máxima de motobomba |   |  |
|                  | Clasificar café verde  | Seleccionar café verde                  | Encender motor asociado a la bandeja de la criba densimétrica, para separar café verde de café pergamino       |
|                  |  | Clasificar café verde por peso          | Encender motobomba asociada a la catadora para clasificación de café verde, descartando liviano y muy livianos |
|                  |  | Clasificar café verde óptimo por tamaño | Encender motor asociado a la vibración del monitor de almendra para filtrar granos de 0.9-1.3mm                |

|  |  |                                |  |
|--|--|--------------------------------|--|
|  |  | Transportar café verde idóneo  | Encender motor asociado al tornillo sin fin para alimentar la pulidora con café verde idóneo                                       |
|  |  | Pulir café verde idóneo        | Encender motor asociado a la pulidora para retirar la episperma de los granos de café  |
|  |  |                                | Activar extractor de residuos de pulido asociado a la motobomba  |
|  |  | Transportar café verde limpio  | Encender motor asociado al elevador de cangilones para alimentar la tolva de la mesa densimetría                                   |
|  |  | Clasificar café verde limpio   | Encender motobomba asociada a la mesa densimetría para producir un flujo de aire y evitar atascamiento del café verde excelso.     |
|  |  |                                | Encender motor asociado a la vibración de la mesa densimetría para la obtención, por densidad, de los granos de café verde excelso |
|  |  |                                | Encender motor asociado a la realimentación de granos de café poco densos, descartados en la mesa densimetría                      |
|  |  | Transportar café verde excelso | Desplazar sobre la banda transportadora el flujo de café verde excelso para selección manual final                                 |

Figura 13. Modelo de control de proceso de elaboración de café trillado, Unidad I. Fuente propia.

La Figura 12, junto con la Figura 13, recoge las principales características identificadas en la línea y flujo de proceso de la planta de trillado de SUPRACAFE COLOMBIA S.A., con lo estipulado en el estándar ISA 88 como herramienta. El modelo físico del proceso recoge la información pertinente a la línea de proceso, enfocado en la maquinaria que conforma la planta de trillado; por otra parte, los modelos de control procedimental y control de proceso brindan la información referente al flujo de proceso y las características del mismo en el desarrollo de la actual producción de café excelso realizada por SUPRACAFE COLOMBIA S.A.

### **P&ID del proceso de trillado de café pergamino**

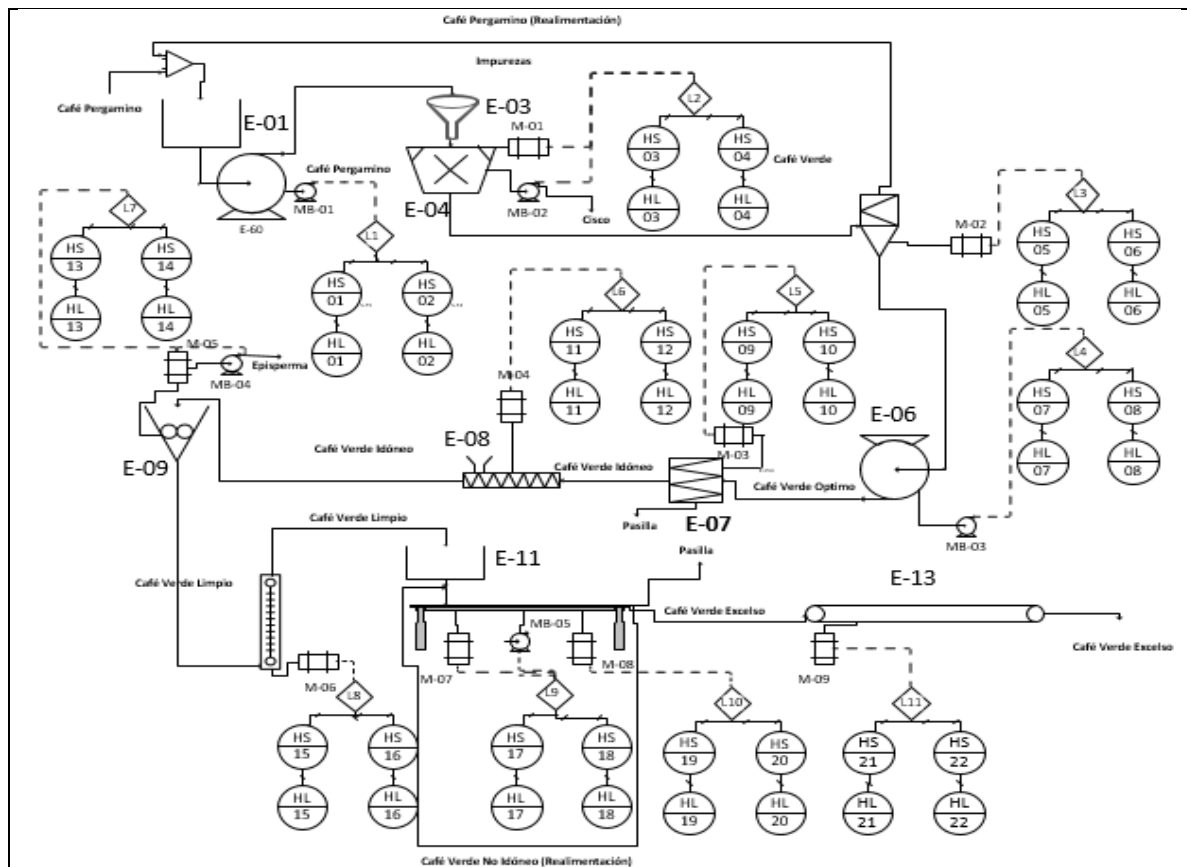
Dentro de cualquier proceso industrial se puede levantar un esquema donde se registra toda la instrumentación sobre un diagrama de flujo de proceso previamente consolidado, denominado diagrama P&ID (Piping/Process and instrumentación Diagram) o Diagrama de proceso e instrumentación de la planta. Este diagrama en cuestión permite asociar cada elemento de medición y control a un código al que comúnmente se denomina "Tag" del instrumento, regulado por un lenguaje estandarizado [8].

Un diagrama P&ID muestra las partes principales del proceso como recipientes, líneas y maquinaria, pero con la instrumentación asociada, mostrando las variables manipuladas y controladas en cada sección del proceso representado. En un P&ID



se observa el flujo del proceso, al igual el “flujo” de información entre la instrumentación y control del proceso [8].

Los sistemas de control de procesos se representan en diagramas P&ID utilizando símbolos normalizados. Se representa dentro de ellos: instrumentación, tuberías, bombas, motores y otros elementos auxiliares, en este caso específicamente, los asociados a la línea de trillado en la empresa SUPRACAFE COLOMBIA S.A., ver Figura 14.



| Tags  | Descripción                  | In       | Out               | SP |
|-------|------------------------------|----------|-------------------|----|
| HS-0X | Interruptor manual           | -        | Abierto/Cerrado   | -  |
| HL-0X | Luz piloto                   | -        | Encendida/Apagada | -  |
| MB-01 | Motobomba elevador neumático | 220-440V | 3420 rpm          | -  |
| M-01  | Motor trilladora             | 220-440V | 1730 rpm          | -  |
| MB-02 | Motobomba de impurezas       | 220-440V | 1730 rpm          | -  |
| M-02  | Motor criba                  | 220-440V | 1700 rpm          | -  |
| MB-03 | Motobomba Venturi            | 220-440V | 1730 rpm          | -  |
| M-03  | Motor monitor                | 220-440V | 1700 rpm          | -  |

|       |                             |                               |                      |   |
|-------|-----------------------------|-------------------------------|----------------------|---|
| M-04  | Motor tornillo sin fin      | 220-440V                      | 1700 rpm             | - |
| M-05  | Motor pulidora              | 220-440V                      | 1730 rpm             | - |
| MB-04 | Motobomba de pulido         | 220-440V                      | 3425 rpm             | - |
| M-06  | Motor elevador cangilones   | 220-440V                      | 1700 rpm             | - |
| M-07  | Motor vibración mesa        | 220-440V                      | 1710 rpm             | - |
| M-08  | Motor realimentación mesa   | 220-440V                      | 1730 rpm             | - |
| MB-05 | Motobomba mesa densimetrica | 220-440V                      | 1675 rpm             | - |
| M-09  | Motor banda                 | 220-440V                      | 1750 rpm             | - |
| E-01  | Tolva inicial               | Café pergamino                | Café pergamino       | - |
| E-02  | Elevador neumático          | Café pergamino 10-12% humedad | Café pergamino       | - |
| E-03  | Filtro de impurezas         | Café pergamino                | Impurezas            | - |
| E-04  | Trilladora                  | Café pergamino                | Café verde           | - |
| E-05  | Criba densimetrica          | Café verde                    | Café verde           | - |
| E-06  | Catadora                    | Café verde                    | Café verde optimo    | - |
| E-07  | Monitor de almendra         | Café verde optimo             | Café verde 0.9-1.3mm | - |
| E-08  | Tornillo sin fin            | Café verde idóneo             | Café verde idóneo    | - |
| E-09  | Pulidora                    | Café verde idóneo             | Café verde limpio    | - |
| E-10  | Elevador de cangilones      | Café verde limpio             | Café verde limpio    | - |
| E-11  | Tolva de mesa densimetrica  | Café verde limpio             | Café verde limpio    | - |
| E-12  | Mesa densimetrica           | Café verde limpio             | Café verde excelso   | - |
| E-13  | Banda transportadora        | Café verde excelso            | Café verde excelso   | - |

Figura 14. Diagrama P&ID de la línea de trillado de café excelso en la empresa caso de estudio.  
Fuente propia

Analizando el P&ID de la Figura 14 se observa que no hay presencia de lazos de control dentro de los módulos de equipo ni entre ellos, básicamente la instrumentación presente en cada módulo es instrumentación de encendido y apagado manual, por lo que el control secuencial de cada una de las fases es responsabilidad de uno o dos operarios que se encuentran tanto monitoreando como supervisando el normal desarrollo del proceso.

Dentro del desarrollo del diagnóstico, se efectúa una encuesta al personal de la empresa que está relacionado al proceso de trilla del café: en este caso (2) dos ingenieros de producción, (1) un operario y (1) un jefe encargado de la línea, con el fin de capturar información puntual y relevante para lograr la debida obtención de los requerimientos del proyecto.

En el desarrollo de la encuesta se recurrió a la percepción de la línea de trillado desde los modelos planteados y aprobados, y con uso de terminología técnica conocida para el entendimiento del personal encuestado. Las opiniones logradas quedaron registradas en grabaciones, y las respuestas concretas fueron plasmadas en documentos digitales dentro del Anexo Digital A. A continuación, se presenta el consolidado de información suministrado para la realización de la encuesta.

**Encuesta y diagnóstico de conocimiento de la línea de trillado de café en SUPRACAFE COLOMBIA S.A.**

**Nivel de dificultad de la labor (Complejidad)**

La línea de trillado de café instalada en la empresa SUPRACAFE COLOMBIA S.A se hizo necesaria a partir de los requerimientos de calidad solicitados por la empresa para la competencia en el mercado internacional de café excelso y altos estándares de café nacional. Para la definición de la dificultad del desarrollo del proceso se entrevistó al personal operario de la línea y a los ingenieros de producción, ya que este recurso humano cuenta con el conocimiento idóneo de la labor, ver Figura 15a.

Las preguntas realizadas “¿Considera Ud que existe complejidad en el desarrollo del trabajo en los módulos propuestos dentro de la línea de trillado?”, “¿Hay algún procedimiento dentro de la línea que podría ser desarrollados de manera más sencilla?” comprenden orientación hacia cada módulo expresado del proceso, y da vía libre para la formulación de respuestas que aportan comentarios de apoyo que pudiesen ser de gran ayuda.

En general, se hace un registro de 6 módulos de equipo y accesorios de la unidad de calificación ponderada baja y otros 6 de calificación media, ver Figura 15b.

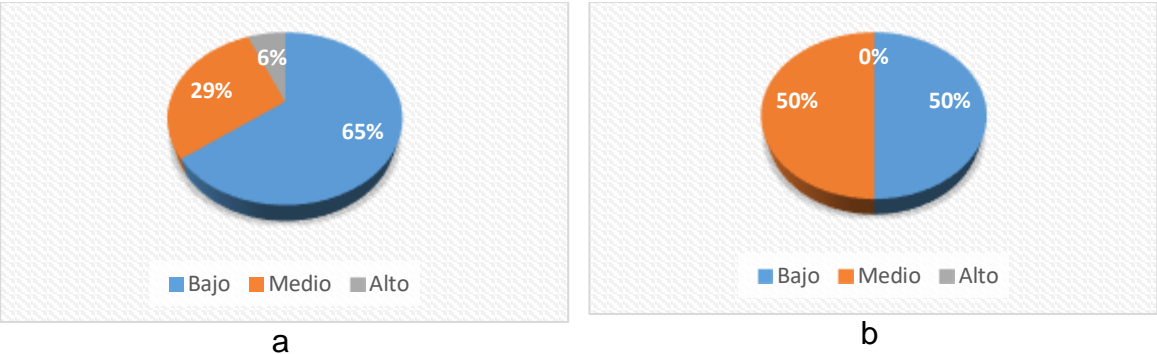


Figura 15. a) Resultados de “Nivel de dificultad de la labor (Complejidad)” - b) Resultados para media ponderada de “Nivel de dificultad de la labor (Complejidad)”

## Nivel de riesgo (Esfuerzo físico)

Dentro de la encuesta realizada se profundizó el área de riesgo o esfuerzo físico que deben soportar los operarios dentro de la línea de trillado de café. En esta parte de la encuesta se entrevistó de nuevo a todo el personal mencionado, ya que los operarios están involucrados directamente en la línea de proceso, y los ingenieros de producción deben supervisar que se conserve la integridad física del personal dentro de la empresa, ver Figura 16a.

Las preguntas realizadas a los encuestados “¿Hay lugares dentro del proceso que presentan algún riesgo o problema para desarrollar?”, “¿Cree Ud que su labor en el proceso puede perjudicar en algún grado su salud integral?”, “¿Hay procedimientos dentro de la línea que podrían ser desarrollados de manera más segura?” brindan la facilidad de aportar comentarios que ayuden a la apreciación de la respuesta y extender su opinión.

De los 12 módulos expresados para la línea de trillado, se da una calificación ponderada de 4 con calificación de riesgo medio y los demás 8 módulos expresados con calificación baja, ver Figura 16b.

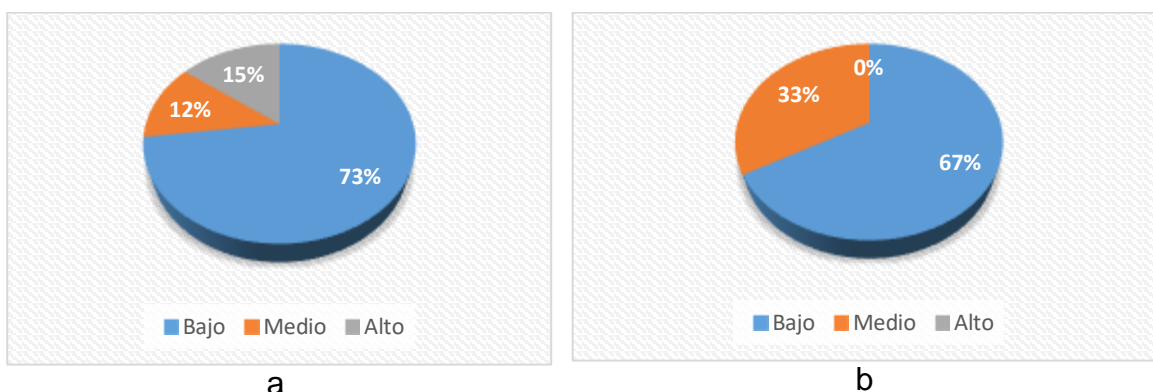


Figura 16. a) Resultados de “Nivel de riesgo (Esfuerzo físico)” – b) Resultados para media ponderada de “Nivel de riesgo (Esfuerzo físico)”

## Nivel de automatización del proceso

La línea de trillado se considera automatizada por parte de la información suministrada por los ingenieros en reuniones previas, pero se desea consolidar información con respecto a este ítem a lo que se recurre a entrevistar al mismo personal mencionado previamente con las preguntas “¿El desarrollo de su labor va más allá de supervisar el proceso?”, “¿Qué tanto contacto tiene Ud con la maquinaria y/o con el café dentro del proceso?” que complementan la respuesta directa plasmadas en el consolidado, ver Figura 17a.

Concluyendo la evaluación de las respuestas, 6 módulos expresados en la línea de trillado se consideran automatizados, 2 se consideran manuales y los 4 restantes se clasifican como semi-automáticos, ver Figura 17b.

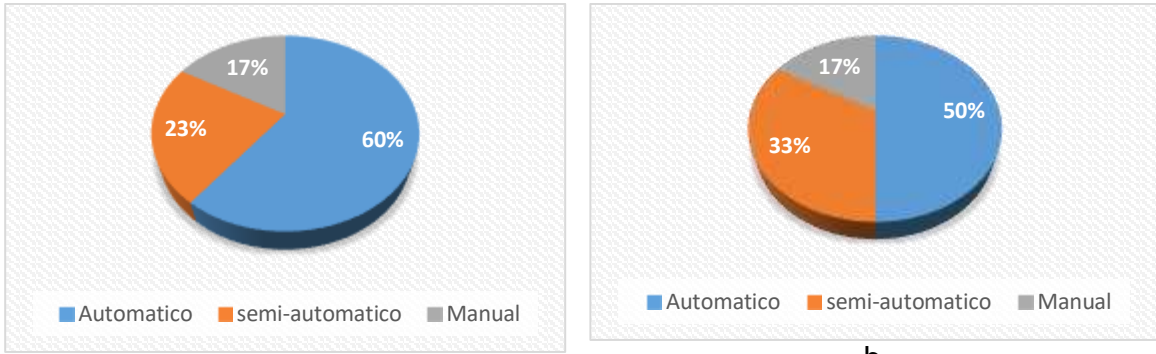


Figura 17. a) Resultados de "Nivel de automatización del proceso" – b) Resultados para media ponderada de "Nivel de automatización del proceso"

### Nivel de documentación

La documentación de un proceso es indispensable para la comprensión del funcionamiento del mismo, esto debido a que deben soportarse las labores a desarrollar en medios físicos o digitales reglamentados. Aunque el proceso de elaboración de café, en el territorio colombiano, se considera como producción artesanal y los procesos se comparten y mejoran por conocimientos empírico, el ideal de la actualidad es optimizar los procesos de la elaboración de café, entre los cuales se encuentra el proceso en cuestión de trillado de café excelso.

Se realizaron preguntas concretas al jefe de línea de trillado y los ingenieros de producción para el conocimiento de su posición frente a la documentación referente a la línea de trillado en SUPRACAFÉ S.A., ver Figura 18, Figura 19, Figura 20 y Figura 21.

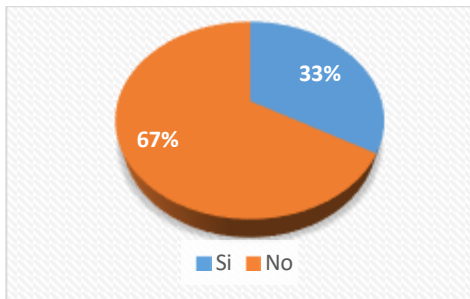


Figura 18. Grafica de resultados de la pregunta "¿Cuenta la empresa con manuales referentes al proceso?"

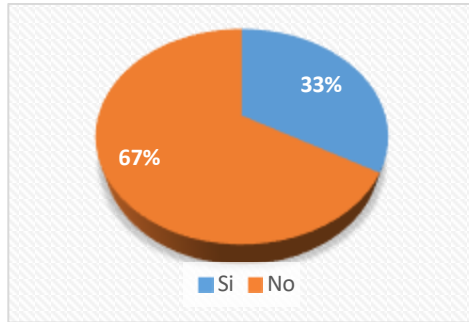


Figura 19. Grafica de resultados de la pregunta “¿Cuenta la empresa con los manuales de la maquinaria instalada?”

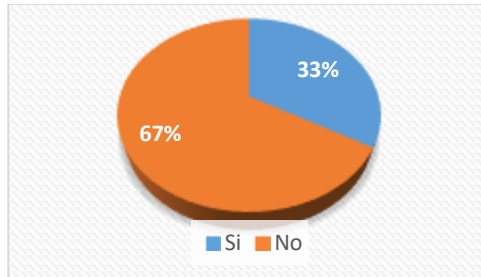


Figura 20. Grafica de resultados de la pregunta “¿Hay plan de ejecución para emergencias e imprevistos?”



Figura 21. Grafica de resultados de la pregunta “¿Hay un consolidado de información previa y posterior sobre el material utilizado en el proceso?”

### **Mantenimiento de las líneas**

El mantenimiento de un proceso es indispensable para el correcto funcionamiento del mismo, esto debido a que se debe optar por la integridad de la maquinaria con el desarrollo de limpiezas que cumplan objetivos preventivos y correctivos.

Se realizaron preguntas concretas al jefe de línea de trillado y los ingenieros de producción para el conocimiento de su posición frente al mantenimiento referente a la línea de trillado en SUPRACAFÉ S.A., ver Figura 22 y Figura 23.

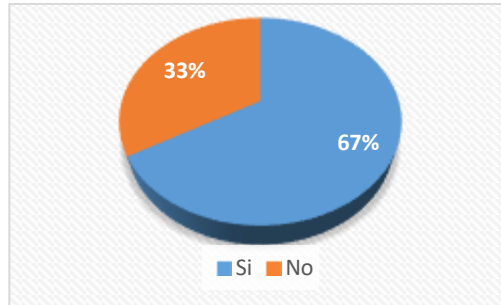


Figura 22. Grafica de resultados de la pregunta “¿Cuenta la empresa con el conocimiento de cómo realizar el mantenimiento de la línea?”

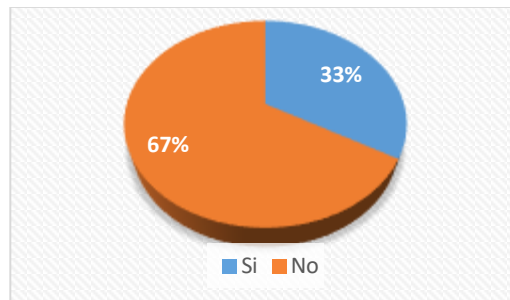


Figura 23. Grafica de resultados de la pregunta “¿Cuenta la empresa con los manuales de la maquinaria instalada?”

### Enfrentamiento de respuestas: Nivel de dificultad, Nivel de riesgo y Nivel de automatización

Con el consolidado de información, y al enfrentar las respuestas de la encuesta, se aprecia que en los módulos de equipo y accesorios de la unidad que comprenden desarrollo de operaciones manuales poseen niveles de dificultad y riesgo elevado en comparación a los demás módulos de la línea de trillado, ver Figura 24.

