



UNIVERSIDAD
CIENFUEGOS
Carlos Rafael Rodríguez



Facultad de Ingeniería.

TRABAJO DE DIPLOMA

Título: Indicador de desempeño energético de la UEB
Cereales Cienfuegos para su empleo en un sistema de
gestión basado en la NC: ISO 50001

Autor: Yudieki Moreno Muñoz

Tutor: Dr C. Julio R. Gómez Sarduy

Ing. José D. Morfa Ravelo

Cienfuegos, 2016

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD
UNIVERSIDAD DE CIENFUEGOS



Sistema de Documentación y Proyecto. Hago constar que el presente trabajo constituye la culminación de los estudios en la especialidad de Ingeniería Mecánica en la Universidad de Cienfuegos, autorizando a que el mismo sea utilizado por el Centro de Estudio Superior para los fines que estime conveniente, ya sea parcial o totalmente, que además no podrá ser presentado sin la aprobación de dicha institución.

Firma del autor.

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido según acuerdo de la dirección del centro y el mismo cumple los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura, referido a la temática señalada.

Información Científico Técnico

Nombre y Apellidos. Firma.

Firma del Vice Decano.

Firma del Tutor.

Nombre y Apellidos.

Sistema de Documentación y Proyecto.

Nombre y Apellido. Firma.

*Nunca consideres el estudio como una obligación,
sino como una oportunidad para penetrar en el
bello y maravilloso mundo del saber.*

Albert Einstein

A mis padres, a mi niña, a mi pareja, a mi tutor que también es autor de esta obra, a todos mis compañeros de grupo, a los compañeros que no pudieron culminar los estudios por problemas ajenos a su voluntad y a todos mis seres queridos.

A todos esas persona que contribuyeron de una forma u otra a mi formación como profesional, a mis fabulosos profesores que cada día me aportaron una gota de conocimiento a mi riachuelo de ideas, a mi excelente tutor que me brindó toda su ayuda, respeto, amistad y gran parte de su tiempo para culminar este Trabajo de Diploma, y a todas aquellas personas que no mencioné y que sientan en su corazón que son dignas de mi agradecimiento.

Dentro del sector industrial cubano existen empresas como la Unidad Empresarial de Base Cereales Cienfuegos perteneciente a la Unión Molinera del Ministerio de la Industria Alimenticia que están catalogadas como grandes consumidores de energía y que han realizado esfuerzos por implantar Sistemas de Gestión Energética basados en la norma NC: ISO 50 001. En esta empresa se realizó un estudio a partir de datos históricos de consumo y producción llegándose a definir la línea meta como un modelo lineal del consumo en función de la producción para el Molino 1. De este modelo lineal se deriva el índice de consumo adoptado como indicador de desempeño energético. No obstante, se trabajó en identificar un nuevo indicador de desempeño energético para cada una de las líneas de producción de este molino de manera que se pueda realizar una mejor gestión. Se aplican las herramientas estadísticas típicas para la determinación de la línea base y la línea meta y se utiliza el software Statgraphic para el desarrollo de un nuevo modelo de consumo para cada línea en función, no solo de la producción, sino de otras variables como la cantidad de agua añadida al trigo antes del reposo y la granulometría de la harina. Este nuevo modelo de consumo propuesto permite determinar un nuevo índice de consumo más complejo que refleja mejor el desempeño energético de cada línea por turno de trabajo.

Within the Cuban industrial sector are some companies such as UEB Cereales Cienfuegos, belonging to the Union Molinera of the Ministry of Food Industry, which is classified as large energy consumers. This enterprise made efforts to implement Energy Management Systems based in the NC standard: ISO 50 001.

In this enterprise one study was realized based on historical consumption and production data getting itself to define the goal line as a linear model of the consumption as a function of production for wheat mill 1.

This linear model itself derives the consumption index adopted as an indicator of energy performance. However, we worked to identify a new energy performance indicator for each production lines of this mill so that it can better energy management.

Typical statistics tools were applied for the determination of the base line and the goal line. The Statgraphic software was used to development of a new model of energy consumption for each production line as a function, not only of production, but also of other variables as size grain of flour and the amount of water added to wheat before the rest.

This new model of energy consumption allows obtain one consumer index more complex that better reflects the energy performance of each line at one period of eight hours.