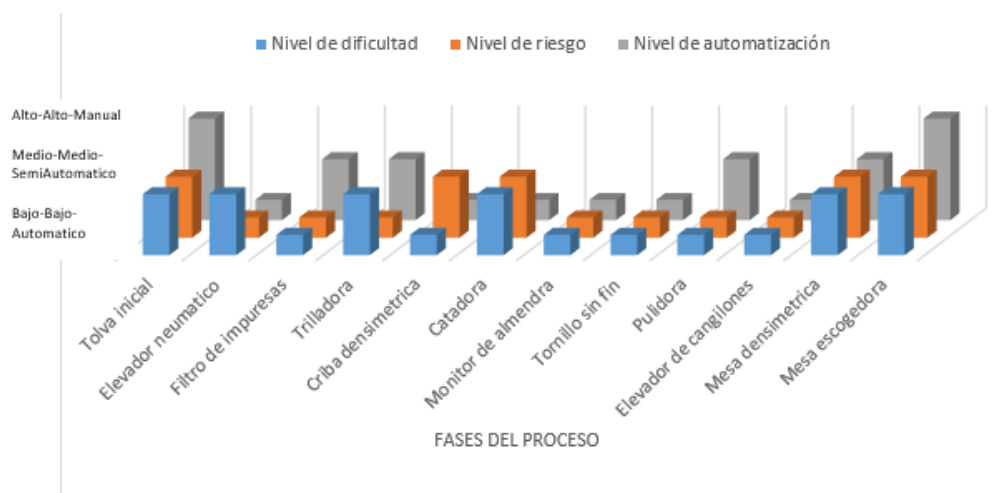


Figura 24. Grafica de barras por niveles encuestados “Enfrentamiento de respuestas”

Con el consolidado de módulos de equipo presentes en los modelos ISA 88, maquinaria instalada y opiniones obtenidas en las entrevistas sobre en el proceso, y buscando el ideal de tener la información relevante para un correcto desarrollo del proyecto, se debe conocer todo lo relacionado a la demanda energética de la línea de trillado, condiciones eléctricas de la instalación y registros de consumo general de la planta de producción en general. Como herramienta para alcanzar lo expresado, se aplica dentro de la línea de proceso una auditoria energética.

### **1.3.3 Auditoria energética**

La Auditoría Energética (AE) se define como un proceso sistemático mediante el cual se obtiene un conocimiento confiable del consumo energético de la empresa para detectar los factores que afectan este consumo e identificar, evaluar y ordenar las distintas oportunidades de ahorro en función de su rentabilidad. Dichas auditorias se clasifican en niveles de acuerdo a su complejidad y detalle de aplicación [9].

Debido al grado de complejidad del proyecto, y los factores involucrados a analizar, es viable la realización de una auditoria preliminar o “diagnóstico eléctrico energético”, esto comprendido en el nivel 1 de la aplicación de auditorías energéticas. A continuación se presentan el desarrollo de la AE mencionada.

#### **Diagnóstico Energético**

El diagnóstico energético eléctrico se implementa en la planta de producción de café trillado en la empresa SUPRACAFE COLOMBIA S.A, con el fin de identificar las mejoras de desempeño energético en la línea de trillado instalada. De acuerdo a la AE nivel 1, el procedimiento implica identificar los equipos de mayor consumo energético mediante la sectorización de consumos parciales para así tomar acciones correctivas de aplicación inmediata y de baja inversión en su implementación [9]. Para lo cual se desarrollan las siguientes acciones:

- Balance energético general
- Identificación del uso significativo de la energía

Lo que permitirá identificar el compromiso energético asociado a los motores en el proceso de trillado de café y los puntos críticos de operación.

#### **Balance energético general de la empresa**

El comportamiento del consumo energético de la empresa caso de estudio se logra observar al realizar una gráfica con base al historial de consumo registrado en las facturas del consumo de energía eléctrica, dado desde las fechas del último mes del año 2014 hasta el segundo mes del año 2016.

Dentro del consolidado de información, se presenta la recopilación de los datos de consumo brindado por los directivos de la empresa caso de estudio, ver Tabla 2. La Compañía Energética de Occidente despliega en sus recibos el consumo generado



por la hacienda Los Naranjos además de especificar otros valores que no son relevantes para este estudio.

| DESDE      | HASTA      | CONSUMO (kWh) | VALOR           |
|------------|------------|---------------|-----------------|
| 13/12/2014 | 14/01/2015 | 1558          | \$ 696,900.00   |
| 15/01/2015 | 11/02/2015 | 960           | \$ 472,300.00   |
| 17/02/2015 | 17/03/2015 | 1082          | \$ 543,700.00   |
| 18/03/2015 | 16/04/2015 | 1447          | \$ 731,400.00   |
| 17/04/2015 | 16/05/2015 | 2199.5        | \$ 1,081,800.00 |
| 17/05/2015 | 16/06/2015 | 7249          | \$ 2,892,300.00 |
| 17/06/2015 | 16/07/2015 | 5621.5        | \$ 2,471,200.00 |
| 17/07/2015 | 18/08/2015 | 2414          | \$ 1,268,300.00 |
| 19/08/2015 | 18/09/2015 | 3000.25       | \$ 1,287,900.00 |
| 19/09/2015 | 17/10/2015 | 1728.5        | \$ 871,000.00   |
| 18/10/2015 | 16/11/2015 | 2152.5        | \$ 1,105,900.00 |
| 17/11/2015 | 16/12/2015 | 1279          | \$ 720,200.00   |
| 17/12/2015 | 16/01/2016 | 2226          | \$ 1,284,800.00 |
| 17/01/2016 | 16/02/2016 | 2057.5        | \$ 1,073,900.00 |
| 17/02/2016 | 16/03/2016 | 2037.5        | \$ 1,154,200.00 |
| 17/03/2016 | 15/04/2016 | 1077          | \$ 656,500.00   |
| 16/04/2016 | 16/05/2016 | 2899.5        | \$ 1,145,000.00 |
| 17/06/2016 | 16/07/2016 | 3817.5        | \$ 5,061,700.00 |
| 17/07/2016 | 16/08/2016 | 1488.5        | \$ 856,100.00   |
| 17/08/2016 | 15/09/2016 | 0.0           | \$ 0.00         |
| 16/09/2016 | 17/10/2016 | 1402.5        | \$ 838,500.00   |
| 18/10/2016 | 17/11/2016 | 1460.5        | \$ 907,600.00   |
| 18/11/2016 | 17/12/2016 | 2715.5        | \$ 1,529,500.00 |

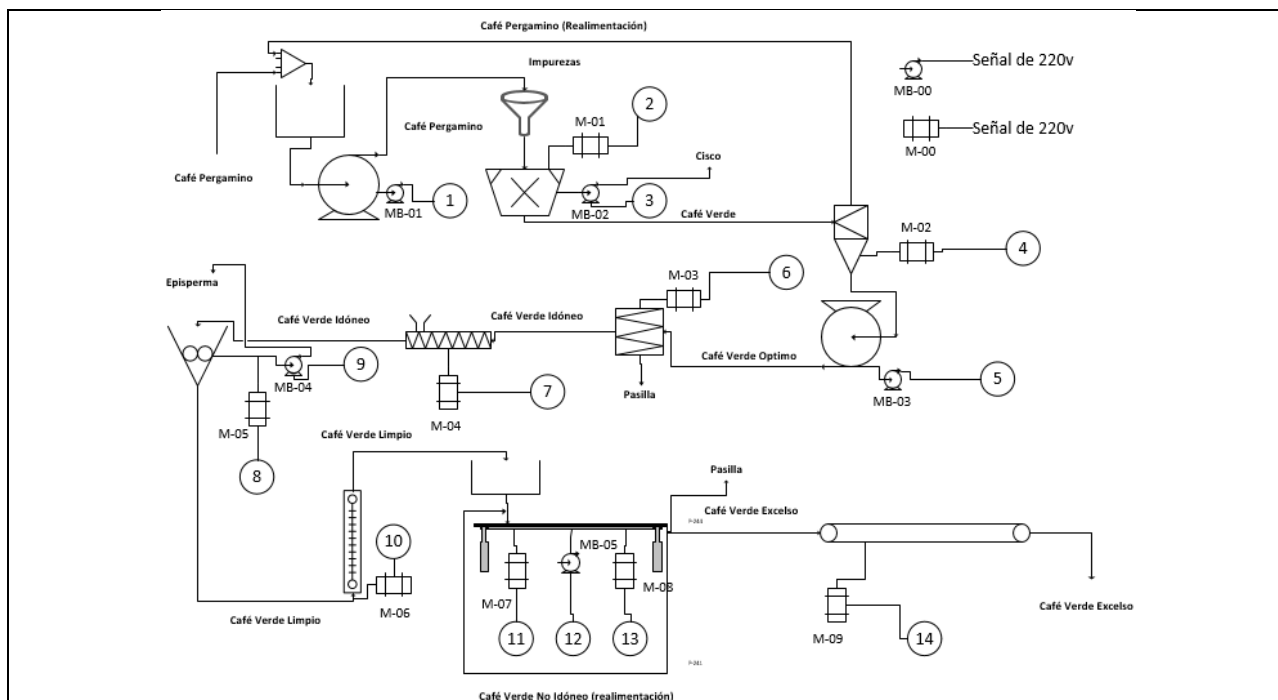
Tabla 2. Consumo eléctrico de la Hacienda Los Naranjos [5]

Es relevante incluir las fechas de los recibos de consumo eléctrico ya que de acuerdo al ingeniero Javier Hoyos, los meses que es de uso obligatorio la línea de trillado, empiezan desde Mayo hasta Noviembre, con excepciones no muy usuales.

La información presentada en Tabla 2 consolida los recibos con los que cuenta actualmente la empresa, ya que tuvieron inconvenientes al momento de la compra de la Hacienda Los Naranjos, por lo que no se presentan registros del inicio de instalación y sus primeros meses de funcionamiento.

Para estimar el consumo eléctrico de la línea primero se asume que esta procesara un lote de 24000kg de café pergamino en un lapso de 15 días de operación con un compromiso diario de 10 horas, por lo cual se constatan los valores necesarios para obtener el dato teórico de consumo eléctrico mensual de cada uno de los motores existentes en la línea de trillado en los tiempos y las condiciones mencionadas, ver

Tabla 3. El consumo eléctrico mensual se calcula con la fórmula de consumo energético, ver Anexo C.



| ID | Motores asociados a módulos de equipo y accesorios de la unidad | Voltaje (V) | Corriente (A) | Horas | Días | Factor Eficiencia | Factor Potencia | Consumo Mensual (kWh) |
|----|---|-------------|---------------|-------|------|-------------------|-----------------|-----------------------|
| 1  | Motor tolva (motobomba tolva)                                   | 220         | 1.3           | 10    | 15   | 0.625             | 0.85            | 22.790625             |
| 2  | Motor Trilladora  | 220         | 7             | 10    | 15   | 0.625             | 0.81            | 116.94375             |
| 3  | Motor basura trilladora (Motobomba de impurezas)                | 220         | 3.3           | 10    | 15   | 0.625             | 0.8             | 54.45                 |
| 4  | Motor Criba   | 220         | 1             | 10    | 15   | 0.625             | 0.71            | 14.64375              |
| 5  | Motor catadora (Motobomba Venturi)                              | 220         | 3.7           | 10    | 15   | 0.625             | 0.8             | 61.05                 |
| 6  | Motor monitor almendra  | 220         | 1             | 10    | 15   | 0.625             | 0.71            | 14.64375              |
| 7  | Motor tornillo sin fin  | 220         | 1             | 10    | 15   | 0.625             | 0.71            | 14.64375              |
| 8  | Motor pulidora  | 220         | 7             | 10    | 15   | 0.625             | 0.81            | 116.94375             |
| 9  | Motor basura pulidora (Motobomba de pulido)                     | 220         | 1.9           | 10    | 15   | 0.625             | 0.75            | 29.390625             |
| 10 | Motor elevador cangilones                                       | 220         | 1.1           | 10    | 15   | 0.625             | 0.71            | 16.108125             |
| 11 | Motor mesa densidad (Motobomba mesa)                            | 220         | 7.8           | 2     | 15   | 0.625             | 0.79            | 25.41825              |

|    |  |     |     |   |    |       |      |          |
|----|--|-----|-----|---|----|-------|------|----------|
| 12 | Motor mesa densidad (Motor vibración mesa) | 220 | 0.8 | 2 | 15 | 0.625 | 0.8  | 2.64     |
| 13 | Motor realimentación mesa                  | 220 | 1.2 | 2 | 15 | 0.625 | 0.75 | 3.7125   |
| 14 | Motor banda escogedora                     | 220 | 0.5 | 2 | 15 | 0.625 | 0.95 | 1.959375 |

Tabla 3. Valores de alimentación y consumo energético referenciado a módulos de equipo y accesorios en la línea de trillado. Fuente propia

Se identificaron catorce (14) motores en la línea de trillado instalada en la empresa SUPRACAFE COLOMBIA S.A., donde en cada uno se ha identificado que opera a un voltaje de 220V AC, con una corriente determinada por el flujo de proceso involucrada y medida por el jefe de línea, al igual que las horas de compromiso de cada motor listado; de la misma planta se calcula el factor de eficiencia generado por los tiempos útiles de producción y es avalado por la directiva de la empresa, ver Tabla 3. El factor de potencia mencionado se obtiene de la revisión de los valores de placa en cada motor listado. En la última columna se registra el consumo energético mensual de cada motor en la línea de trillado para los 24000 kg procesados de café pergamino.

### Identificación del uso significativo de la energía

El consumo de los 14 motores de la línea de trillado se consolida en relaciones porcentuales, donde se observe el compromiso del consumo energético de la totalidad de la línea actual instalada en la empresa por motor, ver Figura 25.

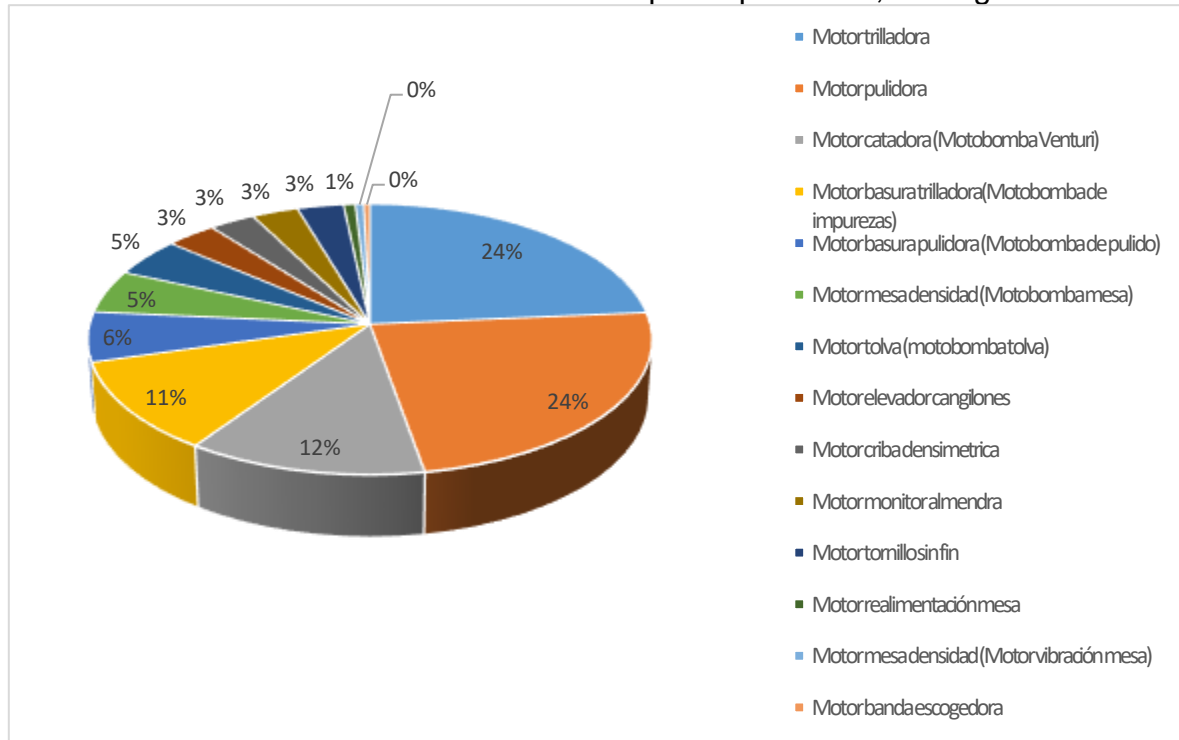


Figura 25. Relación porcentual del consumo energético de los motores en la línea actual de trillado. Fuente propia

Como parte del análisis del consumo energético de la línea de trillado actual representado en la Figura 25, se concluye que aproximadamente el 71% del consumo está representado por cuatro (4) motores: el motor trilladora con un 24%, el motor pulidora con 24%, la motobomba en la catadora con un 12% y la motobomba de impurezas con 11%. El restante 30% asociado al consumo eléctrico se reparte en los otros diez (10) motores de la línea. Los dos motores al inicio de la lista de Figura 25, motor trilladora y motor pulidora, representan el 47.21% del consumo total de la línea de producción, por lo que sería importante considerar prácticas de EE que consideren mitigar el impacto energético en estos cuatro puntos de la línea de trillado, si fuese el caso que obedecen a consumos fuera de lo normal.

Por sumatoria total de los valores de consumo referente a Tabla 3 se estima que el consumo de la línea de trillado mensualmente es un aproximado de 495.34 kWh, con una producción de 19800 kg de café excelso y un compromiso de 10 horas diarias de operación, en el lapso de tiempo definido para el procesamiento de la materia prima.

Mediante el análisis de las facturas, sin el uso de la línea de trillado, se aprecia que el valor de consumo eléctrico de la hacienda no supera un valor base de 900 kWh/mes. Con valores nominales de placa de cada motor instalado en línea, y haciendo uso de la fórmula de consumo energético, se concluye que el valor de consumo energético dado por la hacienda Los naranjos, y la línea de trillado en su máxima expresión de funcionamiento, da un valor de 1700 kWh/mes. Como se aprecia en la Tabla 2, hay valores de consumo facturado superiores a la incorporación de la línea de trilla en el proceso general de la obtención de café excelso, los cuales generan una distribución estadística muy dispersa, ver Tabla 4.

| <b>Con datos superiores a 1700 kWh</b> |            |
|--|------------|
| <b>Promedio de consumo</b>             | 3086.05769 |
| Varianza                               | 2610190.52 |
|  |            |
| Valor mínimo                           | 1728.5     |
| Mediana                                | 2414       |
| Valor máximo                           | 7249       |
|  |            |
| Rango entre medidas                    | 5520.5     |

Tabla 4. Distribución estadística con valores de consumo superior a 1700kWh

Se obtuvo un rango muy amplio entre medidas, por lo que la selección de datos tan dispersos no daría una buena referencia para las medidas realizadas y cualquier cambio dentro del diseño de la línea no se apreciaría como eficiencia energética dentro del gran espacio de valores donde se mueve.

Para obtener valores con mayor cercanía a la realidad de la producción general con la incorporación de la línea de trillado, se sesga la referencia de la información recopilada de consumo a valores que no superen los 3000 kWh en toda la hacienda

que comprende las instalaciones de producción, debido a que según lo observado en las facturaciones de la hacienda, al superar dicho valor se relacionaban valores y cobros ajenos a operación y producción, ver Tabla 5.

| <b>Con datos entre 1700 kWh y 3000 kWh</b> |            |
|--|------------|
| <b>Promedio de consumo</b>                 | 2270.05556 |
| Varianza                                   | 128577.965 |
| Valor mínimo                               | 1728.5     |
| Mediana                                    | 2199.5     |
| Valor máximo                               | 2899.5     |
| Rango entre medidas                        | 1171       |

Tabla 5. Distribución estadística con valores de consumo entre 1700kWh y 3000kWh

Con la aclaración de las características de selección de valores referentes al consumo eléctrico, se enfatiza que en la hacienda Los Naranjos también se cumple con la ejecución de varios procesos productivos, como: despulpado, fermentado, secado, trillado y empaquetado para el proceso de obtención de café pergamino, e iluminación, equipos de oficina y otros para procesos administrativos.

Con la información recopilada se aprecia, con referencia a la mediana, que la línea de trillado comprende el 22.52% del consumo total de la hacienda, dividido en la totalidad de los módulos de equipo que la conforman, dejando el restante consumo eléctrico a los procesos mencionados en las demás instalaciones, ver Figura 26.

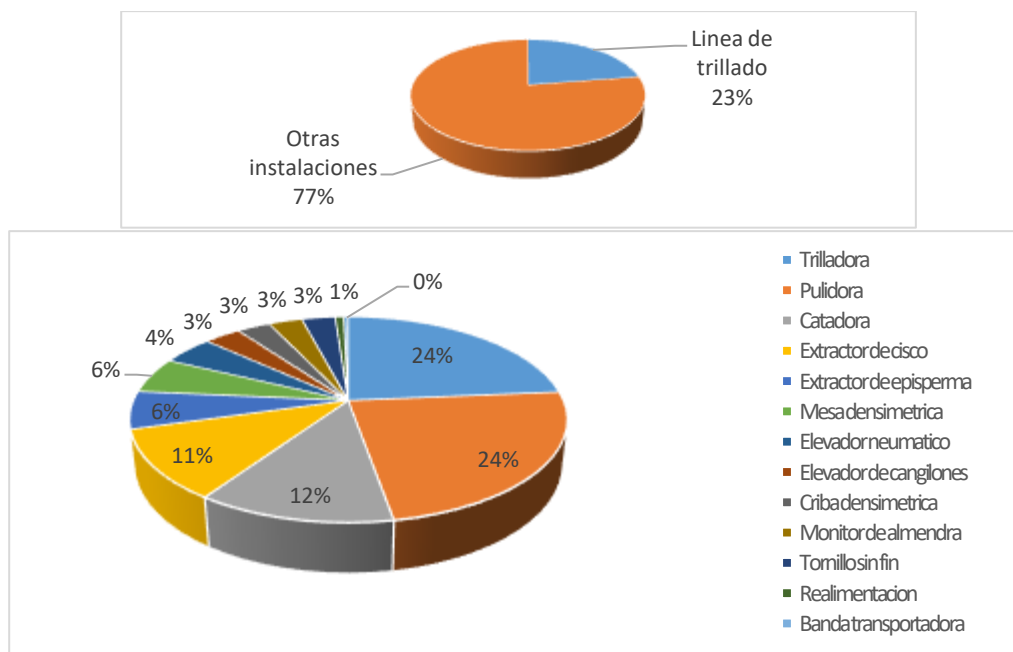


Figura 26. Porcentaje de consumo energético de la línea de trillado de café actual y módulos de equipo en la empresa SUPRACAFE COLOMBIA S.A. Fuente propia.

La apreciación porcentual de los módulos de equipo relacionados a la línea de trillado en la Figura 26, brindan un compromiso semejante al observado en el consumo energético consignado en la Figura 25 debido a que cada motor está asociado a su respectivo módulo de equipo. Las variaciones observadas entre los porcentajes de los motores y los módulos de equipo se debe a que algunos módulos comprenden varios motores, como es el caso del módulo Mesa densimétrica donde se encuentran dos (2) motores.

Estos datos estimados de consumo de los módulos de equipo pertenecientes a la línea de trillado, como los valores porcentuales referentes a la hacienda Los Naranjos fueron contextualizados con las directivas de empresa caso de estudio, e indicaron que son valores aterrizados a lo que normalmente sucede en producción, dando así validez a la información recopilada y posterior continuidad del proyecto.

Con el conocimiento energético de operación de la línea de trillado, se procede a evaluar la rentabilidad del proceso, por lo que funcionalmente la línea comprende valores de eficiencia representados formalmente con el uso de corriente asociada a cada motor en comparación a su valor nominal, dado por el fabricante, ver Tabla 6.

| <b>Motor en línea de trillado</b> | <b>Corriente en placa (A)</b> | <b>Corriente medida en operación (A)</b> | <b>Eficiencia del motor (%)</b> |
|-----------------------------------|-------------------------------|--|---------------------------------|
| Motor Tolva                       | 2.95                          | 1.3                                      | 44.067                          |
| Motor Trilladora                  | 14                            | 7  | 50                              |
| Motor basura Tolva                | 5.9                           | 3.3                                      | 55.932                          |
| Motor Criba                       | 1.92                          | 1  | 52.083                          |
| Motor Venturi                     | 5.9                           | 3.7                                      | 62.711                          |
| Motor Monitor Almendra            | 1.92                          | 1  | 52.083                          |
| Motor Tornillo Sinfín             | 1.92                          | 1  | 52.083                          |
| Motor Pulidora                    | 14                            | 7  | 50                              |
| Motor basura Pulidora             | 3                             | 1.9                                      | 63.333                          |
| Motor elevador Cangilones         | 1.92                          | 1.1                                      | 57.291                          |
| Motor Mesa Densidad (Aire)        | 8.6                           | 7.8                                      | 90.697                          |
| Motor Mesa Densidad (Oscilación)  | 5.9                           | 0.8                                      | 13.559                          |
| Motor realimenta Mesa             | 2.62                          | 1.2                                      | 45.801                          |
| Motor Banda Escogedora            | 5                             | 0.5                                      | 10                              |

Tabla 6. Eficiencia de motores instalados en línea de trillado de SUPRACAFE COLOMBIA S.A.

Con lo consignado en Tabla 6, se observa que los motores instalados en la línea de trillado no operan en valores cercanos al valor nominal consignado en placa, hecho que significa la no operación idónea del motor.

En la actualidad, la línea de trillado se encuentra en disposición de procesar 24000kg de café pergamino, en el cumplimiento de la demanda mensual de 19800kg de café verde excelso. Dicha producción genera un compromiso por hora

estimado, al igual que valores idóneos en el caso de obtener una eficiencia máxima en cada motor, ver Tabla 7.

| <b>Motor en línea de trillado</b> | <b>Eficiencia del motor (%)</b> | <b>Horas</b> | <b>Producción por hora actual (kg/h)</b> | <b>Producción por hora en máxima eficiencia (kg/h)</b> |
|-----------------------------------|---------------------------------|--------------|--|--|
| Motor Tolva                       | 44.06                           | 10           | 160                                      | 363.08   |
| Motor Trilladora                  | 50.00                           | 10           | 160                                      | 320.00   |
| Motor basura Tolva                | 55.93                           | 10           | 160                                      | 286.06   |
| Motor Criba                       | 52.08                           | 10           | 160                                      | 307.20   |
| Motor Venturi                     | 62.71                           | 10           | 160                                      | 255.13   |
| Motor Monitor Almendra            | 52.08                           | 10           | 160                                      | 307.20   |
| Motor Tornillo Sinfín             | 52.08                           | 10           | 160                                      | 307.20   |
| Motor Pulidora                    | 50.00                           | 10           | 160                                      | 320.00   |
| Motor basura Pulidora             | 63.33                           | 10           | 160                                      | 252.63   |
| Motor elevador Cangilones         | 57.29                           | 10           | 160                                      | 279.27   |
| Motor Mesa Densidad (Aire)        | 90.69                           | 2            | 800                                      | 882.05   |
| Motor Mesa Densidad (Oscilación)  | 13.55                           | 2            | 800                                      | 5900.14  |
| Motor realimenta Mesa             | 45.80                           | 2            | 800                                      | 1746.68  |
| Motor Banda Escogedora            | 10.00                           | 2            | 800                                      | 8000.00  |

Tabla 7. Puntos críticos del proceso de trillado de café verde excelso en la empresa caso de estudio.

Como se observa en Tabla 7. Puntos críticos del proceso de trillado de café verde excelso en la empresa caso de estudio., el punto crítico de producción, con valores máximos en los módulos de equipo, está en el módulo Catadora (Motor venturi) por lo cual se recomienda un ingreso mayor en la materia prima de café pergamino al valor referenciado en la máxima operación de dicho motor (255.13kg) para elevar la eficiencia de los motores al involucrar mayores flujos de proceso, previendo la misma relación entre el consumo energético con la producción final. Los recuadros en color azul, no son pertinentes de comparación ya que se ejecutan con un flujo

elevado, ocasionado por la retención de material en la tolva situada en el módulo Mesa densimétrica.

Con la culminación de los respectivos estudios para recopilar información relevante de la línea de trillado de la empresa caso de estudio y de su representación estandarizada, se procede a concluir el aporte generado sobre la problemática a tratar de cada elemento desarrollado:

### **Análisis general de los modelos ISA S88**

Con la información previa en la descripción del proceso dentro de la empresa SUPRACAFE COLOMBIA S.A. se construyeron los modelos control de proceso, físico y de control procedimiento de ISA S88.01, de los cuales se realiza un estudio general que muestra las características principales de estructuración de la línea de trillado y que permite visualizar problemas de organización en los módulos de equipo dentro del ideal propuesto por los entrevistados y de la visión general de la empresa, quien desarrolló estudios previos dentro de los cuales se plantea la incorporación de maquinaria para mejorar el proceso de trillado y clasificado sin fundamentos energéticos pertinentes a realizar.

### **Análisis general de las entrevistas**

A lo largo de las entrevistas realizadas a los empleados encargados de la línea de trillado de café en la empresa SUPRACAFE COLOMBIA S.A. se pudieron evidenciar falencias generadas dentro del proceso que comprenden las limitaciones de las operaciones cumplidas por los operarios y las áreas que consideran los entrevistados, deberían de presentar mejoras y adecuaciones para un mejor desempeño de la labor.

### **Análisis general del diagnóstico**

Con los resultados generados en el diagnóstico energético se identifican módulos de equipo que representan el mayor porcentaje del consumo de la línea de trillado, donde en un principio se observaron cómo puntos ideales para desarrollar mejoras de alto impacto, basadas en el consumo eléctrico, pero son ubicaciones imprescindibles del proceso y sus consumos corresponden idóneamente a la información de placa, dada por los fabricantes de los motores instalados; de igual manera se obtienen valores generales de compromiso energético para posterior comparación de consumo y así obtener eficiencia en el desempeño energético dentro de la reestructuración de la línea de trillado.

Al detallarse el proceso de producción con las entrevistas, el diagnóstico, los modelos y diagramas estandarizados, surgieron aspectos en los ámbitos de calidad, mantenimiento y planificación de la producción, que se deben tomar en cuenta para obtener mejores resultados en la realización del proceso. Otro aspecto a mejorar, pero que no se abordará en el desarrollo de este proyecto, es la automatización del proceso con la implementación de lazos de control en los módulos de equipo que



comprendan variables controlada y críticas en la producción de café excelso, que en la actualidad cuentan con monitoreo y supervisión a criterio de los operarios.

Los requerimientos técnicos y funcionales se basan en los problemas más significativos que posee el proceso. Se desglosan una serie de requerimientos puntuales para el mejoramiento de la línea de trillado de café en cuanto a EE y producción se refiere, desde el punto de vista del diagnóstico realizado.

#### **1.3.4 Metodología de eficiencia energética**

Los pasos para la recopilación de información en el transcurso del proyecto se desarrollan con base a métodos o estrategias que listan pautas para explorar los procesos industriales y cumplir con la incorporación de elementos de eficiencia energética. Dicho análisis de eficiencia energética en el presente trabajo de pregrado se abordará por medio de una estrategia organizada en dos pasos:

- Análisis y validación de oportunidades de mejora en EE propuestas a la línea de proceso.
- Impacto de las oportunidades de mejora en EE en el flujo de proceso.

La estrategia fijada para analizar la eficiencia energética del proceso desarrollado en la línea de trillado, asume que el impacto más significativo potencialmente se logrará cuando se van a aplicar las mejoras en EE en la línea del proceso, y posteriormente se analiza como repercuten los cambios ocasionados por dichas mejoras en el flujo de proceso.

Analizando el primer paso de la estrategia, se propone en el presente trabajo de grado hacer uso de un procedimiento propuesto en [10], donde presentan un método organizado que permite incorporar elementos tecnológicos y/o de automatización en procesos industriales desde el punto de vista de la eficiencia energética. Este procedimiento es fruto de una rigurosa búsqueda sistemática de procedimientos que comprenden lineamientos para la incorporación de elementos de EE con objetividad a la línea de proceso, en la cual se filtran los trabajos más representativos donde se expresan las labores de determinación de puntos críticos de consumo, listar alternativas de reducción de consumo eléctrico y su posterior impacto en el aspecto tecno-económico [11], por otra parte se hace mención de realizar una evaluación de consumo de recursos generales, identificación de oportunidades de eficiencia en la maquinaria de producción y análisis costo-beneficio [12], como referencia final se propone una caracterización del consumo energético, evaluación de elementos de EE en el proceso, identificación de oportunidades de ahorro y análisis simulado de desempeño energético [13]. De la búsqueda sistemática realizada en [10] se concluye que para cumplir con un procedimiento efectivo se debe cumplir con un método híbrido apoyado de las tres (3) referencias mencionadas ([11]–[13]) que comprenden las siguientes labores:

- Caracterización del consumo energético eléctrico.

- Análisis del desempeño energético del proceso.
- Identificación de oportunidades de mejora.
- Simulación de mejoras con compromiso de EE.
- Análisis de costo-beneficio.

El método híbrido propuesto en [10] va a ser usado en el presente trabajo de grado para proponer y validar una reestructuración de la línea de trillado de café dentro de la empresa SUPRACAFE COLOMBIA S.A. con el desarrollo de la secuencia de labores comprendidas en él, ver Figura 27.

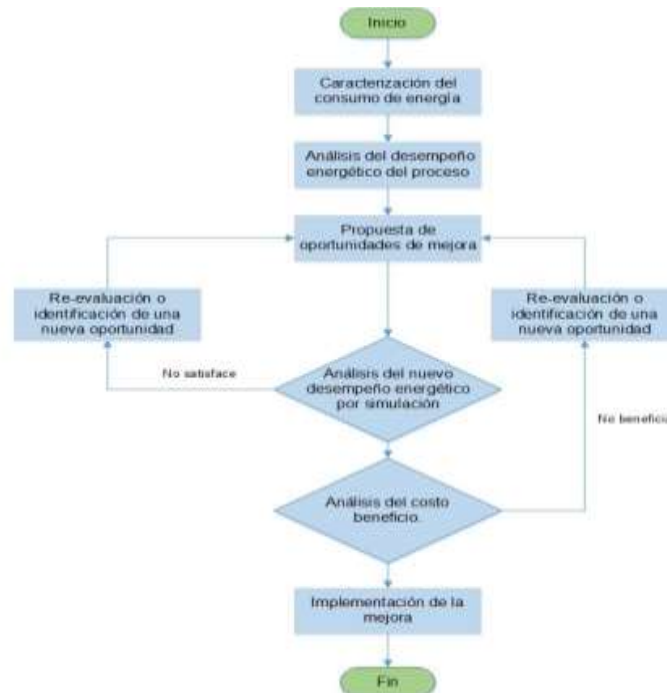


Figura 27. Método híbrido de eficiencia energética [10].

Para la aplicación del método seleccionado, se procede a continuación a listar las propuestas de cambios y/o mejoras a validar dentro de la línea de trillado de la empresa SUPRACAFÉ COLOMBIA S.A. de acuerdo al diagnóstico realizado:

### 1.3.5 Requerimiento del proyecto

#### Requerimientos en el aspecto técnico

A partir de la investigación, recolección y análisis de información de las entrevistas al personal operario de la línea y a los ingenieros de producción, se identificaron cuatro (4) requerimientos técnicos listados a continuación:

**RT1:** Reestructuración de la línea de trillado de café en la empresa SUPRACAFE COLOMBIA S.A., haciendo incorporación de los módulos de equipos Despedregadora y Clasificadora electrónica.

**RT2:** Plantear una potencial mejora a la eficiencia energética de la línea de trillado de café, realizando un análisis del desempeño energético sobre la línea actual de

trillado en los módulos de equipos existentes e incorporados para la reestructuración de la misma.

**RT3:** Proponer actividades de mantenimiento adecuadas a la línea de trillado propuesta para la empresa SUPRACAFE COLOMBIA S.A.

**RT4:** Proponer la incorporación de equipos de contingencia eléctrica con finalidad de afrontar imprevistos de suministro eléctrico en la línea de trillado de café en la empresa SUPRACAFE COLOMBIA S.A

### **Requerimientos en el aspecto funcional**

Al modelar y analizar el estándar ISA S88, sobre la empresa SUPRACAFE COLOMBIA S.A, se identifica un requerimiento en el aspecto funcional, listado a continuación:

**RF1:** Identificar los cambios en el flujo de proceso ocasionados por la reestructuración propuesta, y reflejados en los modelos de control de proceso y de control procedimental de la nueva línea de trillado de café.

## 2. INGENIERIA BÁSICA

La ingeniería básica hace parte del diseño de un proyecto de automatización, es aquí donde se refleja la solución a problemas detallados en la ingeniería. Mediante la aplicación de los conocimientos en ingeniería básica se busca dar respuesta a los requerimientos técnicos y funcionales de un proceso productivo del sector cafetero, específicamente a las problemáticas asociadas al proceso de trillado en el café. En este capítulo se desarrolla la especificación técnica del proceso de trillado de café.

Para poder cumplir con la ejecución del método híbrido seleccionado, representado en la Figura 27, se debe hacer uso de una herramienta software de simulación que permita representar los cambios propuestos y el impacto de los mismos en la línea de trillado.

La herramienta software en cuestión es SuperPro Designer en su versión v9.0, donde brinda soporte completo en su panel de ayuda y contacto con especialistas en el uso de la herramienta, al igual que variados ejemplos de simulación para completar una familiarización con el programa. Este cuenta con un largo listado de módulos de equipo dependiendo del tipo de proceso a desarrollar, variedad en materias primas, especificación del personal necesario, detalles de las fases del modelo de control procedimental y demás factores que se ven involucrados en la producción industrial.

Para cumplir con las variables de simulación, la herramienta solicita valores de consumo energético de la maquinaria utilizada, personal involucrado, medidas de interacción entre material y equipos, gastos y costos de recursos, tiempos de ejecución y medidas de instalación.

Con la culminación de la simulación del proceso, la herramienta software da la posibilidad de generar reportes completos de recursos utilizados como material, personal, equipos, tiempos y costos. Dentro de la herramienta se generan diagramas de Gantt que especifican la cantidad indicada de *batches* realizados, junto a los tiempos asociados a las fases ejecutadas.

Se inicia desde la estructuración de la línea actual de trilla instalada en la empresa SUPRACAFÉ COLOMBIA S.A., la cual cumple con el proceso de trillado y clasificado de café excelso. Según valores recolectados en entrevistas previas realizadas al personal encargado del desarrollo del proceso, la línea está en capacidad de cumplir una demanda aproximada de 19800kg de café excelso tipo exportación en un periodo de 15 días, con un factor de rendimiento de 82.5%, haciendo alusión a la cantidad de kilogramos de café pergamino involucrados en la producción de 70kg de café verde excelso.

La línea actual se traslada al software, donde se denota por código de colores las dos (2) unidades que la conforman (la unidad de Trillado se referencia con las conexiones en color rojo, y la unidad de Clasificado se referencia con las conexiones en color azul), y comprende la representación gráfica de los módulos de equipo, ver Figura 28.

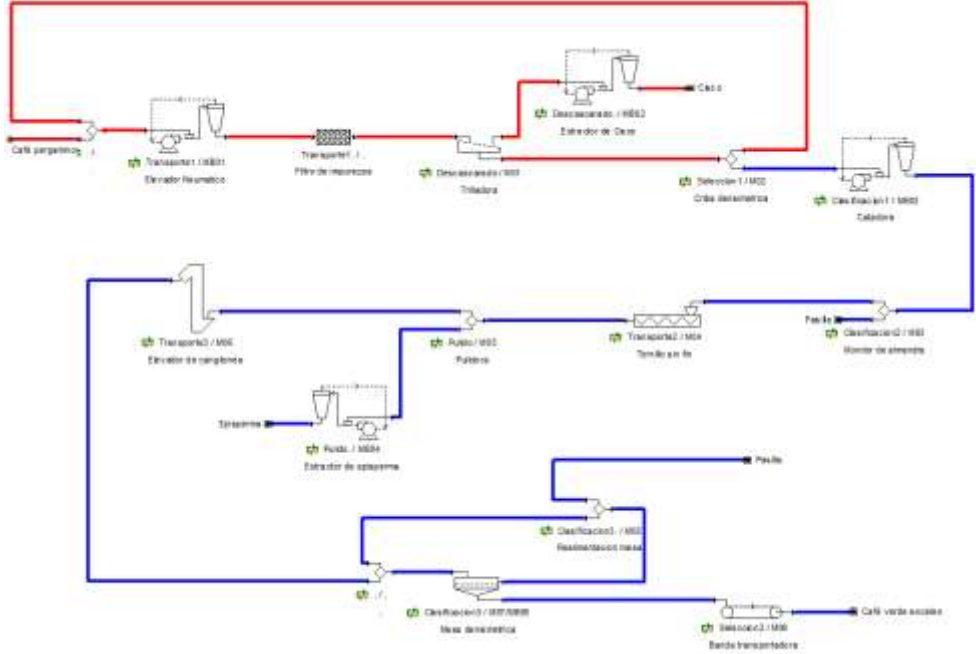


Figura 28. Línea actual de trillado representada en SuperPro Designer. Fuente propia

La representación en SuperPro Designer de la línea actual se hizo seleccionando los módulos de equipo disponibles en la librería del software, y configurando los parámetros de los mismos de acuerdo a información de la línea real, ver Anexo E.

La representación parte con la unidad de trillado iniciando con un elevador neumático, luego un filtro de impurezas, seguido de la trilladora simulada por una pantalla estacionaria, la cual está acoplada al extractor de cisco representado por un elevador neumático; terminando la unidad, se representa la criba densimétrica con un separador de 2 flujos: un flujo es la retroalimentación del café pergamino que no cumple con el criterio total de trillado, y el segundo encamina el café trillado hacia la siguiente unidad. Se procede a la unidad de clasificación, comprendido desde la catadora representada con un elevador neumático, un monitor de almendra representado por un separador de 2 flujos: el flujo superior contiene el café óptimo dispuesto para seguir el proceso, y el flujo inferior es el café catalogado como pasilla; continuando la unidad, el módulo de equipo tornillo sin fin tiene su representación específica, la pulidora es representada por un separador de 2 flujos: en el flujo superior se encamina el café pulido a seguir en el proceso, y en el flujo inferior se obtiene la episperma, en donde se asocia un elevador neumático que simula el extractor de episperma instalado en la línea actual; la unidad de clasificado

continúa con el elevador de cangilones con una representación exacta dentro de la herramienta software, la mesa densimétrica se representa con una pantalla vibratoria que asemeja la labor desarrollada por la maquinaria ya mencionada, acompañada con un motor de realimentación de mesa simulado por un separador de 2 flujos: un flujo es asociado a la pasilla obtenida en la mesa densimétrica, y el segundo flujo es aquel que se relaciona a la labor del motor y realimenta el café que en una primera oportunidad no cumple los estándares de calidad. Y culminando la simulación de la unidad de clasificación, y del proceso, se ubica la respectiva representación de la banda transportadora<sup>1</sup>.

Los valores que se utilizaron para la representación de la línea de trillado de café de la empresa SUPRACAFE COLOMBIA S.A. se limitan a consumos eléctricos de los equipos, materia prima involucrada y tiempos útiles de producción; los valores mencionados se utilizarán en las simulaciones a realizar, desde la simulación de la línea actual hasta cumplir con la línea reestructurada. Los valores se especifican en el Anexo E.

## **2.1. CUMPLIMIENTO DE REQUERIMIENTOS TÉCNICOS DEL PROCESO DE TRILLADO DE CAFÉ**

En el desarrollo del proyecto, se detalla la propuesta de reestructuración de la línea de trillado instalada en el espacio industrial dispuesto por SUPRACAFÉ COLOMBIA S.A mediante el uso de una metodología con enfoque de elementos de eficiencia energética (EE), explicada en el Capítulo 1 Sección 1.3.4.

El método se utilizará para validar los cambios y/o mejoras propuestas en el transcurso de esta sección, que trata del cumplimiento de requerimientos. Dicho método híbrido se aplicará siguiendo la secuencia de los pasos que la componen:

- *Caracterización del consumo de energía.*
- *Análisis del desempeño energético del proceso.*
- *Propuesta de oportunidades de mejora.*
- *Análisis del nuevo desempeño energético por simulación.*
- *Análisis del costo beneficio.*
- *Implementación de la mejora.*

Partiendo desde la condición energética inicial de la línea de trillado, se ejecutaran los 2 primeros pasos una única vez con los valores referenciados a la línea actual de la empresa caso de estudio. Se selecciona y analiza una primera oportunidad de mejora que culmina según el método con Implementación de la mejora, y se da

---

<sup>1</sup> En la herramienta de simulación SuperPro Designer no se dispone de la representación exacta de todos los módulos de equipo que componen la línea de trillado, razón por la cual se realiza una revisión de la biblioteca de equipos para seleccionar aquellas que desarrollen una labor similar a los módulos en cuestión, y que permitan sus configuraciones de consumos energéticos y tiempos de compromiso.

inicio a la aplicación nuevamente de la misma partiendo desde la siguiente Propuesta de oportunidad de mejora y así hasta finalizar las diferentes mejoras.