Índice

| | |
|---|----|
| | 1 |
| Introducción..... | 8 |
| La tesis queda estructurada de la siguiente forma: | 11 |
| Capítulo 1. Estado del arte sobre la gestión energética y sus particularidades en la industria molinera. | 14 |
| 1.1. Situación energética mundial. | 14 |
| 1.2. Necesidad de la gestión energética. | 15 |
| 1.3. Recuento histórico de la gestión de la energía. | 16 |
| 1.4.- Características de la gestión energética según la ISO 50001. | 19 |
| 1.4.1.- Planificación energética. | 22 |
| 1.5.- Uso de herramientas de apoyo en la planificación energética..... | 23 |
| 1.6. La Molienda del Trigo | 26 |
| 1.7. Obtención de la harina de trigo..... | 28 |
| 1.7.1. Proceso de Molienda de Trigo | 30 |
| 1.8. Estudios energéticos en las empresas molineras. | 32 |
| 1.9. Conclusiones parciales | 34 |
| Capítulo 2. Aplicación de herramientas estadísticas asociadas a la gestión energética en la UEB Cereales Cienfuegos | 37 |
| 2.1. Generalidades sobre la empresa..... | 37 |
| 2.2. Balance general de energía..... | 38 |
| 2.3. Aplicación de las herramientas en la etapa de planificación..... | 39 |

| | |
|---|----|
| 2.3.1. Las herramientas estadísticas que fueron aplicadas son:..... | 39 |
| 2.4. Gráficos de control..... | 40 |
| 2.5. Gráficos de consumo-producción vs tiempo (E-P vs. T)..... | 42 |
| 2.6. Diagrama de Consumo de Energía-Producción | 45 |
| 2.7. Diagrama de Índice de Consumo de Energía – Producción. (IC vs. P). | 50 |
| 2.8. Conclusiones parciales | 53 |
| Capítulo 3. Obtención de un nuevo modelo de consumo..... | 56 |
| 3.1. Líneas de producción..... | 56 |
| 3.2. Definición de las variables explicativas..... | 58 |
| 3.3. Modelos de regresión lineal múltiple..... | 60 |
| 3.3.1. Ajuste para el modelo seleccionado..... | 61 |
| 3.3.2. Ajuste después de eliminar los datos aberrantes | 64 |
| 3.3. Calidad del modelo obtenido. | 67 |
| 3.4. Nuevo indicador de desempeño energético para cada línea de producción. | 69 |
| 3.5 Análisis del comportamiento energético de cada línea considerando solo la producción. | 70 |
| Los resultados del ajuste para cada línea se muestran en los Anexos V y VI respectivamente. | 72 |
| 3.6 Conclusiones parciales..... | 77 |
| Bibliografía | 85 |

Introducción

En la actualidad se han llevado a cabo numerosos estudios acerca del uso de la energía en diversos sectores industriales (Giacone & Mancò, 2012). La importancia de la energía en la industria crece rápidamente debido a los costos e impacto ambiental asociados a la misma (Rudberg, Waldemarsson, & Lidestam, 2013) (Muller, Marechal, Wolewinski, & Roux, 2007). Las circunstancias ambientales que configuran los riesgos actuales derivados del cambio climático que ya ha comenzado a manifestarse de distintas formas, obligan a pensar en el incremento constante en la eficiencia de su utilización, aunque ello no resulte suficiente para evitar los desastrosos efectos en marcha desencadenados por los niveles de contaminación ya alcanzados.

En Cuba, donde aún no se alcanzan altos niveles de las fuentes nacionales de energía en el balance energético nacional, el aporte de la eficiencia energética es predominante dentro del contexto nacional y específicamente en el sector industrial.

Para lograr un uso eficiente de la energía es necesario gestionar la misma como un activo más por lo que se han desarrollado diferentes Sistemas de Gestión Energética (SGEn) hasta el punto de normar internacionalmente los procedimientos a seguir bajo la concepción de mejora continua. La experiencia acumulada a nivel internacional ha dado como resultado la elaboración y aprobación de la Norma Internacional ISO 50 001 (Organización Internacional de

Normalización, 2011), que ha sido adoptada de forma íntegra en Cuba bajo la denominación NC: ISO 50 001.

Dentro del sector industrial cubano existen empresas catalogadas como grandes consumidores que han realizado esfuerzos por implantar SGE_n basado en esta norma. En este caso se encuentra la Unidad Empresarial de Base Cereales Cienfuegos perteneciente a la Unión Molinera del Ministerio de la Industria Alimenticia.

En esta empresa se realizó un estudio a partir de datos históricos de consumo y producción llegándose a definir la línea meta como un modelo lineal del consumo en función de la producción para el Molino 1. De este modelo lineal se deriva el índice de consumo adoptado como indicador de desempeño energético. No obstante, aún puede seguirse profundizando en la búsqueda de un indicador más preciso que caracterice mejor el desempeño energético de esta entidad y que incluya otras variables influyentes en el modelo de consumo. Esto constituye el tema a desarrollar en esta investigación.

Problema científico:

¿Cuáles variables operacionales, además de la producción, pueden ser consideradas en un indicador de desempeño energético del molino 1 de la UEB Cereales Cienfuegos para ser incorporado a un SGE_n basado en la NC: ISO 50 001?

Hipótesis:

La definición adecuada del indicador de desempeño energético que considere otras variables operacionales además de la producción, permitirá mayor efectividad en la gestión energética de la UEB Cereales Cienfuegos contribuyendo a la reducción de los consumos energéticos de la misma.

Objetivo general:

Aplicar herramientas de gestión en la etapa de planificación energética identificando un nuevo indicador de desempeño para las líneas de producción del molino 1 de la UEB Cereales Cienfuegos.

Objetivos específicos:

1. Realizar una búsqueda bibliográfica para estudiar el estado actual del conocimiento sobre el tema.
2. Aplicar diferentes herramientas para la gestión energética en la etapa de planificación del SGen basado en la ISO 50 001.
3. Investigar la influencia de variables operacionales medibles en el proceso sobre el desempeño energético de las líneas de producción del molino 1.
4. Proponer, a partir de las variables investigadas, un nuevo modelo de consumo energético y un nuevo indicador de desempeño.

La tesis queda estructurada de la siguiente forma:

Capítulo I. Estado del arte sobre la gestión energética y sus particularidades en la industria molinera.

En este capítulo se hace un análisis de la situación energética mundial y del desarrollo de los sistemas de gestión de la energía hasta la puesta en vigor de la norma internacional ISO 50 001. Se hace un breve comentario acerca del desarrollo histórico de la obtención de harina de trigo y una descripción del proceso de molienda que sirven de base para la posterior comprensión del trabajo. Finalmente se particulariza en los estudios realizados en la industria molinera relacionados con su consumo energético partiendo de los reportes publicados en la bibliografía consultada sobre el tema.

Capítulo II. Aplicación de herramientas estadísticas asociadas a la gestión energética en la UEB Cereales Cienfuegos

En este capítulo se muestran los resultados de aplicar las herramientas de gestión durante la etapa de planificación de un sistema de gestión energética basado en la NC: ISO 50 001 para la UEB cereales Cienfuegos. Se describe esta empresa y se utiliza como información los datos históricos del último año de producción para definir un modelo lineal por regresión simple que se utiliza como línea de base y para la obtención del índice de consumo (kWh/t de harina producida). La única

variable considerada como influyente es la producción de harina y el índice de consumo se obtiene de manera global para el molino 1.

Capítulo III. Obtención de un nuevo modelo de consumo.

Partiendo de las mediciones de consumo de energía, producción y otras variables reportadas por el laboratorio (humedad de entrada, humedad antes y después del reposo y granulometría) se obtiene un nuevo modelo por regresión lineal múltiple con las variables que tienen significación estadística. Con este nuevo modelo se propone una familia de curvas de índices de consumo que caracterizan mejor el desempeño energético del molino.

Capítulo 1

Estado del arte sobre la gestión energética y sus particularidades en la industria molinera.

Capítulo 1. Estado del arte sobre la gestión energética y sus particularidades en la industria molinera.

1.1. Situación energética mundial.

Han sido varios los intentos del hombre por dar solución a la explotación irracional de los combustibles fósiles. Se han dado hechos concretos: las industrias fabrican sus productos consumiendo menos energía, los aviones y automóviles consumen menos combustibles por kilómetros recorridos y se economiza en la calefacción de las viviendas. Medidas estas encaminadas a promover el ahorro de energía a raíz de la crisis energética mundial. Cálculos revelan que desde la década del setenta y hasta el año 2010 se ha reducido en un 20% el consumo de energía en países desarrollados (Correa, 2011)

Sin embargo en los países en desarrollo, aunque el consumo de energía por persona es mucho menor que en los países desarrollados, la eficiencia en el uso de energía no mejora, principalmente por la sobreexplotación de los recursos naturales, el alto índice de crecimiento poblacional, la falta de financiamiento, y el éxodo rural, que provoca el desarrollo desmedido y anárquico de las ciudades (Borroto Nordelo, 2006)

Los pronósticos más recientes sugieren que para el año 2020 cerca del 85% de la población mundial vivirá en países en vías de desarrollo y serán responsables de aproximadamente el 55% del consumo total de energía. La demanda de energía

en las dos últimas décadas en Asia se incrementó en aproximadamente 4.5% por año, en comparación con el 2% experimentado por EEUU y Europa. Actualmente la demanda mundial de energía está incrementándose a una tasa promedio de 3.5% anual. Se anticipa que este incremento ha de continuar, y por tanto, el consumo de energía será el doble del 2005 en el 2030 y el triple en el 2050 (Correa, 2011).