### 2.1.1 Cumplimiento del requisito técnico 1

**RT1:** Reestructuración de la línea de trillado de café en la empresa SUPRACAFE COLOMBIA S.A., haciendo incorporación de los módulos de equipos Despedregadora y Clasificadora electrónica.

Para dar cumplimiento del RT1, se hace alusión a los comentarios expresados por los entrevistados dentro de la empresa SUPRACAFE COLOMBIA S.A., en los cuales se comparte la idea de incluir dentro de la línea de trillado presente los módulos de equipo que poseen y que se encuentran almacenados debido a la espera de ampliación del área de trabajo en la zona de trillado y clasificado. Los estudios realizados por la empresa brindan información de la labor a desarrollar por la maquinaria, pero no abarca los datos de consumo eléctrico, tema primordial en el desarrollo del presente proyecto.

#### **Descripción de los módulos a incorporar:**

El primer módulo de equipo a instalar dentro de la línea se denomina Despedregadora, el cual cumple la función de generar una limpieza más rigurosa del café pergamino para disminuir los problemas de impurezas dentro de la materia prima, y facilitar el desarrollo del proceso de trillado y los módulos asociados a la unidad inicial, ver Figura 29.



Figura 29. Módulo de equipo Despedregadora. Fuente propia

El principio de funcionamiento de la despedregadora es la clasificación por densidad del material ubicado sobre la plataforma superior mediante vibración; este principio de funcionamiento, es familiar dentro del proceso de trillado en SUPRACAFE COLOMBIA S.A. por lo que es el mismo sobre el que se fundamenta la mesa densimétrica que hace parte de la línea. Con la incorporación de este módulo se hace meritoria la eliminación del filtro de impurezas, disminuyendo el contacto continuo de los operarios con los flujos de material así como el cambio o mantenimiento constante del filtro.

El siguiente módulo de equipo a incursionar dentro de la línea de trillado es la Clasificadora Electrónica seleccionada por parte de la empresa, Clasificadora 30-RMP de la empresa guatemalteca XELTRON, ver Figura 30, que cumple con el objetivo de incrementar los niveles de calidad del producto final, por lo cual se fundamenta en un principio de operación de selección del material con características excelsas por medio de observación computarizada. Este módulo de equipo basa su funcionamiento en la reflexión de luz sobre los granos de café, y por medio de configuraciones previas realiza la selección deseada, descartando aquellos que no cumplan los requisitos.



Figura 30. Módulo de equipo Clasificadora electrónica. Fuente propia

La maquinaria mencionada se encuentra adquirida por la empresa caso de estudio, y han expresado el deseo de que estas hagan parte de la línea de trillado con la objetividad ya mencionada.

### **Análisis del marco comparativo de líneas de trillado**

Para recomendar la ubicación idónea para la instalación de las dos nuevas máquinas dentro de la línea de trillado, se propone levantar una serie de criterios técnicos para argumentar objetivamente esas decisiones. Para ello se recurre a desarrollar tres (3) marcos comparativos de líneas de trillado ubicadas en cooperativas caficultoras que tuviesen en sus instalaciones la tecnología sobre la cual se indaga para obtener criterios en el desarrollo del proyecto:

- Cooperativa de caficultores del Cauca - Caficauca
- Trilladora Café Norte
- ECOM (antes Trilladora Luchin)

La información a recolectar en los marcos comparativos se soporta en un formato que comprende la estructura de las líneas de trillado y demás acciones complementarias, como operaciones, en la labor de trillado de café que en ellas se realiza, ver Figura 31.



| FICHA TECNICA                  |                   |                 |          |         |               |
|--------------------------------|-------------------|-----------------|----------|---------|---------------|
| NOMBRE DE LA EMPRESA:          |                   |                 |          |         |               |
| FECHA DE LA VISITA:            |                   |                 |          |         |               |
| NOMBRE DEL PERSONAL ENCARGADO: |                   |                 |          |         |               |
| CARGO DEL PERSONAL ENCARGADO:  |                   |                 |          |         |               |
| #                              | NOMBRE DEL MODULO | CARACTERISTICAS | ENTRADAS | SALIDAS | TIEMPO DE USO |
| 1                              |                   |                 |          |         |               |
| 2                              |                   |                 |          |         |               |
| 3                              |                   |                 |          |         |               |
| 4                              |                   |                 |          |         |               |
| 5                              |                   |                 |          |         |               |
| 6                              |                   |                 |          |         |               |
| 7                              |                   |                 |          |         |               |
| 8                              |                   |                 |          |         |               |
| 9                              |                   |                 |          |         |               |
| 10                             |                   |                 |          |         |               |
| 11                             |                   |                 |          |         |               |
| 12                             |                   |                 |          |         |               |
| 13                             |                   |                 |          |         |               |
| 14                             |                   |                 |          |         |               |
| 15                             |                   |                 |          |         |               |
| 16                             |                   |                 |          |         |               |
| 17                             |                   |                 |          |         |               |
| 18                             |                   |                 |          |         |               |
| 19                             |                   |                 |          |         |               |
| 20                             |                   |                 |          |         |               |
| GRADO DE AUTOMATIZACION:       |                   |                 |          |         |               |
| SISTEMA DE CONTROL:            |                   |                 |          |         |               |
| CAPACIDAD:                     |                   |                 |          |         |               |
| FIRMA DEL PERSONAL ENCARGADO:  |                   |                 |          |         |               |
| CC:                            |                   |                 |          |         |               |

| FICHA DE OPERACIONES          |        |                 |             |
|-------------------------------|--------|-----------------|-------------|
| NOMBRE DEL PROCESO:           |        |                 |             |
| OPERACIONES                   |        |                 |             |
| #                             | NOMBRE | CARACTERISTICAS | DESCRIPCION |
| 1                             |        |                 |             |
| 2                             |        |                 |             |
| 3                             |        |                 |             |
| 4                             |        |                 |             |
| 5                             |        |                 |             |
| 6                             |        |                 |             |
| 7                             |        |                 |             |
| 8                             |        |                 |             |
| 9                             |        |                 |             |
| 10                            |        |                 |             |
| 11                            |        |                 |             |
| 12                            |        |                 |             |
| 13                            |        |                 |             |
| 14                            |        |                 |             |
| 15                            |        |                 |             |
| FIRMA DEL PERSONAL ENCARGADO: |        |                 |             |
| CC:                           |        |                 |             |

Figura 31. Formato de recopilación de información en marco comparativo. Fuente propia

La información recopilada en el anterior formato, ver Figura 31, cumple funciones de apoyo para realizar comparaciones en los niveles físicos y de operación de las líneas de trillado visitadas, consignada completa y formalmente en el Anexo B, al igual que grabaciones de las mismas dentro del Anexo Digital B.

De la comparación entre las tres (3) líneas de trillado visitadas en el municipio de Popayán, se identifica que una de estas líneas se puede usar como una referencia. La línea referente es la asociada a la cooperativa CAFICAUCA; esta decisión se toma por apreciaciones del personal encuestado en el marco comparativo realizado, quienes expresan que esta línea en cuestión es la que lleva mayor tiempo en funcionamiento y es la que procesa la mayor cantidad de materia prima, además de esto cuenta con un alto nivel de reconocimiento por las ejecuciones de los procesos realizados, reflejado en los empresas que contratan sus servicios para la producción, como Nescafé, y presenta una constante actualización en la tecnología que al trillado de café se refiere. En la línea a usar como referencia se identifican 10 módulos de equipo generales:

- Elevador de cangilones
- Silo de almacenamiento
- Despedregadora
- Trilladora y retrilladora (pulidora)
- Catadora
- Monitor de almendra
- Mesa densimétrica
- Elevador de cangilones
- Clasificadora electrónica
- Banda transportadora

Una vez identificada la línea de trillado referencia, se procede a comparar la ubicación de los diferentes módulos de equipo presentes en las tres (3) líneas de trillado visitadas al igual que la línea de SUPRACAFE COLOMBIA S.A., en comparación con estas. Eso arrojó una información interesante de comparación en cuanto a ubicaciones, ver Tabla 8.

Es importante aclarar que se presentan diferencias entre la estructuración de todas las líneas de trillado tenidas en cuenta para la obtención de las correlaciones, se observan las comparaciones específicas entre cada una de ellas en el Anexo B.

| <b>M.E. LINEA REFERENCIA</b>       | <b>M.E. CAFICAUCA</b> | <b>M.E. CAFENORTE</b> | <b>M.E. ECOM</b> | <b>M.E. SUPRACAFE</b> |
|------------------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------|-----------------------|
| Elevador de Cangilones             | =                     | =                     | =                | x                     |
| Silo de Almacenamiento             | =                     | =                     | =                | x                     |
| Despedregadora                     | =                     | =                     | x                | x                     |
| Trilladora y Retrilladora (Pulido) | =                     | X                     | x                | =                     |
| Catadora                           | =                     | =                     | x                | =                     |
| Monitor de Almendra                | =                     | X                     | x                | =                     |
| Mesa Densimetrica                  | =                     | X                     | x                | x                     |
| Elevador de Cangilones             | =                     | X                     | x                | =                     |
| Clasificadora Electrónica          | =                     | =                     | =                | x                     |
| Banda Transportadora               | =                     | =                     | =                | =                     |
| Correlación                        | 100%                  | 60%                   | 40%              | 50%                   |

Tabla 8. Comparación de líneas de trillado marco comparativo contra la línea referencia.

Se concluye con las apreciaciones presentes en la

| <b>M.E. LINEA REFERENCIA</b>       | <b>M.E. CAFICAUCA</b> | <b>M.E. CAFENORTE</b> | <b>M.E. ECOM</b> | <b>M.E. SUPRACAFE</b> |
|------------------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------|-----------------------|
| Elevador de Cangilones             | =                     | =                     | =                | x                     |
| Silo de Almacenamiento             | =                     | =                     | =                | x                     |
| Despedregadora                     | =                     | =                     | x                | x                     |
| Trilladora y Retrilladora (Pulido) | =                     | X                     | x                | =                     |
| Catadora                           | =                     | =                     | x                | =                     |
| Monitor de Almendra                | =                     | X                     | x                | =                     |
| Mesa Densimetrica                  | =                     | X                     | x                | x                     |
| Elevador de Cangilones             | =                     | X                     | x                | =                     |

|                           |      |     |     |     |
|---------------------------|------|-----|-----|-----|
| Clasificadora Electrónica | =    | =   | =   | x   |
| Banda Transportadora      | =    | =   | =   | =   |
| Correlación               | 100% | 60% | 40% | 50% |

Tabla 8, que hay un bajo porcentaje de correlación entre las líneas de trillado, por lo que es meritorio plantear una reestructuración en vista de cumplir los objetivos que conlleven a que la línea presente en la empresa SUPRACAFE COLOMBIA S.A. se asemeje a línea referente en vista de orientar su instalación a cumplir niveles de actualización operacional, estandarización del proceso y reconocimiento en el ámbito de producción.

El orden de los módulos de equipo en la línea de referencia dan el criterio técnico principal con el que se recomendará la ubicación de la maquinaria para la línea de trillado en la propuesta de reestructuración. Por lo que se concluye con esto que existe la necesidad de incursionar nueva maquinaria que aporte valor al proceso en cuestión; los módulos Despedregadora y Clasificadora electrónica se encuentra adquiridos en la actualidad por la empresa, y según el criterio obtenido se debe instalarlos entre algunos módulos de equipo que conforman la línea de trillado actual de SUPRACAFE COLOMBIA S.A., ver Figura 32:

- Unidad Trillado: Incorporación de la Despedregadora, en posición del filtro de impurezas, previo a la trilladora.
- Unidad Clasificado: Incorporación de la Clasificadora electrónica posterior a la mesa densimétrica y previo a la banda transportadora.

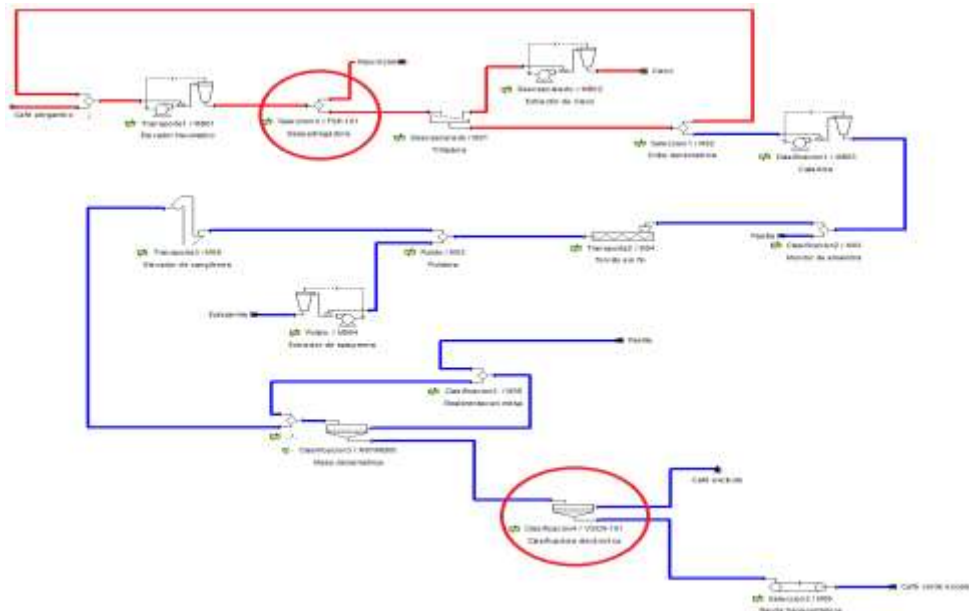


Figura 32. Incorporación de nuevos módulos de equipo en la línea de trillado actual. Fuente propia

El marco comparativo permitió igualmente evidenciar que se deben proponer una serie de cambios a la actual línea de trillado en SUPRACAFE COLOMBIA S.A. que permitan asegurar un buen desempeño en producción, partiendo de los módulos

integrados en la línea, con visión de lograr ventajas y omitir funciones repetitivas que no aporten al proceso. Los cambios propuestos (CP) para llevar a cabo, especificados por unidad, dentro de la línea de trillado son:

**Unidad de Trillado:**

**CP1.** Cambio del elevador neumático de suministro de café pergamino por un elevador de cangilones.

**Unidad de Clasificado:**

**CP2.** Eliminación del tornillo sin fin como elemento de transporte en la línea de trillado y eliminación del extractor de episperma.

**CP3.** Eliminación de la realimentación presente en la mesa densimétrica previa a la banda transportadora.

El CP1 se propone para brindar ventajas en la conservación de integridad del grano de café transportado con un movimiento suave, y aboliendo el desgaste de los mismos por el impacto sobre el canal de los cangilones. La línea actual de trillado cuenta con ambos medios de transporte, lo cual permite la comparación de consumos energéticos entre ambos sistemas, debido a que en ellos se presenta el mismo flujo de material. Otra ventaja de CP1 es la instalación del motor en la parte superior del elevador, evitando un problema relacionado con la succión de impurezas y atascamiento en las aspas del elevador neumático.

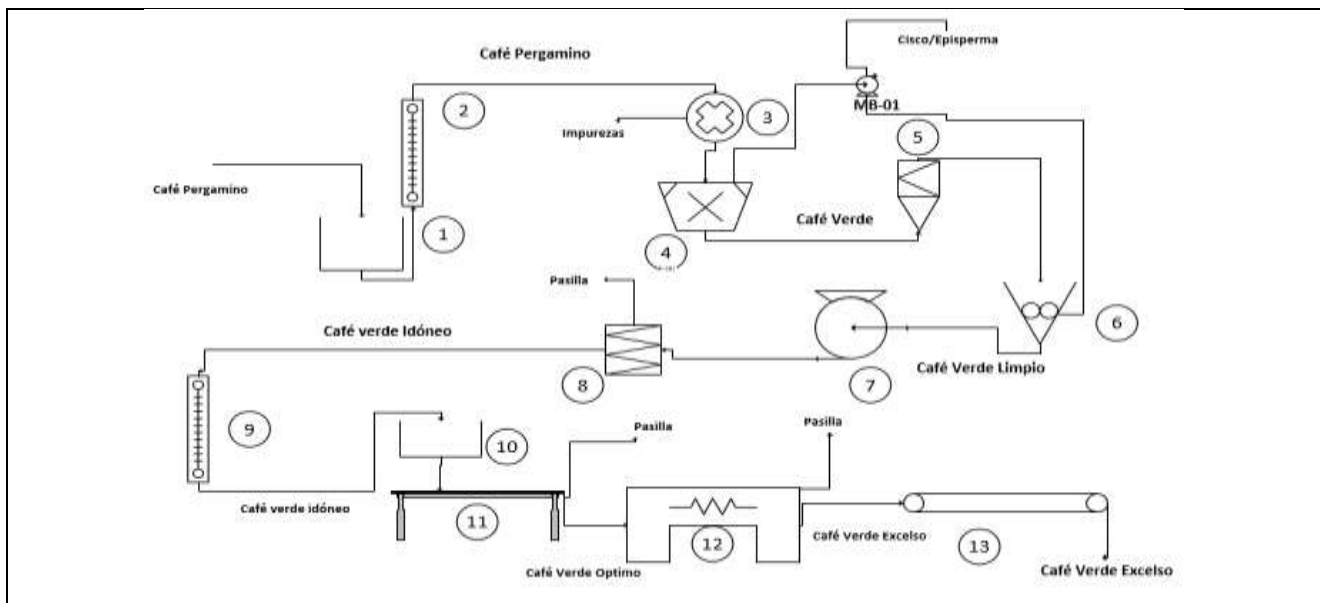
Avanzando en la reestructuración de la línea, se hace obligatoria una mejora técnica generada en parte a comentarios de los entrevistados y conclusiones de las visitas realizadas, donde mencionan que la operación del monitor de almendra se ve afectada cuando no hay una regularidad en los granos de café, específicamente en la remoción del pergamino que recubre el grano y la limpieza total del mismo. Teniendo en cuenta este aspecto técnico de operación deficiente en la línea de trillado de SUPRACAFE COLOMBIA S.A., se hace necesario que la maquinaria encargada del pulido de los granos dentro del proceso (Pulidora), sea reubicada antes del inicio de la unidad de Clasificado con el objetivo de procesar un subproducto limpio y uniforme en el mayor grado posible. Por lo tanto se lista este ítem como una mejora obligatoria (MO) denominada:

**MO1.** Reubicación de la pulidora posterior a la acción de la criba densimétrica y previo a la catadora.

Con el ajuste anterior se presenta CP2, esto es prescindir del módulo de equipo Tornillo sin fin, que cumple funciones de transporte asociadas a la posición previa de la pulidora, sin embargo con la implementación de MO1, y debido a la proximidad entre el extractor de pergamino y la nueva ubicación de la pulidora, se hace innecesario el extractor de episperma que antes utilizaba, y se implementara en esta una conexión mecánica hacia el extractor de pergamino para que se encargue de la episperma por ella generada.

Continuando con los cambios propuestos, en el CP3 se plantea la remoción de un accesorio perteneciente al módulo de equipo Mesa densimetrica, donde la acción podría ejecutarse con un diseño de tubería que utilice la fuerza gravitatoria para el movimiento de los granos de café hasta lograr la realimentación en el elevador de cangilones y realizar de nuevo el proceso de clasificación a aquellos granos que sean descartados en el módulo mencionado primeramente.

Con la implementación de los cambios se culmina con la propuesta de reestructuración de la línea de trillado en la empresa SUPRACAFE COLOMBIA S.A. con vista a que posiblemente mejore la condición del material en el proceso y producción de café excelso trillado. Como representación estandarizada, se recurre a un modelo tipo PFD listando el número y orden de módulos de equipo a utilizar en la reestructuración de la línea en SUPRACAFE COLOMBIA S.A, ver Figura 33.



| ID | MODULOS DE EQUIPO Y ACCESORIOS DE LA UNIDAD | OPERACIÓN  |
|----|---|--|
| 1  | Tolva inicial                               | Encaminar el flujo de café pergamino para el posterior transporte a la acción de trilla  |
| 2  | Elevador de cangilones                      | Transportar el café pergamino hacia la despedregadora para la acción de extraer impurezas  |
| 3  | Despedregadora                              | Extraer las impurezas del café pergamino, para proceder a desarrollar la acción de descado   |
| 4  | Trilladora                                  | Descascarar y limpiar los granos de café pergamino   |
| 5  | Criba densimetrica                          | Seleccionar el café verde posterior a la trilla y enrutarlo a clasificaciones, al igual que realizar la realimentación de los granos de café pergamino |
| 6  | Pulidora                                    | Pulir el café verde idoneo y alimentar el elevador de cangilones con café verde limpio   |
| 7  | Catadora                                    | Clasificar por peso el café verde mediante la elevación del mismo y encaminado por niveles para otra posterior clasificación                           |
| 8  | Monitor de almendra                         | Clasificar por tamaño el café verde y alimentar el tornillo sin fin con café verde denominado como idóneo  |

|    |                            |  |
|----|----------------------------|--|
| 9  | Elevador de cangilones     | Transportar el café verde limpio posterior al pulido, y alimentar la tolva asociada a la mesa densimétrica     |
| 10 | Tolva de mesa densimétrica | Encaminar el flujo de café verde limpio para la posterior clasificación en la mesa densimétrica                |
| 11 | Mesa densimétrica          | Clasificar el café verde mediante valores de densidad paradar cumpliendo a la última operación de la línea     |
| 12 | Clasificadora electrónica  | Clasificar el café verde mediante colores en imágenes obtenidas por visión de máquina.                         |
| 13 | Banda transportadora       | Módulo de equipo sobre el cual se lleva a cabo la selección final del café verde considerado como café excelso |

Figura 33. Diagrama PFD de la línea de trillado reestructurada. Fuente propia

En el modelo PFD de la propuesta de reestructuración presente en Figura 33, se cuenta con el elevador de cangilones inicial, la incorporación de la Despedregadora entre los módulos Elevador de cangilones y Trilladora, al igual que el módulo de equipo Clasificadora electrónica entre la Mesa densimétrica y la Banda transportadora. La reubicación de la Pulidora, posterior al módulo Trilladora; la eliminación del Filtro de impurezas, extractor de episperma y Tornillo sin fin son aspectos que marcan la diferencia de lo representado en Figura 10.

Para definir o determinar si se acepta la nueva estructuración de la línea de trillado, con los cambios propuestos y/o mejoras, estos deben ser reafirmados de acuerdo al impacto en el consumo energético. Esto será realizado con el desarrollo del cumplimiento del requisito técnico 2.

### 2.1.2 Cumplimiento del requisito técnico 2

**RT2:** Plantear una potencial mejora a la eficiencia energética de la línea de trillado de café, realizando un análisis del desempeño energético sobre la línea actual de trillado en los módulos de equipos existentes e incorporados para la reestructuración de la misma.