1.2. Necesidad de la gestión energética.

En la actualidad todas las esferas de la vida social están muy ligadas al consumo energético. Aunque se realizan esfuerzos para garantizar una mayor penetración de fuentes renovables en la matriz de generación global, aun esta es muy dependiente de los combustibles fósiles. Por otra parte, el desarrollo económico, industrial y social experimentado en los últimos años ha generado un incremento en el consumo de combustibles fósiles, combustibles que no son renovables y son contaminantes en alto grado, lo que ha provocado el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero, trayendo consigo el cambio climático global. Para que las empresas actuales contribuyan a mitigar el deterioro provocado por el hombre al medio ambiente es necesario centrarse en alcanzar, entre otras cosas una mayor eficiencia energética. Por otra parte, el incremento continuo del precio de los portadores energéticos, ha provocado que los costos de los mismos tengan cada vez un mayor peso dentro de los costos totales de operación de las empresas, en particular de aquellas llamadas energo-intensivas.

La experiencia demuestra que para lograr una mejora continua de la eficiencia energética se requiere contar con un sistema coherente e integral de gestión energética.

1.3. Recuento histórico de la gestión de la energía.

Durante cientos de miles de años, el hombre utilizó fundamentalmente dos fuentes de energía: su propia musculatura y la leña para hacer fuego. Hace varios miles de años comenzó a aprovechar el viento y la energía muscular de los animales que había domesticado; mucho después, a comienzos de nuestra era, empezó a usar las corrientes de agua como fuentes de energía; pero no empezó a explotar en gran escala los combustibles fósiles hasta la Revolución Industrial (Arrastía, M., Martínez M., 2011).

Durante este tiempo, el concepto de conservación de la energía fue siempre un impulsor para el aprovechamiento de los recursos energéticos disponibles. De esta manera, necesidades como la realización de trabajos con menor esfuerzo, mayor facilidad, y un mejor aprovechamiento de los recursos disponibles, conllevaron a que el hombre buscara soluciones ingeniosas para ir más allá de lo que su fuerza muscular le permitía. Ello posibilitó la realización de muchas actividades como la agricultura, la navegación, la construcción de grandes obras, etc., cimientos de muchas civilizaciones.

La invención de la máquina de vapor permitió alcanzar un desarrollo sin precedentes durante la Revolución Industrial. El uso del carbón se masificó y

condujo a una creciente demanda por el combustible, aumentando los precios de éste y limitando la aplicación de las máquinas de vapor. En respuesta, el concepto de eficiencia emergió como un aspecto fundamental en el diseño de estas máquinas, escenario que inspiró los primeros estudios en Termodinámica (Wulfinghoff, D., 2011).

Nuevos desarrollos tecnológicos posibilitaron el aprovechamiento de fuentes energéticas más eficientes. El motor de combustión interna, por ejemplo, creó un gran mercado para el recién descubierto petróleo, y lo posicionó como la principal fuente de energía para el transporte. Por su parte, la invención del motor y el generador eléctrico, facilitaron la difusión de la electricidad.

Ésta amplia diversificación de fuentes energéticas, combinada con la incorporación continua de nuevas tecnologías, permitió una evolución estable del sistema energético durante un largo período (Bouille, D., 2004). Pero, el aumento paulatino de la población y el consiguiente incremento de consumo energético provocado por el uso masivo de estas tecnologías, así como el desarrollo de nuevas actividades productivas y de servicios, sometió al sistema energético a grandes presiones y comprometió su estabilidad ante un déficit en la oferta.

Inesperadamente, dicha estabilidad aparente fue, por primera vez, puesta a prueba por la crisis del petróleo de 1973, la cual estremeció por completo un sistema energético que dependía casi en su totalidad de un suministro constante del recurso.

El impacto fue aún mayor en los países industrializados de occidente por su alta dependencia. Los altos precios ocasionados por la abrupta suspensión del suministro, provocaron que estas economías cuestionaran su alta dependencia y consumo, y buscaran soluciones para reducir su demanda energética interna.