Para dar cumplimiento al RT2, se denotaran los cambios de consumo eléctrico que se obtienen con la reestructuración propuesta en el cumplimiento del RT1 en aras de lograr una mejora productiva y energética en el desempeño del proceso, partiendo desde la disposición de la línea actual de trillado en la empresa SUPRACAFE COLOMBIA S.A. hasta culminar con la propuesta final que involucra la reestructuración.

Para la implementación de los pasos del método híbrido, se debe recurrir en primera instancia a la Caracterización del consumo de energía, partiendo desde la línea de trillado actual cuya estructuración es expresada previamente en los modelo PFD del *Capítulo 1 Sección 1.3.2*, y su representación en la herramienta SuperPro Designer en Figura 28. Se hace uso de las características de potencia de cada módulo de equipo y tiempos de ejecución de ciclos de producción para la obtención de 19800 kg de café excelso, información más detallada en Anexo E, para apreciar los valores de consumo detallado en la simulación de la línea actual, ver Figura 34.

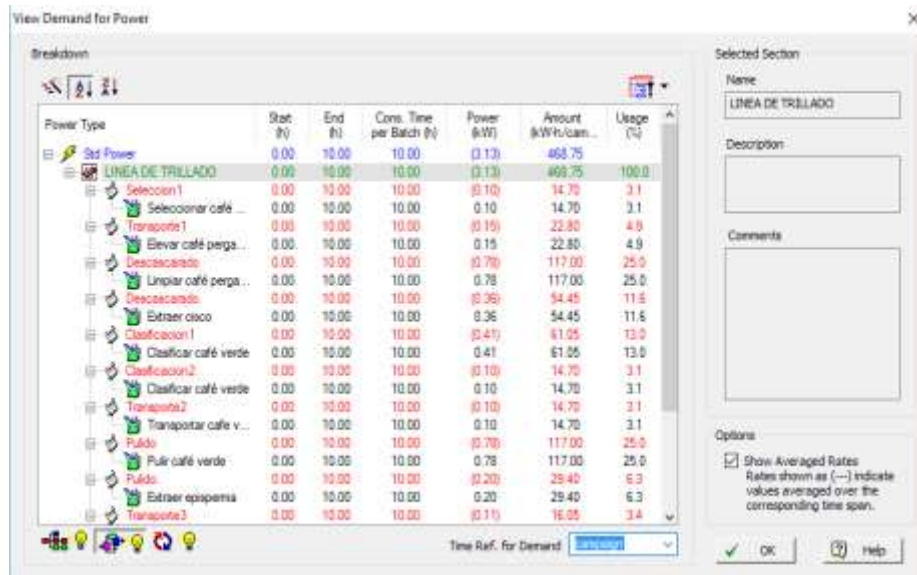


Figura 34. Consumo energético de la línea actual de trillado mediante herramienta de simulación SuperPro Designer.

Como resultado de la simulación, se obtiene un consumo energético de la línea de trillado de 468.75 kWh/mes, el cual se diferencia en 5.4% con el valor estimado obtenido dentro del diagnóstico energético realizado en *Capítulo 1 Sección 1.3.3*<sup>2</sup>.

### Indicador de compromiso energético

Posterior a la caracterización del consumo, se cumple con el *Análisis del desempeño energético del proceso* para el cual se recurre a indicadores asociados al consumo energético involucrado en el proceso total de la línea de trillado; por lo cual se plantea un indicador que brinde valores de referencias de eficiencia energética. Dicho indicador se desarrolla con valores de consumo energético de la línea de trillado y la producción de la misma, información consignada en el Anexo E.

**IE1 (Indicador de consumo/producción):** Este indicador comprende la razón entre la energía utilizada en la producción, en este caso la cantidad de kilogramos producidos al final de la línea trillado:

$$IE1 = \text{Energía consumida} / \text{Cantidad de producto generado}$$

$$IE1 = 495.34 \text{ kWh} / 19800 \text{ kg}$$

$$IE1 = 0.0250 \text{ kWh/kg}$$

<sup>2</sup> Esta diferencia obtenida entre la simulación y el valor estimado de la línea de trillado se origina por la selección de módulos de equipo que no son propiamente los que componen la línea, y se configuran solo con potencias nominales y tiempos de compromiso. Los datos de la línea de trillado actual se generan con todas las características de los módulos de equipo del proceso.

Se hará uso de valores de consumo energético pertenecientes a la simulación realizada, ver Tabla 9, con el objetivo de continuar con el desarrollo del indicador a lo largo de la ejecución del proyecto y la culminación de la propuesta.

|   | Línea actual instalada | Línea actual simulada | Porcentaje de error |
|---|------------------------|-----------------------|---------------------|
| <b>Indicador de compromiso energético (IE1)</b> | 0.025 kWh/kg           | 0.0236 kWh/kg         | 5.4%                |

Tabla 9. Indicadores energéticos entre línea actual y línea simulada, asociado a la producción.

El valor de IE1 a relacionar en el transcurso del proyecto será de 0.0236 kWh/kg aproximadamente, el cual será meritorio de comparación con la culminación de la propuesta generada.

Avanzando en el método híbrido seleccionado, se continúa con el desarrollo de Propuesta de oportunidades de mejora, como primera propuesta definida en la reestructuración es la incorporación de los módulos de equipo Despedregadora y Clasificadora electrónica conservando la instalación inicial de la línea de trillado, ver Figura 35.

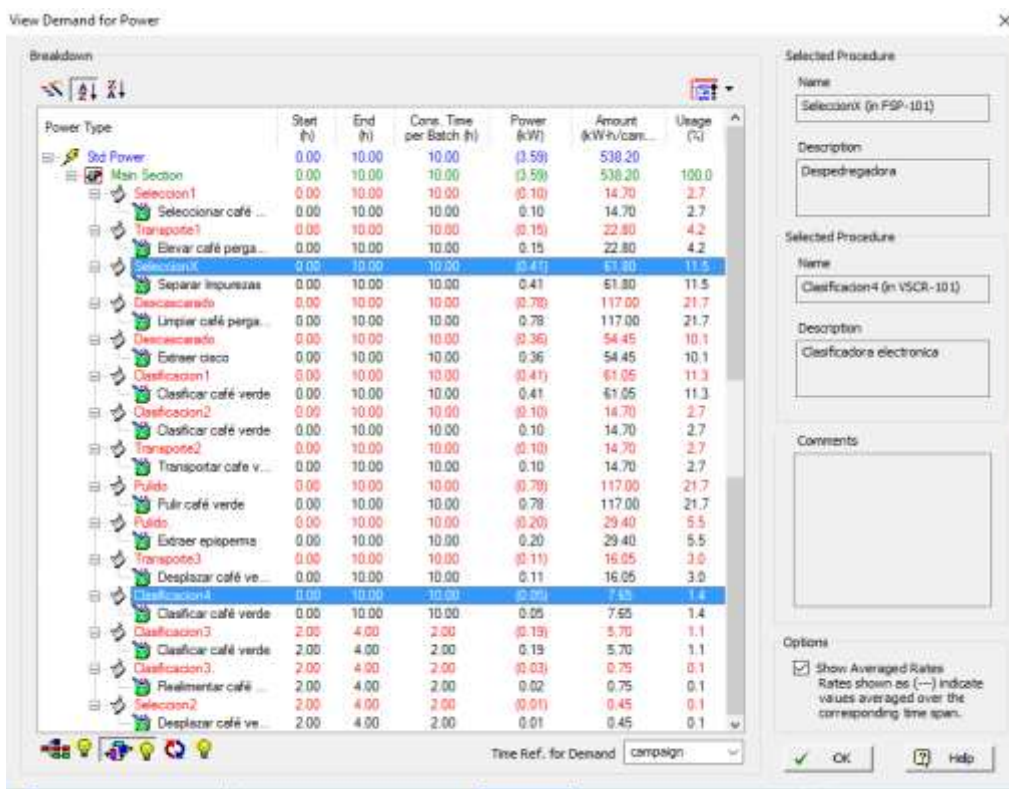


Figura 35. Consumo energético de la línea de trillado con la incorporación de nuevos módulos mediante simulación en SuperPro Designer.

Se cumple con el Análisis del nuevo desempeño energético por simulación expresado dentro del método seleccionado, en donde la incorporación de los dos nuevos módulos de equipo dentro de la línea de trillado actual arroja como resultado un incremento de consumo eléctrico mensual de aproximadamente 15%,



comprometiendo a la línea en un consumo de 0.0272 kWh/kg dentro del Análisis del costo beneficio, resultado socializado a las directivas, quienes comprendieron que el aumento en el consumo energético es razonable frente a las ventajas que se presentarían con las incursiones, según información recopilada en el marco comparativo realizado a las cooperativas. Con la aprobación de esta actividad desde las directivas de SUPRACAFE COLOMBIA S.A., fundamental para el proyecto, se avanza al paso final del método, Implementación de la mejora, y se procede a simular los CP en RT1.

Con el ideal de hacer uso de información obtenida en el marco comparativo realizado, y consignado en el Anexo B, se proponen y simulan cambios en la estructuración de la línea de trillado de café fundamentado con el desarrollo del método que comprende elementos de EE, objetivo principal de este proyecto.

Se inicia de nuevo con la implementación del método híbrido desde el paso Propuesta de oportunidad de mejora, con la realización del CP1, cambio de medio de transporte, de elevador neumático a elevador de cangilones, fundamentado por su consumo eléctrico, ver Figura 36.

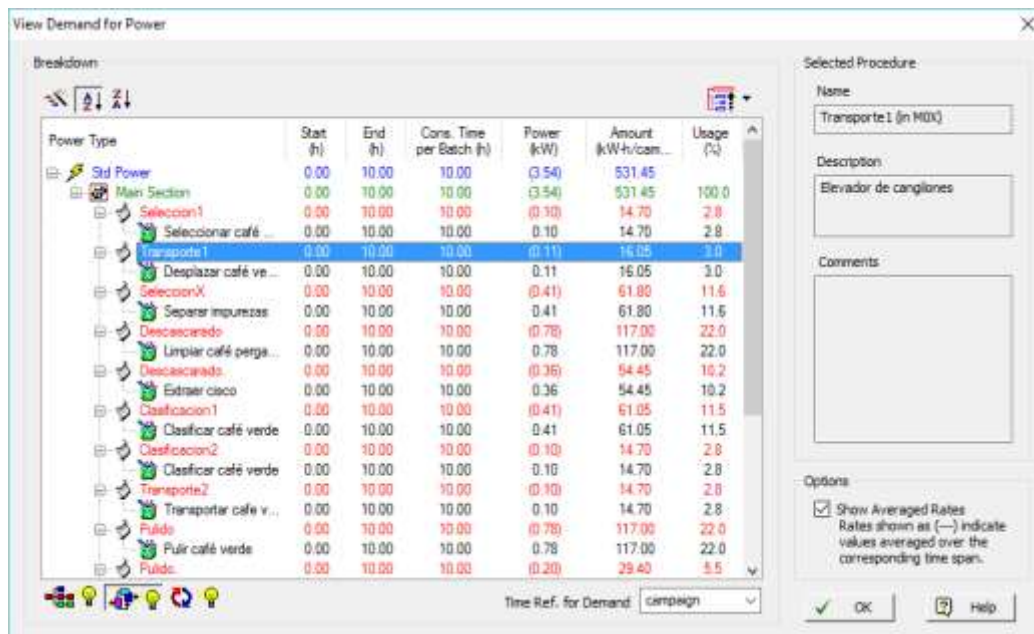


Figura 36. Consumo energético de la línea de trillado con el cumplimiento del CP1 mediante simulación en SuperPro Designer.

Como resultado del Análisis del nuevo desempeño energético por simulación, el reemplazo de método de transporte brinda un ahorro de 2% frente al aumento observado previamente en la incorporación de los nuevos módulos de equipo, conservando la operación y funcionalidad con respecto al flujo de material.

Esta disminución se refleja debido al consumo energético que representa cada módulo de equipo dentro de la línea de trillado en la empresa caso de estudio. En el Capítulo 1 Sección 1.3.2 se observan los consumos respectivos de los medios de

transporte, y debido a que manejan el mismo volumen de material, son viables de comparar para hacer una selección del método que aporte al concepto de eficiencia energética, ver Tabla 10.

| Motores asociados a módulos de equipo | Voltaje (V) | Corriente (A) | Horas | Días | Factor Eficiencia | Factor Potencia | Consumo Mensual (kWh) |
|---------------------------------------|-------------|---------------|-------|------|-------------------|-----------------|-----------------------|
| Motor tolva (motobomba tolva)         | 220         | 1.3           | 10    | 15   | 0.625             | 0.85            | 22.790625             |
| Motor elevador cangilones             | 220         | 1.1           | 10    | 15   | 0.625             | 0.71            | 16.108125             |

Tabla 10. Consumo energético de módulos de equipo empleados para acciones de transporte en la línea de trillado actual. Fuente propia

Como conclusión se obtiene un ahorro de 4.7 kWh/mensuales, y se aporta significativamente en la conservación de la materia prima, razones por las cuales es meritorio el cambio de medio de transporte en este punto.

El compromiso energético con la incorporación de la propuesta CP1 arroja un valor de 0.0268 kWh/kg dentro del *Análisis de costo beneficio* como resultado de la disminución del consumo energético, ítem principal para el desarrollo del método dentro de este requisito en cuestión, por lo que se avanza al paso final y se cumple con la *Implementación de la mejora*.

Continuando con el CP2, dentro del paso *Propuesta de oportunidad de mejora* en el inicio de una nueva implementación del método para EE, el cual conlleva a la eliminación de los módulos de equipo Tornillo sin fin y Extractor de episperma, al igual que la reubicación del módulo de equipo Pulidora, justificado con acciones técnicas, ver Figura 37.

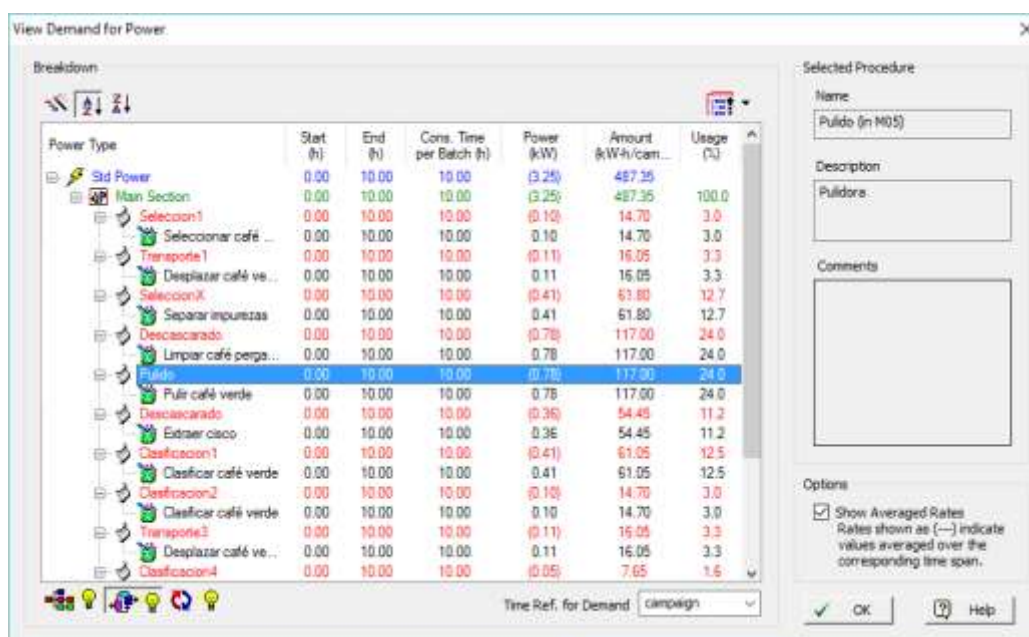


Figura 37. Consumo energético de la línea de trillado con el cumplimiento del CP2 mediante simulación en SuperPro Designer.

El consumo energético con el desarrollo del CP2 refleja una disminución aproximada del 9% desde el incremento referenciado en la incorporación inicial de los módulos de equipo nuevos en la línea de trillado, conclusión obtenida dentro del Análisis del nuevo desempeño energético por simulación. En el desarrollo de esta simulación se incluyó la MO1, que trata de la reubicación del módulo de equipo Pulidora, brindando beneficios netamente técnicos.

El aporte significativo de ahorro energético se refleja en el indicador IE1, el cual da como resultado un valor de 0.0246 kWh/kg dentro del Análisis del costo beneficio, confirmando así la certeza en la postulación de la mejora, culminando el paso de Implementación de la mejora.

Se da inicio a la última aplicación del método híbrido en la línea de trillado, donde se evalúa una propuesta de aspectos técnicos y con objetividad de ahorro energético, en su primer paso de Propuesta de oportunidad de mejora se aborda el CP3, en el cual se plantea la remoción del motor encargado de la retroalimentación en el módulo Mesa densimétrica, ver Figura 38.

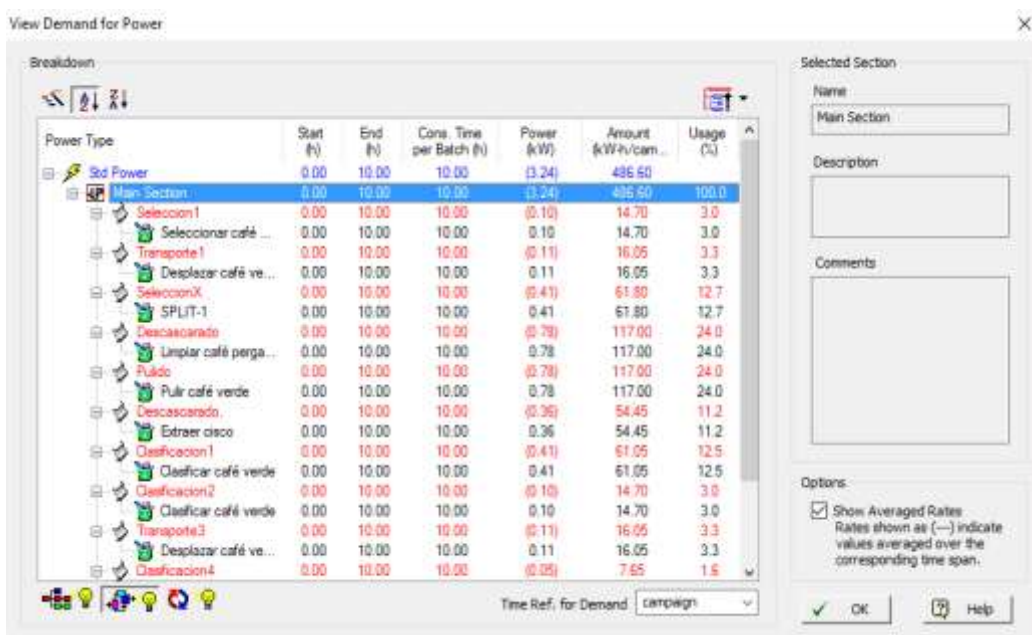


Figura 38. Consumo energético de la línea de trillado con el cumplimiento del CP3 mediante simulación en SuperPro Designer.

Dentro del Análisis del nuevo desempeño energético por simulación se concluye que CP3 implica una disminución energética en un bajo porcentaje, pero elimina labores que no son necesarias debido a las mejoras implementadas previamente (CP1 y CP2). Como valor de compromiso energético se observa un consumo de 0.0245 kWh/kg dentro del paso metódico de Análisis del costo beneficio. Al obtener una disminución en el indicador IE1 final, se finaliza la aplicación del método híbrido al cumplir el paso Implementación de la mejora de CP3.

Culminado el análisis energético de la reestructuración de la línea de trillado en la empresa SUPRACAFE COLOMBIA S.A, cumpliendo con la incorporación de nuevos módulos de equipo (Despedregadora y Clasificadora electrónica), propuestas de cambios (CP1, CP2 y CP3) y mejoras técnicas (MO1) sustentadas con el uso del método híbrido que comprende elementos de EE, se obtiene un incremento energético aproximado del 3.8% en comparación a la línea de trillado inicial pero brindando potenciales mejoras en los objetivos de calidad y desempeño del proceso.

El compromiso energético de la línea de trillado, con la implementación de la metodología de EE, aumenta con la incorporación de los módulos de equipo solicitados y disminuye a medida que se aprueban e implementan los cambios propuestos: CP1, CP2 (MO1) y CP3, ver Tabla 11.

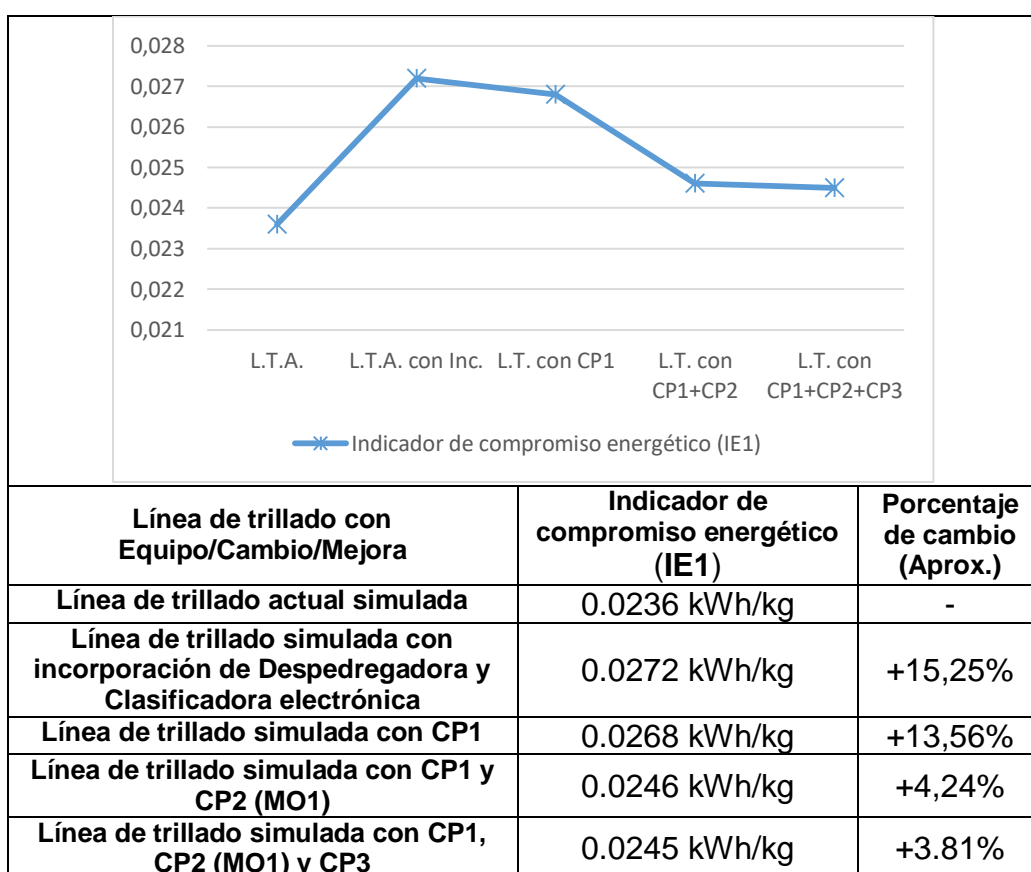
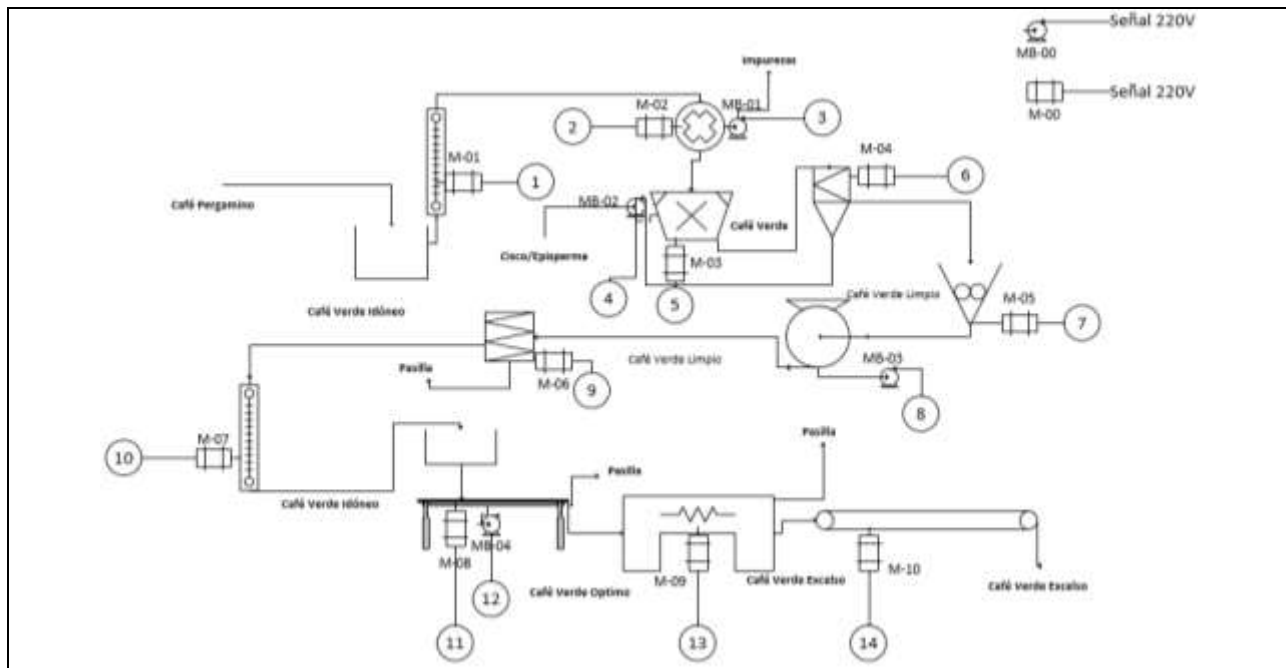


Tabla 11. Variación de indicadores energéticos desde la línea actual hasta la línea final reestructurada, obtenidos mediante simulación.

Partiendo de la línea reestructurada, definida por la aplicación del método híbrido de EE, e implementado en la herramienta software, se genera una representación en un modelo PFD, donde se resalta su respectiva tabulación de consumo eléctrico de motores y motobombas pertenecientes a la línea considerando una producción de 19800 kg de café excelso en un periodo de 15 días, ver Tabla 12.



| ID | Motores asociados a módulos de equipo y accesorios de la unidad | Voltaje (V) | Corriente (A) | Horas | Días | Factor Eficiencia | Factor Potencia | Consumo Mensual (kWh) |
|----|---|-------------|---------------|-------|------|-------------------|-----------------|-----------------------|
| 1  | Motor elevador de cangilones                                    | 220         | 1.1           | 10    | 15   | 0.625             | 0.71            | 16.108125             |
| 2  | Motor despedregadora (motor vibración despedregadora)           | 220         | 0.5           | 10    | 15   | 0.625             | 0.71            | 7.3219                |
| 3  | Motor despedregadora (motobomba despedregadora)                 | 220         | 3.3           | 10    | 15   | 0.625             | 0.8             | 54.45                 |
| 4  | Motor Trilladora  | 220         | 7             | 10    | 15   | 0.625             | 0.81            | 116.94375             |
| 5  | Motor basura trilladora(Motobomba de impurezas)                 | 220         | 3.3           | 10    | 15   | 0.625             | 0.8             | 54.45                 |
| 6  | Motor Criba   | 220         | 1             | 10    | 15   | 0.625             | 0.71            | 14.64375              |
| 7  | Motor pulidora  | 220         | 7             | 10    | 15   | 0.625             | 0.81            | 116.94375             |
| 8  | Motor catadora (Motobomba Venturi)                              | 220         | 3.7           | 10    | 15   | 0.625             | 0.8             | 61.05                 |
| 9  | Motor monitor almendra  | 220         | 1             | 10    | 15   | 0.625             | 0.71            | 14.64375              |
| 10 | Motor elevador cangilones                                       | 220         | 1.1           | 10    | 15   | 0.625             | 0.71            | 16.108125             |
| 11 | Motor mesa densidad (Motobomba mesa)                            | 220         | 7.8           | 10    | 15   | 0.625             | 0.79            | 25.41825              |

|    |  |     |      |    |    |       |      |          |
|----|--|-----|------|----|----|-------|------|----------|
| 12 | Motor mesa densidad (Motor vibración mesa) | 220 | 0.8  | 10 | 15 | 0.625 | 0.8  | 2.64     |
| 13 | Motor clasificadora electrónica            | 220 | 0.43 | 10 | 15 | 0.625 | 0.85 | 7.73     |
| 14 | Motor banda escogedora                     | 220 | 0.5  | 10 | 15 | 0.625 | 0.95 | 1.959375 |

Tabla 12. Valores de alimentación y consumo energético referenciado a módulos de equipo y accesorios en la línea de trillado reestructurada. Fuente propia

La auditoría energética realizada permite observar que los motores de los módulos de equipo de la línea no se encuentran en puntos de operación, lo que significa que la empresa no está aprovechando los equipos a su máxima capacidad recomendada por el diseño del fabricante, por lo que se podría afirmar que se encuentran sobredimensionados, es decir, operan por debajo de los valores nominales, por lo que representan pérdida en capacidad de producción.

La recomendación es aumentar el flujo de proceso en la línea aportando al correcto dimensionamiento de los motores, aprovechando su configuración de fábrica. Aquellos motores que no se benefician con la recomendación, pueden entrar en consideración de cambio por un motor de menor capacidad y que asegure su uso en cercanía de valores nominales.

La aplicación del método híbrido, soportado en el diagnóstico energético, no brinda como cambio y/o mejora la propuesta de motores de tecnología trifásica debido a la inversión que esto conllevaría, como principales factores la adquisición de los motores y adecuación del tendido referente al suministro eléctrico para su operación. Cabe resaltar que los motores monofásicos representan un consumo energético elevado en comparación con la misma cantidad de motores de configuración trifásica, que representan el 57,7% del consumo energético de motores monofásicos que posean su misma potencia mecánica final.

De la información de consumo eléctrico (kWh) de cada módulo de equipo de la línea de trillado de café reestructurada obtenida en la Tabla 10 se genera una gráfica con aspectos porcentuales de dichos consumos ver Figura 39.

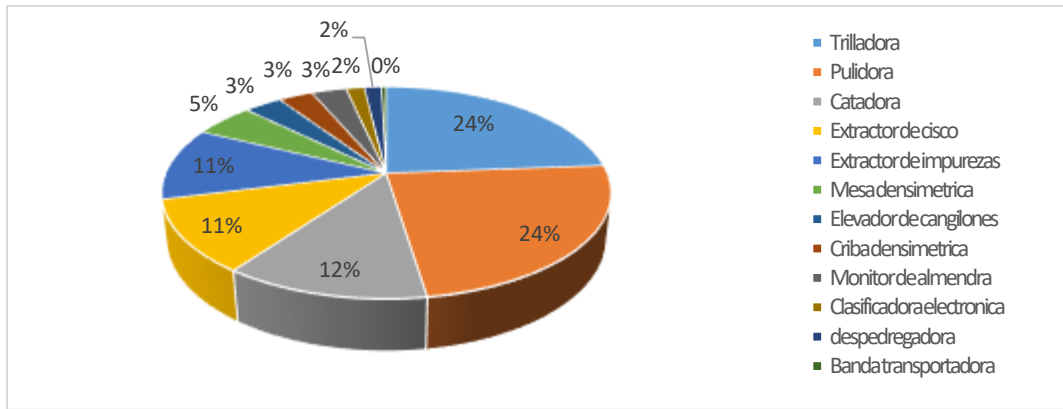
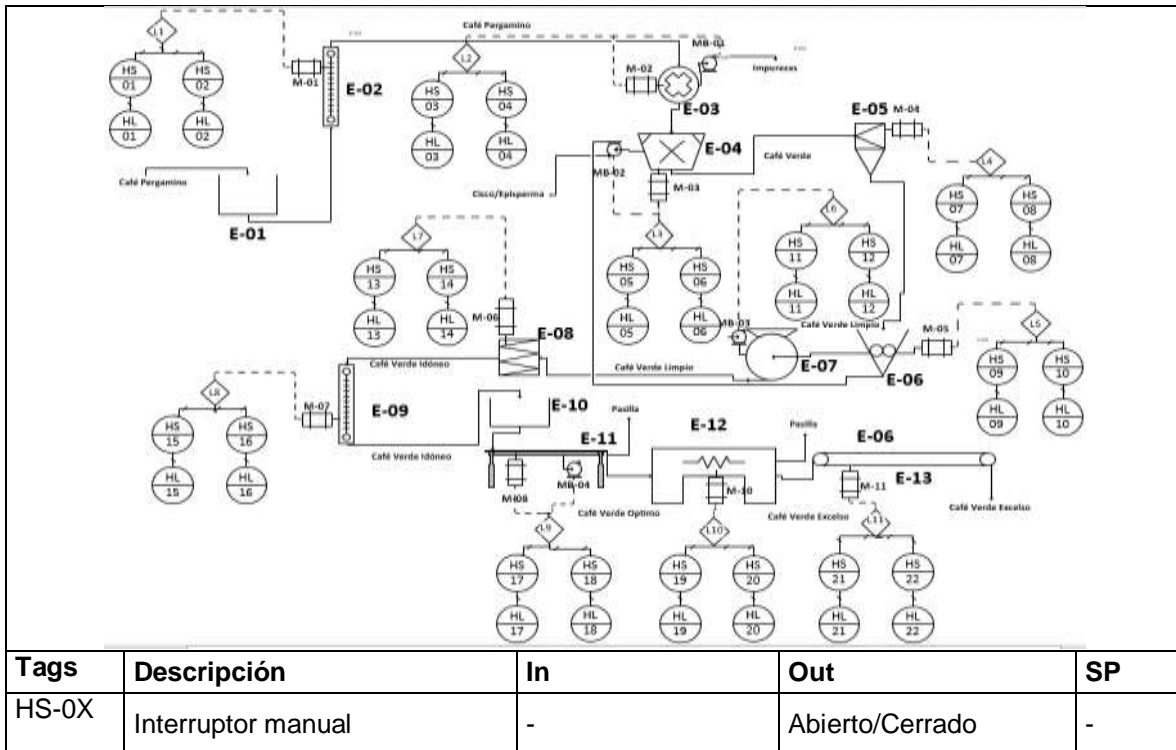


Figura 39. Porcentaje de consumo energético de la línea de trillado de café reestructurada y módulos de equipo en la empresa SUPRACAFE COLOMBIA S.A. Fuente propia

Como resultado del análisis porcentual de los módulos de equipo de la línea reestructurada se observó, que en tres (3) de sus módulos de equipo (trilladora (24%), pulidora (24%), catadora (12%)) tienen un consumo eléctrico del 60% del total de la línea de trillado. Dejando un 40% para los nueve (9) módulos de equipo restantes en la línea.

La reestructuración de la línea comprende el uso de sistemas de control de los módulos de equipo, por lo que se representan botones de arranque y parada independiente dentro cada módulo, como también el sistema de protección del circuito según estandarización propuesta en ISA 5.1, ver Figura 40. Diagrama P&ID de la línea de trillado reestructurada.



|       |                                 |                               |                      |   |
|-------|---------------------------------|-------------------------------|----------------------|---|
| HL-0X | Luz piloto                      | -                             | Encendida/Apagada    | - |
| M-01  | Motor elevador de cangilones    | 220-440V                      | 3420 rpm             | - |
| M-02  | Motor despedregadora            | 220-440V                      | 1730 rpm             | - |
| MB-01 | Motobomba despedregadora        | 220-440V                      | 1730 rpm             | - |
| M-03  | Motor trilladora                | 220-440V                      | 1700 rpm             | - |
| MB-02 | Motobomba trilladora            |                               |                      |   |
| M-04  | Motor criba                     | 220-440V                      | 1730 rpm             | - |
| M-05  | Motor pulidora                  | 220-440V                      | 1700 rpm             | - |
| MB-03 | Motobomba Venturi               | 220-440V                      | 1730 rpm             | - |
| M-06  | Motor monitor                   | 220-440V                      | 1700 rpm             | - |
| M-07  | Motor elevador cangilones       | 220-440V                      | 1700 rpm             | - |
| M-08  | Motor vibración mesa            | 220-440V                      | 1710 rpm             | - |
| MB-04 | Motobomba Venturi               | 220-440V                      | 1730 rpm             | - |
| M-09  | Motor clasificadora electrónica | 220-440V                      |                      | - |
| M-10  | Motor banda                     | 220-440V                      | 1750 rpm             | - |
| E-01  | Tolva inicial                   | Café pergamino                | Café pergamino       | - |
| E-02  | Elevador de cangilones          | Café pergamino 10-12% humedad | Café pergamino       | - |
| E-03  | Despedregadora                  | Café pergamino                | Impurezas            | - |
| E-04  | Trilladora                      | Café pergamino                | Café verde           | - |
| E-05  | Criba densimétrica              | Café verde                    | Café verde           | - |
| E-06  | Pulidora                        | Café verde idóneo             | Café verde limpio    | - |
| E-07  | Catadora                        | Café verde                    | Café verde optimo    | - |
| E-08  | Monitor de almendra             | Café verde optimo             | Café verde 0.9-1.3mm | - |
| E-09  | Elevador de cangilones          | Café verde limpio             | Café verde limpio    | - |
| E-10  | Tolva de mesa densimétrica      | Café verde limpio             | Café verde limpio    | - |
| E-11  | Mesa densimétrica               | Café verde limpio             | Café verde excelso   | - |
| E-12  | Clasificadora electrónica       | Café verde excelso            | Café verde excelso   | - |
| E-13  | Banda transportadora            | Café verde excelso            | Café verde excelso   | - |

Figura 40. Diagrama P&ID de la línea de trillado reestructurada. Fuente propia



Con el desarrollo del RT2 se concluye la nueva estructuración de la línea de trillado de café para la empresa caso de estudio, sustentada con elementos de eficiencia energética. Cabe recalcar que los cambios propuestos tienen viabilidad de implementación, justificados en el análisis de las líneas de trillado instaladas en las empresas donde se realizaron los marcos comparativos.

### 2.1.3 Cumplimiento de los requisitos técnicos 3 y 4

Para los requerimientos técnicos RT3 y RT4, se les da cumplimiento en el Anexo D donde se especifica el trabajo realizado para presentar propuestas que cumplan lo planteado dentro de estos.

Una vez culminado el proceso para dar cumplimiento a los 4 requisitos técnicos se procede a realizar el cumplimiento del único requisito funcional existente en el proyecto.

## 2.2 CUMPLIMIENTO DEL REQUERIMIENTO FUNCIONAL DEL PROCESO DE TRILLADO DE CAFÉ

### 2.2.1 Cumplimiento del requisito funcional 1

**RF1:** Identificar los cambios en el flujo de proceso ocasionados por la reestructuración propuesta, y reflejados en los modelos de control de proceso y de control procedimental de la nueva línea de trillado de café.

De acuerdo al cumplimiento de los requerimientos técnicos 1 y 2 la línea de trillado va a sufrir una serie de cambios y/o mejoras que implican una reactualización de los modelos ISA S.88. A continuación se expone el modelo físico, de control procedimental y de control de proceso de la línea de trillado reestructurada, detallando los cambios sufridos por incorporación de la nueva maquinaria en color verde, y los sufridos por cambios o mejoras en color amarillo.

### Modelo físico del proceso de trilla de café pergamino

El modelo físico de la actual línea de trillado se caracteriza por tener 2 unidades, 11 módulos de equipo y 17 módulos de control. De acuerdo a la línea de trillado reestructurada en el presente proyecto, propuesta por los autores, las unidades del proceso se conservan, los módulos de equipo sufren una adición de 2 nuevas maquinarias (verde) y posterior cambios y mejores por CP1 (amarillo), y los módulos de control se mantienen, junto a aquellos relacionados con la maquinaria nueva, ver Figura 41.

| Célula de proceso           | Unidad                     | Módulo de equipo       | Módulo de control                   |
|-----------------------------|----------------------------|------------------------|-------------------------------------|
| Producción de café trillado | Trillado de café pergamino | Elevador de cangilones | Dosificar café pergamino (operario) |
|                             |                            |                        | Motor elevador de cangilones        |
|                             |                            | Despedregadora         | Motor vibración despedregadora      |
|                             |                            |                        | Motobomba despedregadora            |

|                      |                              |                           |                                 |
|----------------------|------------------------------|---------------------------|---------------------------------|
|                      |                              | Trilladora                | Motor trilladora                |
|                      |                              |                           | Motobomba de impurezas          |
|                      |                              | Criba densimetrica        | Motor criba                     |
|                      |                              | Pulidora                  | Motor pulidora                  |
|                      | Clasificación de café verde  | Catadora                  | Motobomba Venturi               |
|                      |                              | Monitor de almendra       | Motor monitor                   |
|                      |                              | Elevador de cangilones    | Motor elevador cangilones       |
|                      |                              | Mesa densimetrica         | Motor vibración mesa            |
|                      |                              |                           | Motobomba mesa densimetrica     |
|                      |                              | Clasificadora electrónica | Motor clasificadora electrónica |
| Banda transportadora | Motor banda                  |                           |                                 |
|                      | Selección café verde excelso |                           |                                 |

Figura 41. Modelo físico del proceso propuesto de elaboración de café trillado. Fuente propia

### Modelo de control procedimental del proceso de trilla de café pergamino

En el modelo de control procedimental correspondiente a la actual línea de trillado se cuenta con 10 operaciones y 17 fases a ejecutar en el proceso de trillado de café. A continuación se presenta la actualización del modelo, en donde se conservan los procedimientos de unidad, se incursionan nuevas operaciones de clasificado como consecuencia de las nuevas maquinarias (verde), dando como consecuencia una mejor limpieza del café pergamino y una clasificación más minuciosa para la obtención del café verde excelso; también se realizan MO1,CP2 y CP3 unos cambios y mejoras (amarillo) en algunas operaciones, ocasionando la obtención de un café verde limpio en la unidad de trillado. Como apreciación final se disminuyen tres (3) fases (limpiar filtro, desplazar café verde, realimentar café verde excluido) del modelo de control procedimental de la línea actual (ver Figura 12). a ejecutar en un 17.65% debido a que no aportaban valor y prolongaban el compromiso del flujo de proceso dentro del mismo, según lo propuesto en la reestructuración de la línea de trillado, ver Figura 42.

| Procedimiento                | Procedimiento de unidad        | Operación del proceso | Fase                               |
|------------------------------|--------------------------------|-----------------------|------------------------------------|
| Elaboración de café trillado | Trillado de café pergamino     | Transporte 1          | Suministrar café pergamino         |
|                              |                                |                       | Desplazar café pergamino           |
|                              |                                | Descascarado          | Limpiar café pergamino             |
|                              |                                |                       | Extraer cisco e impurezas          |
|                              |                                | Selección 1           | Seleccionar café verde             |
|                              | Pulido                         | Pulir café verde      |                                    |
|                              | Clasificación de café verde    | Clasificación 1       | Clasificar café verde por peso     |
|                              |                                | Clasificación 2       | Clasificar café verde por tamaño   |
|                              |                                | Transporte 2          | Desplazar café verde               |
|                              |                                | Clasificación 3       | Mover café verde                   |
|                              |                                |                       | Clasificar café verde por densidad |
|                              |                                | Clasificación 4       | Clasificar café verde por densidad |
| Selección 2                  |                                | Desplazar café verde  |                                    |
|                              | Seleccionar café verde excelso |                       |                                    |

Figura 42. Modelo de control procedimental del proceso propuesto de elaboración de café trillado. Fuente propia

### Modelo de control de proceso del trillado de café pergamino

En la elaboración del modelo de control de la línea actual se observan 11 operaciones y 16 acciones en la ejecución de 2 etapas del proceso. En la actualización de este modelo, como consecuencia de la propuesta de reestructuración, se conservan las etapas del proceso, se cuenta con nuevas etapas debido a la incorporación de los módulos de equipo Despedregadora y Clasificadora electrónica (verde), conservando la cantidad de operaciones iniciales. En el mismo orden, se disminuye una (1) acción de proceso, que equivale a un 6.25% en cuanto a la reestructuración propuesta que reflejaría mejoras en el flujo de proceso, ver Figura 43.

| Proceso                 | Etapas de proceso                       | Operaciones de proceso  | Acciones de proceso  |
|-------------------------|---|---|--|
| <b>Trillado de café</b> | <b>Trillar café pergamino</b>           | Transportar café pergamino  | Suministrar sacos de 40kg de café pergamino con humedad de 10-12% (operario).<br>Encender motor asociado al elevador de cangilones para alimentar el ducto hacia la despedregadora.  |
|                         |   | Filtrar impurezas   | Encender motor asociado a la vibración de la despedregadora para retirar elementos no pertenecientes a la materia prima, por valores de densidad de los mismos.<br>Encender motobomba asociada a la despedregadora para producir un flujo de aire y desplazar las impurezas livianas que se encuentren junto al café pergamino |
|                         |   | Descascarar café pergamino  | Encender motor asociado al pistón de la trilladora.  |
|                         |   |   | Encender extractor de pergamino con potencia máxima de motobomba.  |
|                         |   | Seleccionar café verde  | Encender motor asociado a la bandeja de la criba densimétrica, para separar el café verde del café pergamino.  |
|                         |   | Pulir café verde  | Encender motor asociado a la pulidora para retirar la episperma de los granos de café verde.   |
|                         |   | <b>Clasificar café verde</b>  | Clasificar café verde limpio por peso  |
|                         | Clasificar café verde óptimo por tamaño |   | Encender motor asociado a la vibración del monitor de almendra para filtrar granos de 0.9-1.3mm.   |
|                         | Transportar café verde óptimo           |   | Encender motor asociado al elevador de cangilones para alimentar la tolva de la mesa densimetría con café verde idóneo.  |
|                         | Clasificar café verde idóneo            |   | Encender motobomba asociada a la mesa densimétrica para producir un flujo de aire y evitar atascamiento del café verde idóneo.   |
|                         |   |   | Encender motor asociado a la vibración de la mesa densimétrica para la obtención, por densidad, de los granos de café verde excelso.   |
|                         | Clasificar café verde excelso           | Encender motor asociado a la clasificadora electrónica para la obtención, por percepción de color, de los granos de café verde excelso. |  |

|  |  |                                |   |
|--|--|--------------------------------|---|
|  |  | Transportar café verde excelso | Desplazar sobre la banda transportadora el flujo de café verde excelso para selección manual final. |
|--|--|--------------------------------|---|

Figura 43. Modelo de control del proceso propuesto de elaboración de café trillado. Fuente propia

### 3. SIMULACIÓN DEL PROCESO

El desarrollo de simulaciones en herramientas software brinda una ayuda en vista de lograr resultados en escenarios ideales donde factores externos no afectan la producción. Dentro del presente proyecto se simularan los pasos pertinentes para obtener información correspondiente al proceso de trillado de café, desarrollado en la empresa caso de estudio, con la intención de posteriormente analizar el consumo energético y valores de producción a relacionar con la implementación de la metodología de EE y tomar una decisión sobre las propuestas generadas.