Entre las soluciones implementadas estaba el incentivo para desarrollar programas de conservación de la energía y gestión de la carga (eléctrica), y la difusión de información sobre opciones de ahorro energético y sobre cómo alcanzar una mejor comprensión de la demanda energética a través de la realización de auditorías energéticas (Bhattacharyya, S., 2011).

En medio de este escenario de escasez y de cambio de paradigma, surge la Gestión de la Energía como disciplina independiente, ocupada del aprovechamiento eficiente de los recursos energéticos ante la inestabilidad del suministro. Las crisis energéticas posteriores de los años 1979 y 1980, que elevan los precios de la energía nuevamente, le imprimen más relevancia (Borroto, A., 2012). En la década de los noventa, recibe un impulso mayor, gracias al surgimiento de la conciencia ambiental sobre la contribución del consumo energético en la emisión de gases de efecto invernadero, y por los compromisos de reducción de emisiones, derivados del Protocolo de Kioto, que muchos países asumieron. Finalmente, en el año 2011, se pone en vigor una norma internacional para la gestión energética, la ISO 50001 (Organización Internacional de Normalización, 2011).

1.4.- Características de la gestión energética según la ISO 50001.

Al darse cuenta de la importancia de la gestión de la energía, la Organización Internacional de Normalización (International Standardization Organization, ISO) comenzó a desarrollar en 2008 la ISO 50 001 como la futura norma internacional de la gestión de la energía. La primera edición se publicó el 15 de junio de 2 011 y se espera que en los próximos años afecte a más del 60% del consumo energético mundial; esta tiene el potencial de llegar a ser un catalizador global para la eficiencia energética industrial del mismo modo que la ISO 9 001 lo ha sido para la calidad. Según la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE), el consumo específico de energía en la región podría ser reducido entre 10% y 25% en el corto y mediano plazo a través de la implementación de planes de eficiencia energética, Figura 1.3(Granda, F., 2011)

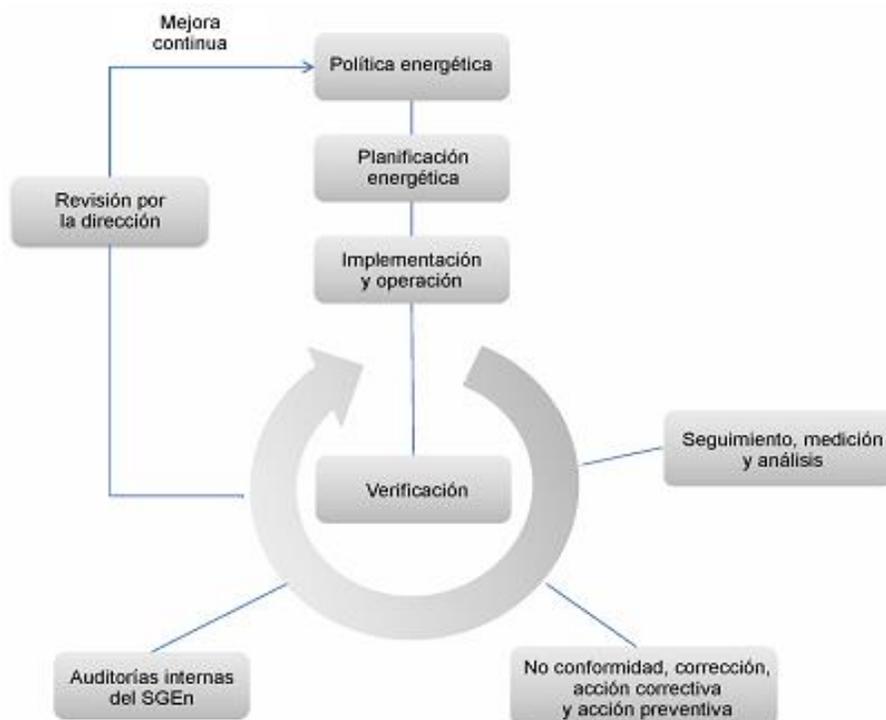


Figura 1.3 Modelo de sistema de gestión de la energía para esta Norma.

El propósito de la ISO 50 001 es permitir a las organizaciones establecer los sistemas y procesos necesarios para mejorar el desempeño energético, incluyendo eficiencia energética, uso, consumo e intensidad. La implementación de este estándar debería conducir a una reducción en el costo de la energía, la disminución de la emisión de gases de efecto invernadero y otros impactos positivos en temas medioambientales, a través de una gestión sistemática de la energía.