#### 3.1 SIMULACIÓN DE LA LÍNEA ACTUAL DE TRILLADO DE CAFÉ DE LA EMPRESA SUPRACAFÉ COLOMBIA S.A.

Se formaliza la simulación de la secuencia del proceso de la línea de trillado de café de la empresa SUPRACAFÉ COLOMBIA S.A., haciendo uso de la herramienta computacional SuperPro Designer, información de los modelos obtenidos en la aplicación de los estándares ISA (S-88.01 y S95.01), e información relevante de entrevistas y marcos comparativos realizados, ver Anexo B.

La ejecución de la simulación para el cumplimiento de RT1 y RT2 se desarrolla con información de suma importancia: 1) los requerimientos de simulación, en los cuales se definen las especificaciones del proceso, ver Anexo E y 2) el análisis del consumo energético del proceso de trillado de café para las líneas de trillado simuladas: actual y reestructurada.

##### 3.1.1 Requerimientos de simulación

Como primera instancia se establecen condiciones de operación y parámetros específicos que provienen de los modelos del estándar ISA 5.1; los parámetros mencionados de la línea actual se tratan en el *Capítulo 1 Sección 1.3.2*, y los datos para la propuesta de línea reestructurada se detallan en el *Capítulo 2 Sección 2.1.2*. Para realizar de forma apropiada la simulación se hacen necesarios los valores de consumo energético de los módulos de equipo, detallados para expresar un consumo mensual, la cantidad de materia prima involucrada en un *batch* de producción y los tiempos de compromiso de los módulos de equipo y accesorios.

##### 3.1.2 Requerimientos de proceso

##### Cantidad de materia prima en el proceso de trillado de café

Con lo estipulado en las entrevistas al personal perteneciente a SUPRACAFÉ COLOMBIA S.A y lo detallado dentro de los alcances de producción, se definen

requerimientos a tener en cuenta para realizar una simulación aproximada del proceso, desde las etapas (unidades) hasta los recursos relacionados en la producción, ver Tabla 13.

| ENTRADA        | Cantidad (kg) | ETAPA                       | SALIDA       | Cantidad (kg) |
|----------------|---------------|-----------------------------|--------------|---------------|
| Café pergamino | 1600          | Trillado de café pergamino  | Café verde   | -             |
| Café verde     | -             | Clasificación de café verde | Café excelso | 1320          |

Tabla 13. Materiales comprometidos en un batch diario del proceso de trillado.

Se expresa en la información recopilada que el material involucrado en un batch de producción es de 24000kg de café pergamino, en un compromiso de 15 días de producción, equivalente a una relación de 1600kg diarios. Con el factor de rendimiento expresado por el personal, se logra una cantidad de 1320kg de café verde excelso al cumplir con la producción estipulada diaria.

### Tiempos de ejecución de las fases del proceso de trillado de café

La ejecución de las operaciones realizadas en cada módulo de equipo tiene un tiempo aproximado de funcionamiento brindado por el personal involucrado en el proceso, ver Anexo E. Dentro de la simulación, se especifican tiempos productivos en cada equipo y accesorio en la línea de trillado, y sus repeticiones dentro del *batch* diario de producción de café excelso, ver Tabla 14.

| Motores asociados a módulos de equipo y accesorios de la unidad | Tiempo de operación (hrs) | Repeticiones por batch | Tiempo final por batch (hrs) |
|---|---------------------------|------------------------|------------------------------|
| Motor tolva (motobomba tolva)                                   | 2.5                       | 4                      | 10                           |
| Motor Trilladora  | 2.5                       | 4                      | 10                           |
| Motor basura trilladora (Motobomba de impurezas)                | 2.5                       | 4                      | 10                           |
| Motor Criba   | 2.5                       | 4                      | 10                           |
| Motor catadora (Motobomba Venturi)                              | 2.5                       | 4                      | 10                           |
| Motor monitor almendra  | 2.5                       | 4                      | 10                           |
| Motor tornillo sin fin  | 2.5                       | 4                      | 10                           |
| Motor pulidora  | 2.5                       | 4                      | 10                           |
| Motor basura pulidora (Motobomba de pulido)                     | 2.5                       | 4                      | 10                           |
| Motor elevador cangilones                                       | 2.5                       | 4                      | 10                           |
| Motor mesa densidad (Motobomba mesa)                            | 0.5                       | 4                      | 2                            |
| Motor mesa densidad (Motor vibración mesa)                      | 0.5                       | 4                      | 2                            |
| Motor realimentación mesa                                       | 0.5                       | 4                      | 2                            |
| Motor banda escogedora  | 0.5                       | 4                      | 2                            |

Tabla 14. Tiempos de compromiso de módulos de equipo y accesorios de la línea actual de trillado.

Fuente propia

En el desarrollo del proceso no es meritorio el conocimiento de duración de cada fase del proceso, debido a que el desempeño energético está relacionado con los tiempos de compromiso de los módulos de equipo y accesorios previamente consignados.

La línea reestructurada manejará la misma disposición de tiempos de los módulos de equipo definidos en Tabla 14, y los módulos incursionados tendrán un tiempo específico debido a su ubicación en la línea de trillado, ver Tabla 15.

| <b>Motores asociados a módulos de equipo incursionados en la reestructuración</b> | <b>Tiempo de operación (hrs)</b> | <b>Repeticiones / batch</b> | <b>Tiempo final por batch (hrs)</b> |
|---|----------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|
| Motor elevador de cangilones  | 2.5                              | 4                           | 10                                  |
| Motor despedregadora (motor vibración despedregadora)                             | 2.5                              | 4                           | 10                                  |
| Motor despedregadora (motobomba despedregadora)                                   | 2.5                              | 4                           | 10                                  |
| Motor clasificadora electrónica   | 0.5                              | 4                           | 2                                   |

Tabla 15. Tiempos de compromiso de módulos de equipo y accesorios incursionados a la línea de trillado. Fuente propia

### 3.1.3 Requerimientos de equipos

#### Equipos utilizados en el proceso de trilla de café en la línea actual

Dentro del proceso de trillado de café en las instalaciones de SUPRACAFE COLOMBIA S.A se cuenta con una cantidad de equipos y accesorios involucrados en la obtención de café excelso. Las etapas del proceso se denotarán como las unidades consignadas previamente en el cumplimiento del estándar ISA 88 en el *Capítulo 1 Sección 1.3.2*, ver Figura 44.

| <b>Etapas</b>               | <b>Módulo de equipo y accesorios</b>       |
|-----------------------------|--|
| Trillado de café pergamino  | Elevador neumático                         |
|                             | Filtro de impurezas                        |
|                             | Trilladora, extractor de pergamino         |
| Clasificación de café verde | Criba densimétrica                         |
|                             | Catadora                                   |
|                             | Monitor de almendra                        |
|                             | Tornillo sin fin                           |
|                             | Pulidora, extractor de episperma           |
|                             | Elevador de cangilones                     |
|                             | Mesa densimétrica, motor de realimentación |
|                             | Banda transportadora                       |

Figura 44. Módulos de equipo y accesorios pertenecientes a la línea actual de trillado. Fuente propia

## Equipos utilizados en el proceso de trilla de café en la línea reestructurada

Con el objetivo de simular la propuesta de reestructuración, obtenida con el método híbrido de EE, mediante la herramienta software, se especifican los equipos y accesorios que hacen parte de dicha propuesta de línea de trillado, ver Figura 45.

| Etapas                      | Módulo de equipo y accesorios      |
|-----------------------------|------------------------------------|
| Trillado de café pergamino  | Elevador de cangilones             |
|                             | Despedregadora                     |
|                             | Trilladora, extractor de pergamino |
|                             | Criba densimetrica                 |
|                             | Pulidora                           |
| Clasificación de café verde | Catadora                           |
|                             | Monitor de almendra                |
|                             | Elevador de cangilones             |
|                             | Mesa densimetrica                  |
|                             | Clasificadora electrónica          |
|                             | Banda transportadora               |

Figura 45. Módulos de equipo y accesorios pertenecientes a la línea reestructurada de trillado.  
Fuente propia

Los equipos listados en Figura 45 comprenden la reestructuración de la línea de trillado en la simulación realizada, la cual difiere de lo presentado como línea de trillado actual en el aval de los módulos de equipo incursionados (Despedregadora y Clasificadora electrónica) y los cambios propuestos (CP1, CP2 y CP3).

### 3.2 SIMULACIÓN DEL PROCESO DE TRILLADO DE CAFÉ PERGAMINO

Con la finalidad controlar el escenario energético y medir el impacto de la propuesta de reestructuración, se representa mediante la herramienta software SuperPro Designer la secuencia de los cambios propuestos dentro de los requerimientos del capítulo anterior, complementados con la aplicación del método híbrido de EE [10].

#### Simulación de línea actual de trillado

Mencionados los requerimientos a cumplir, se desarrolla la simulación del proceso de trillado de café comprometido en la línea actual de trillado, para lo cual se estipulan 2 unidades dentro del proceso, ver Figura 46, explicado a cabalidad en el *Capítulo 2 Sección 2.1*.

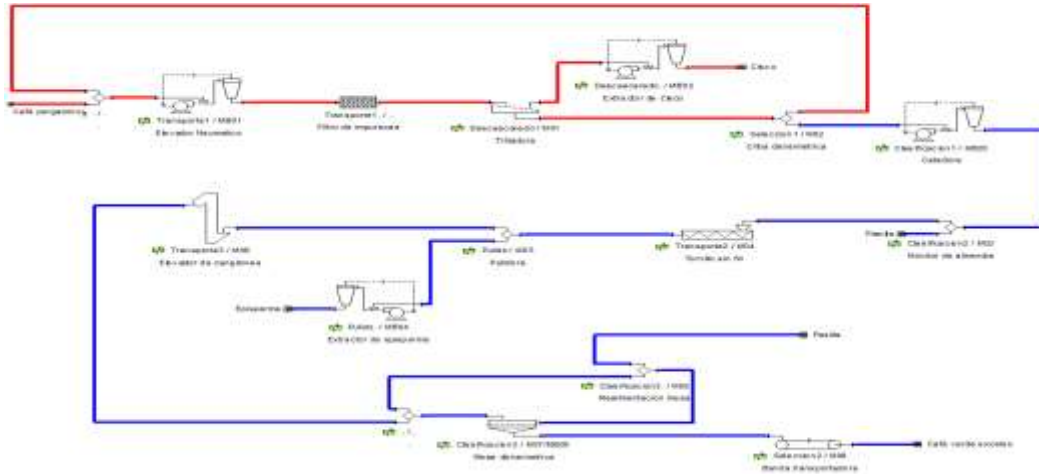


Figura 46. Línea actual simulada en SuperPro Designer. Fuente propia

Las etapas de la línea de trillado tienen el mismo nombre de las unidades del proceso denotadas en el *Capítulo 1*, desarrollo del estándar ISA 88; posteriormente, en el *Capítulo 2* se realiza el estudio energético línea de trillado en la actualidad donde se concluye un compromiso energético previamente estipulado dentro del cumplimiento del RT2, denotado como **IE1**.

La información para la obtención del indicador energético, expresado dentro de las simulaciones, se observa en pestañas que brindan el consumo energético en el tiempo seleccionado como “campaña”, haciendo alusión a un mes de producción, y la materia prima comprometida en un día de ejecución del proceso, ver Figura 47.

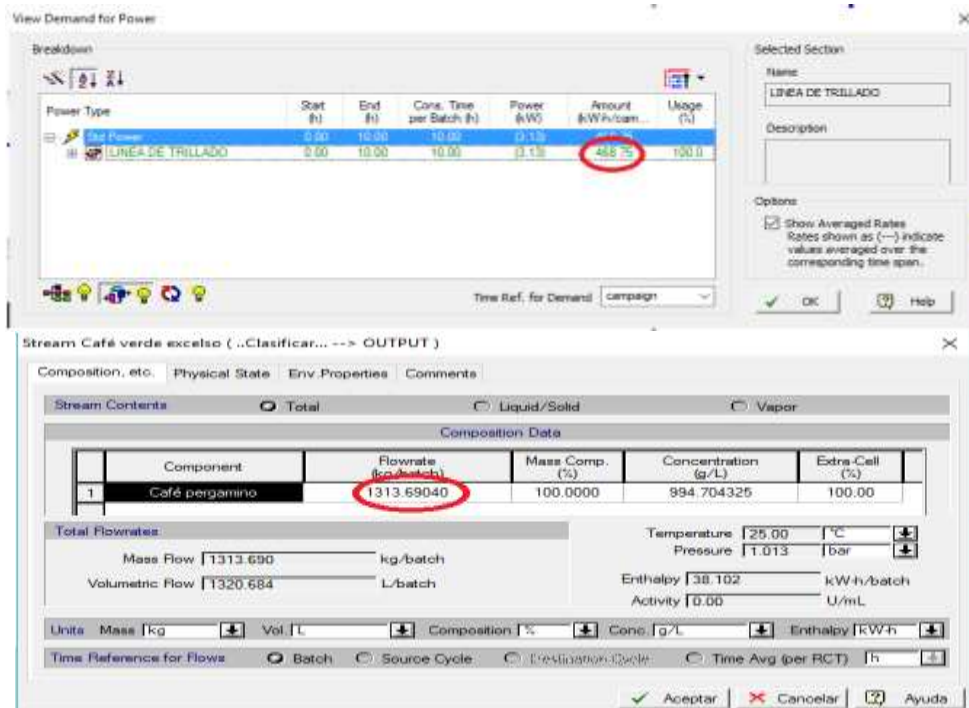


Figura 47. Valores de recursos comprometidos (consumo energético y producción final) en la línea de trillado actual mediante simulación en SuperPro Designer.



El valor de producción final es complejo de lograr exactamente debido a las pérdidas variables a lo largo del proceso, al no contar con valores exactos y ser dependiente de la calidad de la materia prima. El consumo energético concuerda con el valor utilizado en el **IE1** especificado en el inicio del cumplimiento del RT2, en el *Capítulo 2 Sección 2.1.2*, obtenido de la simulación expresada como línea actual:

$$IE1 = 0.0236 \text{ kWh/kg}$$

### Simulación y análisis de consumo energético de línea reestructurada de trillado

Partiendo del desarrollo de los requerimientos técnicos del capítulo anterior, se desarrolla paso a paso la reestructuración de la línea de trillado con los CP listados en el RT1, confirmados con la implementación de un método híbrido de EE. Dentro de la línea de trillado reestructurada se mantendrán las etapas de la línea actual, al igual que la representación de las conexiones por colores específicos.

Como primer paso se cumple con la incorporación de los módulos de equipo Despedregadora y Clasificadora electrónica, como petición de las directivas de la empresa SUPRACAFE COLOMBIA S.A, ver Figura 48.

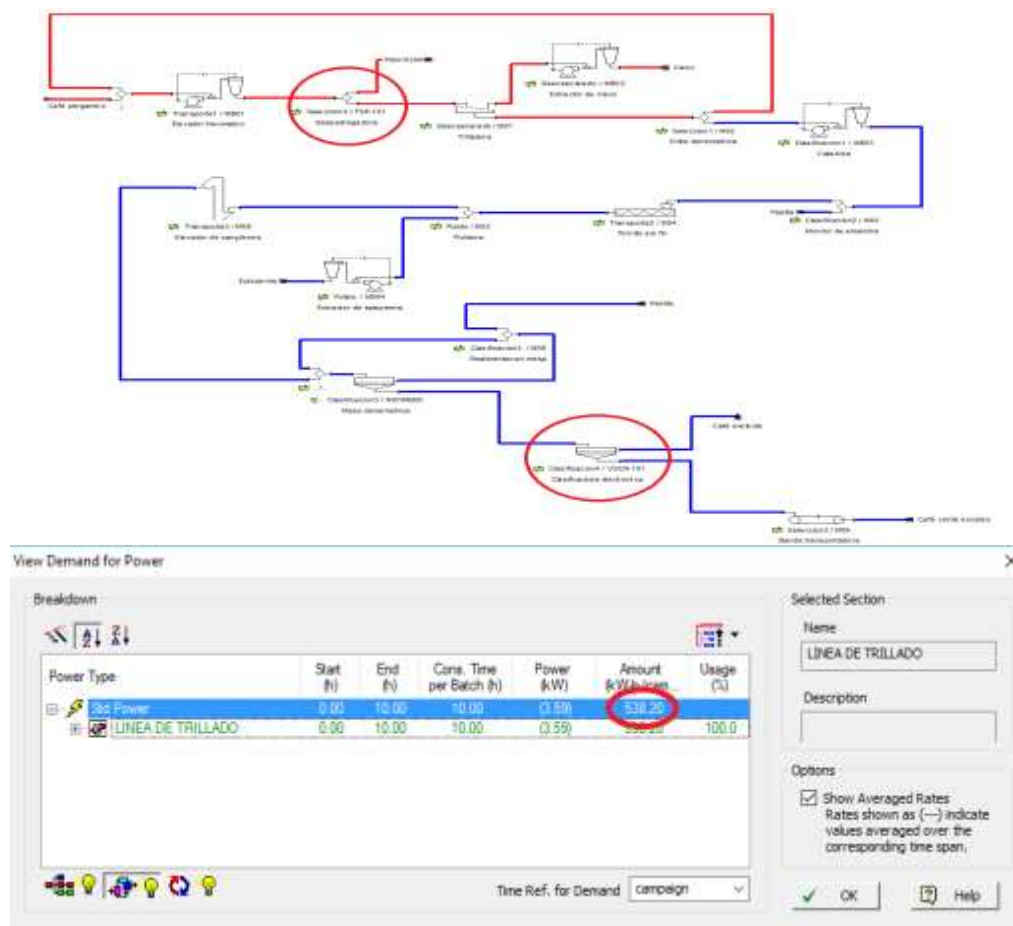


Figura 48. Representación y consumo energético de la línea de trillado con nuevos módulos de equipo incursionados mediante simulación en SuperPro Designer.

El aumento en el consumo energético es de aproximadamente un 15%, dando como resultado un IE1 de 0.0272 kWh/kg, escenario propicio para implementar cambios con enfoques en elementos de EE que repercutan en una disminución del compromiso energético en la línea de trillado.

El primer cambio a confrontar con el método híbrido es el CP1, resaltando en color verde el cambio en el medio de transporte en la unidad de trillado, ver Figura 49.

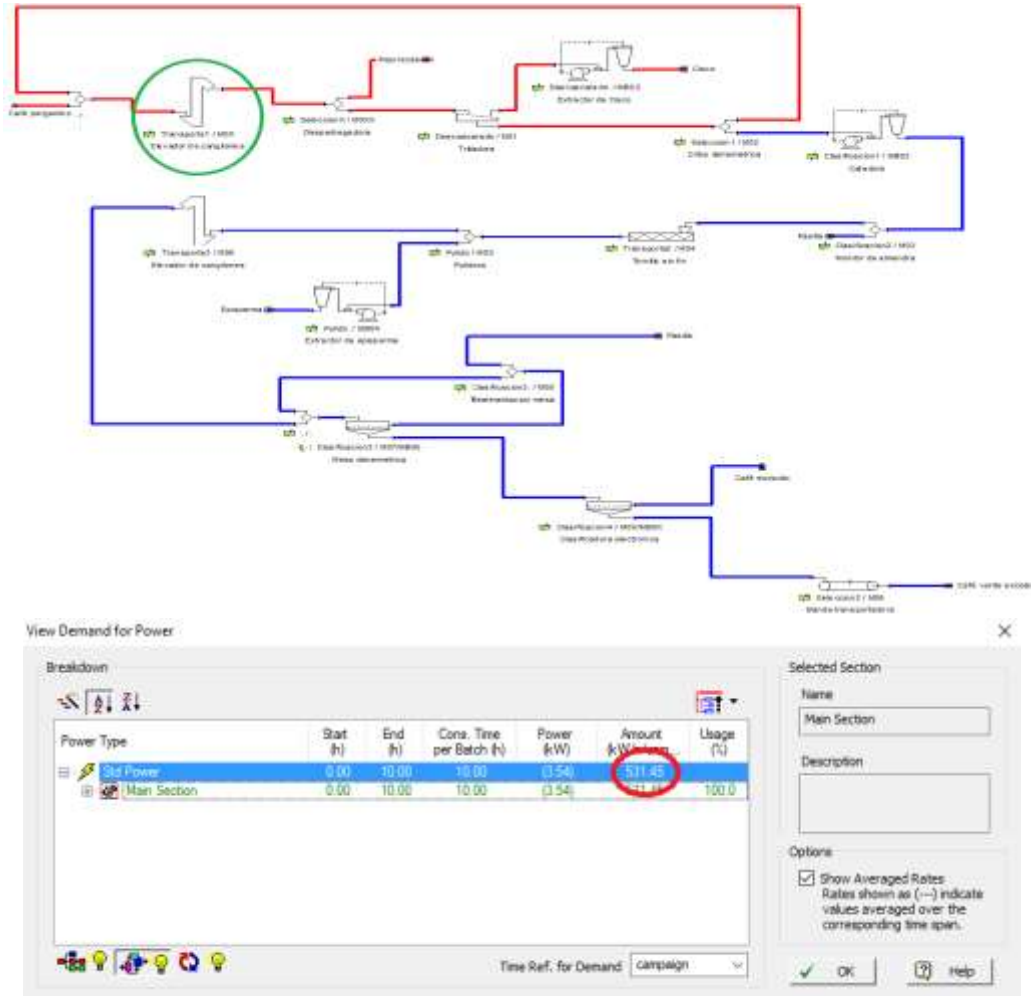


Figura 49. Representación y consumo energético de la línea de trillado con la implementación del CP1 mediante simulación en SuperPro Designer.