La ISO 50 001 considera todos los tipos de energía, incluyendo energía renovable, no renovable y alternativa. Requiere la identificación, priorización y registro de oportunidades para mejorar el desempeño energético, incluyendo,

donde sea posible, fuentes energéticas potenciales, uso de energías renovables o alternativas.

Sin embargo, la ISO 50001 no establece requisitos absolutos para el desempeño energético más allá del compromiso de la política energética de la organización y su obligación de cumplir con los requisitos legales y de otra índole que sean aplicables. Así, dos organizaciones llevando a cabo similares operaciones, pero teniendo diferente desempeño energético, pueden cumplir con sus requisitos.

Esta norma internacional que tiene entre otros antecedentes a las normas ANSI/MSE 2 000:2 005 y ANSI/IEEE 739:1995 , y que comparte principios comunes del sistema de gestión con la serie de Normas ISO 9 000 (conceptos y definiciones), ISO 14000 (medio ambiente) y compatible a su vez con la norma cubana NC ISO 22 000 (alimentación), tiene como propósito permitir a las organizaciones establecer los sistemas y procesos necesarios para mejorar el desempeño energético, incluyendo la eficiencia, uso, consumo e intensidad de la energía.

La ISO 50 001 especifica los requerimientos de un sistema de manejo de energía (SGE) para que una organización desarrolle e implemente una política energética, establezca objetivos, metas y planes de acción, los cuales tengan en cuenta requerimientos legales y la información referente al uso de la energía significativa.

Un sistema de manejo de energía permite que una organización alcance sus objetivos establecidos, e implemente las acciones necesarias para mejorar su uso de la energía y demostrar la conformidad del sistema con los requerimientos de

esta Norma Internacional. La aplicación de esta norma internacional puede ser adoptada a los requerimientos de una organización incluyendo la complejidad del sistema, el grado de documentación y recursos, y se aplica a las actividades controladas por la organización.

La gestión energética es uno de los cinco campos principales dignos del desarrollo y la promoción que ofrecen las normas internacionales. La gestión eficaz de la energía es una prioridad, ya que cuenta con un potencial significativo en cuanto al ahorro de energía y la reducción de las emisiones de gases invernadero en todo el mundo. Se espera que una norma de sistemas de gestión energética logre un mayor incremento de la eficiencia energética a largo plazo: de un 20% o más en las instalaciones industriales.

En Cuba, a través de la Oficina Nacional de Normalización, en diciembre del 2011 es adoptada la norma internacional ISO 50 001: como norma nacional idéntica con la referencia NC-ISO 50 001: 2 011.

1.4.1.- Planificación energética.

El proceso de planificación energética parte de la revisión energética, que contempla el análisis del consumo de energía, identificar áreas de alto consumo e identificar las oportunidades para mejorar la eficiencia energética. A partir de la línea base e indicadores de desempeño energéticos, se declaran objetivos, metas y planes de acción para el período planificado. Esta es la etapa más compleja y se necesitan profesionales preparados en la temática de energía.

1.5.- Uso de herramientas de apoyo en la planificación energética.

La planificación energética, tanto en la ISO 50 001, como en los demás SGEN, comprende una serie de actividades, en su mayoría de carácter técnico, que involucra la recolección, registro y análisis de un volumen considerable de datos sobre el uso y consumo de la energía, con el fin de identificar oportunidades de mejora, a partir de las cuales, se establecen las acciones necesarias para implementarlas. Sin duda que una apropiada manipulación e interpretación de estos datos garantiza alcanzar el fin último del sistema de gestión: el mejoramiento continuo del desempeño energético de la organización.

De ahí surge la necesidad del uso de herramientas de apoyo para el efectivo cumplimiento de cada uno de los requisitos involucrados en esta fase. En este sentido, Campos Avella (Campos, J., 2012), manifiesta que al igual que los sistemas de gestión de la calidad necesitan de herramientas básicas para su aplicación exitosa, los sistemas de gestión de la energía también las necesitan, y que las organizaciones tienen además el reto de dominarlas, aplicarlas e introducirlas en su gestión organizacional.

La ISO también es consciente de esta necesidad, y actualmente está desarrollando documentos normativos de apoyo a aspectos específicos de la Norma que requieren mayor profundización, como: Indicadores de desempeño

energético, Formulación de líneas base, Auditorías energéticas y Guía de implementación de la Norma, entre otros.

En el análisis que se realizó a los SGEEn, se identificaron las herramientas que se han propuesto para facilitar el cumplimiento de los requisitos que hacen parte de sus procesos de planificación. En la Tabla 1.1 se organizaron de acuerdo al objetivo que persigue cada requisito para el cual se propusieron. Con esta tabla es evidente la gran variedad de herramientas que podrían usarse en el establecimiento, implementación y operación de la fase de planificación energética de la ISO 50 001

Tabla1.1 Herramientas propuestas en los SGEN.

| Objetivo del requisito | Herramientas |
|--|---|
| Identificar tendencias y patrones en el uso y el consumo de todas las fuentes de energía | <i>Portfolio Manager</i> de Energy Star, <i>Energy Performance Indicator</i> de Energy Star. Tablas, gráficos, hojas de cálculo, <i>software</i> especializado, técnicas de normalización de datos, análisis de regresión, Gráfico de Consumo y Producción en el tiempo, técnica de Producción Equivalente, Diagrama Índice de Consumo versus Producción, Carta CUSUM, Gráfico Base 100 |
| Identificar áreas de uso significativo de la energía | Balances energéticos, análisis de Pareto, estratificación, análisis de riesgo, sistemas de ranqueo, prioridades de costos, mapas de proceso, diagramas Sankey, modelos energéticos, mapeo de energía, encuestas de tecnologías de uso final, perfiles de consumo energético, <i>benchmarks</i> , encuestas, lecciones aprendidas, auditorías energéticas, revisión de procedimientos operativos, diagnósticos energéticos, listas maestras de equipos, herramienta de Energy MAP <i>Significant Energy Users</i> , listas de chequeo, Diagrama Energético-Productivo. |
| Evaluar el desempeño energético | Diagnósticos energéticos de todos los niveles (específicos para cada sistema energético), auditorías energéticas. |
| Identificar oportunidades de mejora | Auditorías energéticas, modelos energéticos, revisión de mejor tecnología disponible, análisis Pinch, análisis de requerimientos energéticos, análisis de causa raíz, <i>benchmarks</i> , <i>Lean manufacturing</i> , Seis Sigma, perfiles de consumo energético, encuestas, lecciones aprendidas, revisión de procedimientos operativos, diagnósticos energéticos, análisis termoeconómicos, criterios de expertos. |
| Identificar indicadores de desempeño energético | Análisis de correlación estadística, técnicas de normalización, filtrado de <i>outliers</i> . |
| Establecer objetivos energéticos, metas energéticas y planes de acción | Buenas prácticas por tecnologías de uso final, análisis de regresión, análisis CUSUM, control estadístico de proceso, análisis de carga base, técnicas de mantenimiento predictivo, buenas prácticas sectoriales, minería de datos, <i>benchmarks</i> , lluvia de ideas, mapas mentales, guías: Energy MAP: <i>How to set objectives and targets</i> y <i>Guide on setting SMART objectives</i> , Herramienta Energy MAP: <i>Programme Plan</i> |

La ISO 50 001 guarda muchas similitudes con estos sistemas de gestión, y por tanto, las herramientas propuestas se podrían usar igualmente en el cumplimiento de sus requisitos. Específicamente para identificar indicadores de desempeño es necesario emplear herramientas de análisis de correlación estadística entre otras.

Estas herramientas se han utilizado de manera efectiva en la gestión energética de varias empresas industriales y de servicio. Dentro de estas empresas se encuentra la UEB Cereales Cienfuegos, que constituye una de las empresas mayores consumidores de la provincia de Cienfuegos.

El objetivo fundamental de esta investigación es aplicar herramientas de gestión en la etapa de planificación energética para establecer un nuevo indicador de desempeño para el molino 1 de la UEB Cereales Cienfuegos que considere las variables operacionales medibles y su influencia en el consumo de energía de la entidad. Por esta razón, a continuación se analizará el estado del conocimiento en cuanto a esta industria y la energía asociada a los procesos de molienda.

Se parte entonces de una descripción general de la molienda del trigo desde una perspectiva histórica y tecnológica y se hace referencia a los estudios relacionados con el consumo energético en este tipo de proceso.

1.6. La Molienda del Trigo

Los cereales han constituido en la historia de la humanidad la principal fuente de nutrientes, están relacionados al origen de las diferentes civilizaciones y culturas de cada uno de los pueblos. Los cereales se convirtieron en el sustento diario de muchas culturas, pueblos y civilizaciones del planeta. De tal manera que las culturas antiguas de Babilonia y Egipto, de Roma y Grecia y más tarde del norte y oeste de Europa se formaron alrededor del trigo, la cebada, el centeno y la avena. Las culturas precolombinas Inca, Maya, Azteca y americanas alrededor del maíz,

los pueblos asiáticos alrededor del arroz, los pueblos africanos alrededor del mijo y el sorgo.