El cambio realizado tiene un impacto positivo en relación a la temática de EE, logrando una disminución eléctrica aproximadamente del 1.7% frente al primer aumento. Junto al ahorro expresado, se lograría una posible mejora en la integridad de los granos de café pergamino expresado como conclusión en los entrevistados en los marcos comparativos realizados, ver Anexo B.

Prosiguiendo con los cambios, se presenta la incorporación del CP2, donde se eliminan varios módulos de equipo y accesorios prescindibles, debido a la

reubicación dentro de la línea de trillado del módulo denominado Pulidora, ver Figura 50.

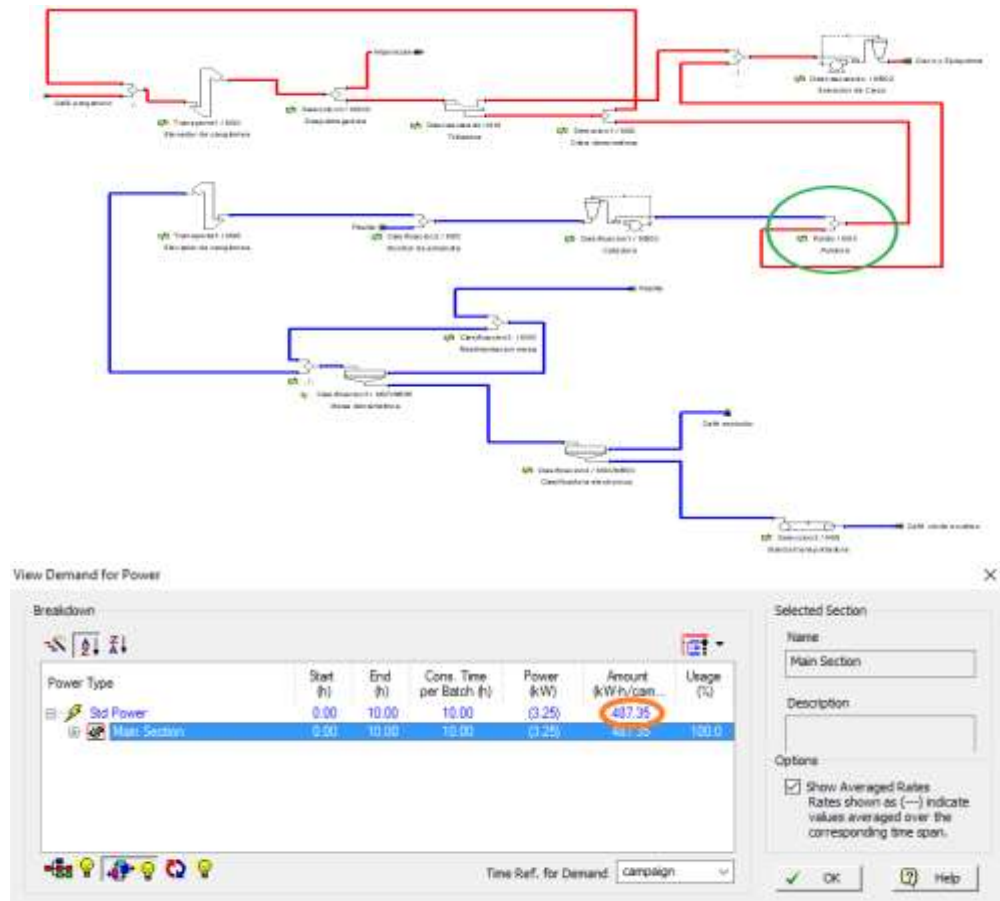


Figura 50. Representación y consumo energético de la línea de trillado con la implementación del CP2 mediante simulación en SuperPro Designer.

El impacto de CP2 es el más representativo, ya que comprende una disminución del 9% en representación al aumento con la incorporación inicial. El compromiso energético tiene la misma variación, por lo cual el IE1 despliega un valor de 0.0246 kWh/kg, asumiendo la misma cantidad de materia prima en el transcurso de la validación de los cambios y en los venideros.

Un último cambio, denominado CP3, comprende la última propuesta validada con el método híbrido, donde se elimina un módulo de equipo innecesario debido a la incorporación de la Clasificadora electrónica. Con el desarrollo de este cambio se culmina la reestructuración, por lo tanto se representa la propuesta final de la nueva línea reestructurada de trillado de café excelso para la empresa SUPRACAFE COLOMBIA S.A, ver Figura 51.

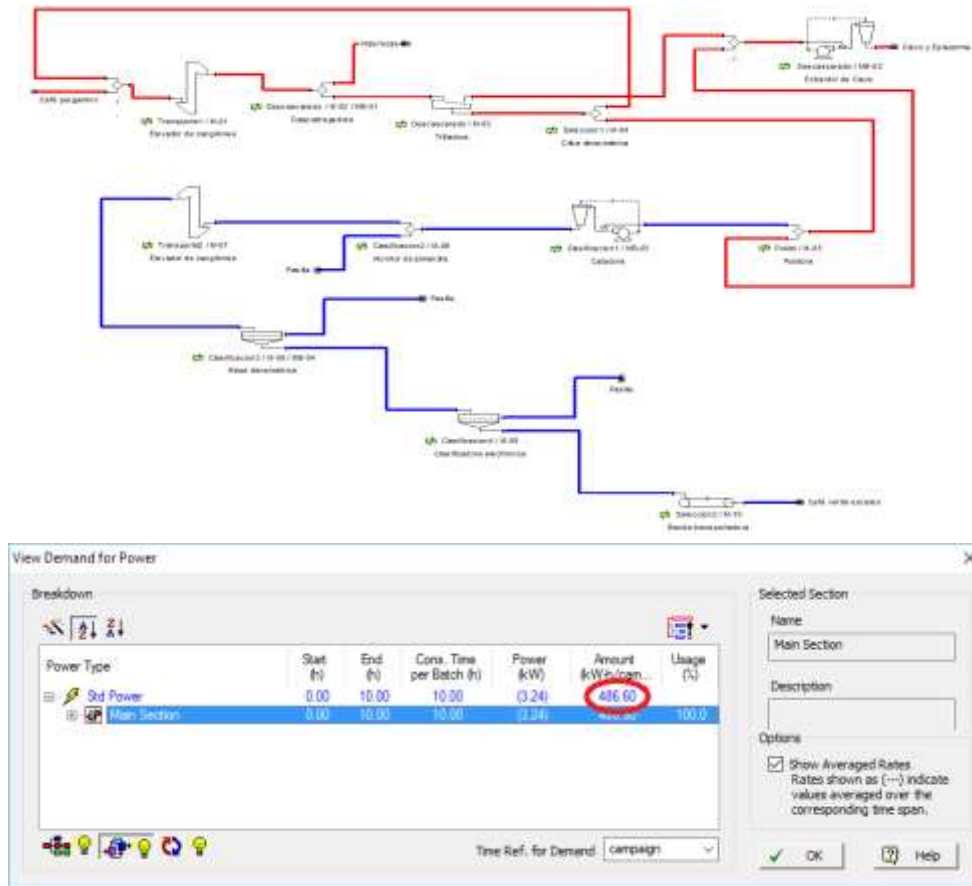


Figura 51. Representación y consumo energético de la línea de trillado con la implementación del CP3 mediante simulación en SuperPro Designer.

Como representación final, el indicador de compromiso energético IE1 se consolida en un valor de 0.0245 kWh/kg, conservando posiblemente un factor de rendimiento en la línea de trillado reestructurada de 82.5%, mismo valor que se maneja en la línea de trillado actual. La incorporación de los nuevos módulos de equipo y la reubicación de algunos de ellos representarán, en conclusiones obtenidas de los marcos comparativos técnicas realizadas, la preservación de la maquinaria encargada del trillado y pulido de granos de café pergamino y un mayor grado de calidad en la etapa de Clasificado de café verde.

El proceso de trillado de café en la línea reestructurada se simuló conservando valores de pérdidas similares a la simulación inicial, para continuar con el factor de rendimiento expresado, por lo cual el valor de producción final es aproximadamente igual a la línea de trillado actual y al valor teórico expresado, ver Figura 52.

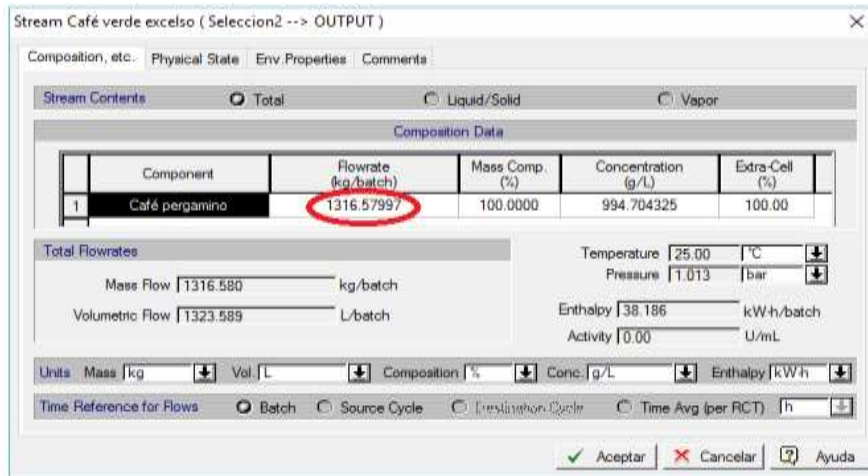
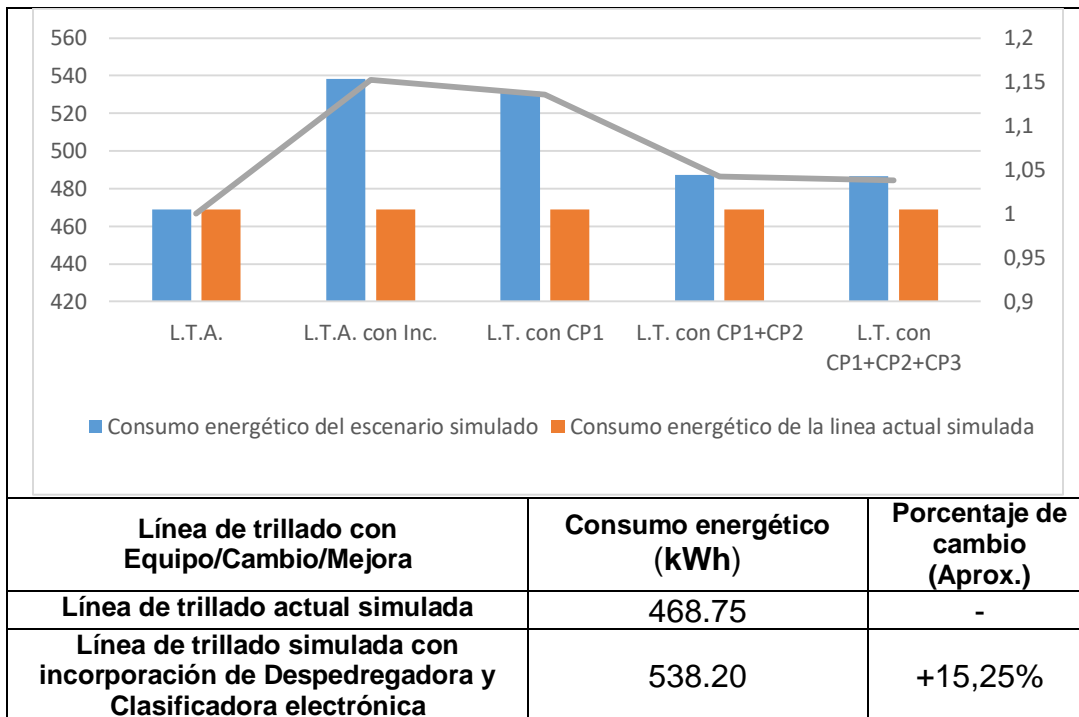


Figura 52. Producción final de la línea de trillado reestructurada mediante simulación en SuperPro Designer.

Los valores de pérdidas a lo largo del proceso se resumen en aproximadamente 18% del material usado como elemento primario de producción, logrando varios subproductos en las etapas que conforman la línea de trillado (cisco y episperma en la unidad de Trillado, y pasilla en la unidad de Clasificado) [14].

### Reducción del consumo energético del proceso, con la propuesta de EE en la reestructuración de la línea de trillado

Mediante los valores de consumo energético obtenidos con la simulación de cada CP se aprecia el cambio energético que se logra con el desarrollo de los mismos, al igual que con la incorporación de los nuevos módulos de equipo, ver Tabla 16.



| Línea de trillado con Equipo/Cambio/Mejora   | Consumo energético (kWh) | Porcentaje de cambio (Aprox.) |
|--|--------------------------|-------------------------------|
| Línea de trillado actual simulada  | 468.75                   | -                             |
| Línea de trillado simulada con incorporación de Despedregadora y Clasificadora electrónica | 538.20                   | +15,25%                       |

|  |        |         |
|--|--------|---------|
| <b>Línea de trillado simulada con CP1</b>                  | 531.45 | +13,56% |
| <b>Línea de trillado simulada con CP1 y CP2 (MO1)</b>      | 487.20 | +4,24%  |
| <b>Línea de trillado simulada con CP1, CP2 (MO1) y CP3</b> | 486.45 | +3.81%  |

Tabla 16. Cambios del consumo energético con la implementación de los cambios propuestos mediante simulación en SuperPro Designer.

Los porcentajes de cambio de consumo energético son iguales a aquellos que se aprecian en la aplicación del método híbrido de EE, exactamente en el paso de Análisis del nuevo desempeño energético por simulación consignado en la Tabla 11, donde disminuye el valor del compromiso energético y se concluye con la aprobación y posterior implementación de las propuestas en la reestructuración de la línea de trillado de café en la empresa caso de estudio.

## **4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **4.1 CONCLUSIONES**

El diseño y la propuesta de un método de reestructuración de líneas y flujos de procesos industriales, aplicado en la línea de trillado de SUPRACAFE COLOMBIA S.A, permitió atender el requerimiento inicial de incorporación de maquinaria por parte de la directiva con criterios claros de cómo manejarlo, igualmente permitió identificar cambios y/o mejoras necesarias para cumplir el requerimiento, al igual que objetivos del método diseñado. Este presenta dos frentes de estudio: el primero comprende un diagnóstico industrial convencional donde se obtiene la composición de la línea de trillado mediante los estándares ISA 88 e ISA 5.1, desarrollo de labores y valores de compromiso de los recursos con la maquinaria instalada; el segundo frente es un diagnóstico energético donde se desarrolla una contabilidad energética sobre el consumo estimado de la línea instalada (495.34 kWh) para la producción de la cantidad mencionada de café trillado, y validación de propuestas de oportunidad de mejora obtenidas con el desarrollo del marco comparativo. La aplicación del método condujo a que, a pesar de que con la incorporación de la nueva maquinaria el consumo energético aumentó en un 15,25%, con la implementación de mejoras apropiadas con elementos de eficiencia energética el aumento se redujera hasta un nivel de 3,81%.

En el método propuesto son claves los pasos de: diagnóstico técnico, diagnóstico funcional, diagnóstico energético y marco comparativo, pero es de suma importancia el desarrollo de las simulaciones ya que permiten corroborar el impacto ocasionado en la línea de trillado por los requerimientos, cambios y/o mejoras; estos impactos son reflejados mediante el cálculo de indicadores de compromiso energético (IE), valores que dan la información necesaria para valorar la oportunidad de mejora antes de proceder a implementarlas en la realidad.

Al llevar a cabo la socialización del trabajo realizado en las instalaciones de la empresa SUPRACAFE COLOMBIA S.A. a los directivos encargados (gerente, ingeniero de producción y jefe de planta), se logró satisfacer las necesidades solicitadas al inicio del proyecto, como también atender inconvenientes en cuanto al proceso de producción y consumo energético de producción, prediciendo una propuesta para la línea de trillado eficiente y posiblemente aportando a favor en la calidad del producto final.

### **4.2 RECOMENDACIONES**

Como acción correctiva adicional para disminuir el consumo energético, se recomienda el cambio de motores a unos más acordes al actual flujo de proceso de la línea de trillado, esto se puede hacer de dos formas:

- Cambiar los motores por aquellos que generen la potencia limitada por el cuello de botella generado en el módulo Catadora.

- Cambiar el motor asociado al cuello de botella, y que aproxime su producción al punto de operación reflejado en los módulos de equipo restantes, el cual sería un estimado de 300-320kg/hora.

La segunda alternativa es la más adecuada para la línea de trillado, ya que podría disminuir el tiempo de parada presente en el módulo Mesa densimétrica impactando positivamente en la producción final; dicho cambio de motor se debe implementar junto con el aumento de la capacidad de la tolva inicial y su punto de suministro al primer elevador, para así garantizar el doble de su medida actual. Dicha alternativa comprende cambios meritorios de comparación que reflejan la selección idónea de un motor acorde a la labor ejecutada, con criterios técnicos de operación dados por el flujo de proceso involucrado. Así, se compara el costo de adquisición de los motores y el consumo energético dado por los motores en las mismas condiciones de operación, variables que conlleva a cálculos de retribución de inversión y eficiencia energética, ver Tabla 17.

| <b>Motor</b>            | <b>Potencia (hp)</b> | <b>Costo(COP)</b> | <b>Consumo mensual estimado (kW/h)</b> |
|-------------------------|----------------------|-------------------|--|
| Motor catadora(Venturi) | 2.00                 | \$ 644,000.00     | 61,05                                  |
| Motor propuesto         | 0,25                 | \$ 389,000.00     | 15,56                                  |

Tabla 17. Comparación motor catadora (Venturi) y Motor propuesto

Se observa que la propuesta de motor consumiría aproximadamente un 25% del valor registrado actualmente en el módulo que representa el cuello de botella; igualmente cabe resaltar que al realizar la inversión en el cambio del motor, se lograría una retribución de la adquisición en un periodo de tiempo aproximado de 16 meses, evaluando únicamente el consumo en dicho punto, con un valor de referencia de \$560.00 por kW/h.

La anterior comparación realizada se puede implementar en los demás motores que comprenden los módulos que conforman la línea de trillado de café que se encuentren sobredimensionados en su utilidad.

La línea de trillado de SUPRACAFE COLOMBIA S.A. se compone de módulos de equipo que poseen sistemas de control individuales, utilizados para el encendido y apagado manual de cada módulo posterior a la ejecución de cada *batch*, por lo que se recomienda la automatización del proceso con el objetivo de mitigar el compromiso del personal que debe supervisar valores de flujos y niveles en áreas complejas de acceder. Para dicha mejora del escenario de automatización, se recomienda el desarrollo de un proyecto muy elemental, donde se propone la implementación de un sistema de control secuencial con lógica cableada con el fin de mitigar el compromiso del personal en labores de supervisión y control en el proceso. Se recomienda implementar un panel de control de selección de escenarios: manual, como se tiene actualmente, o automático. El escenario automático se basaría en un sistema de lógica cableada que permita operar toda la



línea de producción, incorporando en la tolva de la mesa densimétrica un sensor de nivel estado sólido, el cual genera un estado 0 (tolva vacía) y estado 1 (tolva a nivel); el estado 0 se mantiene hasta alcanzar el estado 1, donde se da apertura a la compuerta que permite al flujo de proceso continuar el proceso. Una vez culminado el vaciado, se regresa al estado 0.

Finalizando el desarrollo del documento, por parte de las directivas de la empresa, se informó que para los problemas de suministro eléctrico y fallas energéticas se presentaría una posible solución por parte de la compañía energética local, ocasionando que el contacto con el proveedor del generador industrial presentara ventajas de la instalación del mismo. Esta información es confidencial entre empresas, por lo que no se podrá citar dentro del documento, pero se aclaró desde la directiva que de no presentarse la nueva propuesta local, se cumplirá con lo propuesto en el *Capítulo 2 Sección 2.1.4*.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] V. Tabla and S. Lee, "Contenido," 2017.
- [2] "La EXCELENCIA del café colombiano |," 2016. [Online]. Available: <https://educafes.com/2016/04/27/la-excelencia-del-cafe-colombiano/>. [Accessed: 13-Mar-2017].
- [3] R. García Cáceres and É. S. Olaya Escobar, "Caracterización De Las Cadenas De Valor Y Abastecimiento Del Sector Agroindustrial Del Café," *Cuad. Adm.*, vol. 19, no. 31, pp. 197–217, 2006.
- [4] "Contacto | Federación Nacional de cafeteros," 2017. [Online]. Available: <https://www.federaciondecafeteros.org/index.php?fnc/glosario>. [Accessed: 15-May-2017].
- [5] G. Maps, "de La Venta, Cajibío, Cauca a Unnamed Road, Cajibío, Cauca - Google Maps." [Online]. Available: <https://www.google.com/maps/dir/La+Venta,+Cajibío,+Cauca/2.5862438,-76.551488/@2.5873238,-76.5514244,416m/am=t/data=!3m1!1e3!4m8!4m7!1m5!1m1!1s0x8e300ed4c261c791:0x3775bcef68bfd732!2m2!1d-76.550192!2d2.588999!1m0>. [Accessed: 26-Jun-2017].
- [6] QC Café Colombia, "Weblet Importer." [Online]. Available: <http://qccafe.com/co/normas.htm>. [Accessed: 29-Jun-2017].
- [7] "La importancia de la Cadena de Valor | Marketing Maimonides," 2017. [Online]. Available: <http://marketing.maimonides.edu/la-importancia-de-la-cadena-de-valor/>. [Accessed: 15-May-2017].
- [8] "Documentación en Instrumentación: PFD, P&ID, Loop Diagram," 2010. [Online]. Available: <http://www.instrumentacionycontrol.net/cursos-libres/instrumentacion/curso-practico-de-instrumentacion/item/332-documentación-en-instrumentación-pfd-pid-loop-diagram.html>. [Accessed: 01-Jun-2017].
- [9] Unidad de Planeación Minero Energética - UPME, *Guía didáctica para el desarrollo de Auditorías Energéticas*. 2007.
- [10] A. J. Perlaza, Juan Camilo; Chasqui, "Propuesta de eficiencia energetica del sistema de transporte neumatico de la empresa alimenticia El Cocinerito. Caso de estudio," University of Cauca, 2017.
- [11] 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.
- [12] 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.

- [13] E. Giacone and S. Mancò, “Energy efficiency measurement in industrial processes,” *Energy*, vol. 38, no. 1, pp. 331–345, 2012.
- [14] N. Rodríguez Valencia and D. Zambrano Franco, “Los subproductos del café: fuente de energía renovable,” *Av. Técnicos Cenicafé*, no. 3, p. 8, 2010.