Se piensa que el origen del trigo es multifocal, debido a la gran cantidad de especies de trigo silvestre que se ha encontrado en diferentes regiones. Su uso es originario de la antigua Mesopotamia y de regiones como Siria, Jordania, Turquía e Irak. En Europa, en los países templados, el trigo hace parte de la alimentación humana desde el neolítico.

En cuanto al cultivo se piensa que Egipto, fue el primer país en el que se plantó, a orillas del río Nilo.

Para el hombre primitivo, el trigo comenzó a ser indispensable por su fácil adquisición y por la falta de carne, así que comenzó a ingerirlo. Como el trigo es de granos duros y casi imposible tritararlo con los dientes, el hombre tuvo que ingeniárselas para molerlo, así que con la ayuda de dos piedras comenzó esta labor de macerar el trigo, conservando íntegramente las cualidades nutritivas del grano. El resultado de esta molienda fue un polvo, que en la actualidad sirve para la fabricación del pan, uno de los principales alimentos de la humanidad. Para el siglo VIII, los árabes inventaron el molino de viento que facilitó aún más la molienda; además se perfeccionaron las piedras planas, las cuales fueron substituidas por cónicas. Éstas estaban estriadas de cierta manera que facilitaba el movimiento del trigo en trituración desde el centro hasta la periferia de la piedra.

En el siglo pasado se perfeccionó el sistema de molienda y se comenzó a hacer con rodillos. Con el correr del tiempo se descubrió que era importante comenzar la molienda por la limpieza del grano sometiéndolo a la acción del viento y del trabajo manual con cribas. Se le quitaban paja, residuos, guijarros, arena y diversos tipos de semillas ajenas al trigo. Al convertirse la harina en la base dietética de todo ser humano, fue necesario industrializar su proceso de elaboración, haciéndose necesario un volumen mayor y una materia prima de más calidad.

En resumen, el cultivo de los cereales constituye uno de los principales recursos alimentarios de las poblaciones mundiales. Los granos de cereales más cultivados a nivel mundial en orden de producción son: trigo, arroz, maíz, cebada, avena, sorgo, centeno, mijo, triticale y quinua. Por ejemplo, la cosecha mundial de cereales ascendió a 2,07 miles de millones de toneladas en el año 2010 y se estima que cerca de las dos terceras partes (2/3) de la superficie cultivable sobre la tierra están dedicados a su producción (Universidad Nacional Abierta y a Distancia, 2011).

1.7. Obtención de la harina de trigo

El trigo generalmente es transformado en harina de la cual se elaboran diferentes productos como pan, galletas, tortas, pastas alimenticias y otros. El grado o tasa de extracción es la cantidad de harina en peso extraída por unidad de trigo utilizado, se expresa en porcentaje y puede variar entre 65 y 98%. El porcentaje normal de extracción se considera alrededor del 75%, aunque puede ser menor

debido a que parte de la harina queda adherida al salvado. Se considera que entre más blanca sea la harina menor será el grado de extracción. El contenido de cenizas está directamente relacionado con el grado de extracción, ya que la gran mayoría de sustancias minerales presentes en la harina, se encuentran en la corteza del grano de trigo y sus alrededores, este contenido oscila entre 0.45%-1,40% para los porcentajes de cada uno de los grados de extracción mencionados.

La molienda del trigo consiste en reducir el tamaño del grano, o que se hace fundamentalmente empleando molinos de rodillos. Primero se separa el salvado y el germen del endospermo y luego se reduce este último hasta obtener la harina. El objetivo de la molienda es maximizar el rendimiento de la harina con el mínimo contenido de salvado. El proceso de molienda se fundamenta en dos etapas, la de ruptura y la de reducción, la molienda se realiza gradualmente, obteniéndose en cada etapa una parte de harina y otra de partículas de mayor tamaño.

Para la molienda del trigo, en la etapa de trituración, se utilizan entre cuatro y seis rodillos de ruptura con forma de espiral y con acanaladuras para romper el grano y los trozos grandes de endospermo (Figura 1). Para la etapa de reducción se utilizan rodillos lisos. Entre fase y fase de molienda el producto molido es cribado, paso seguido la harina es purificada. (Vega, 2004)

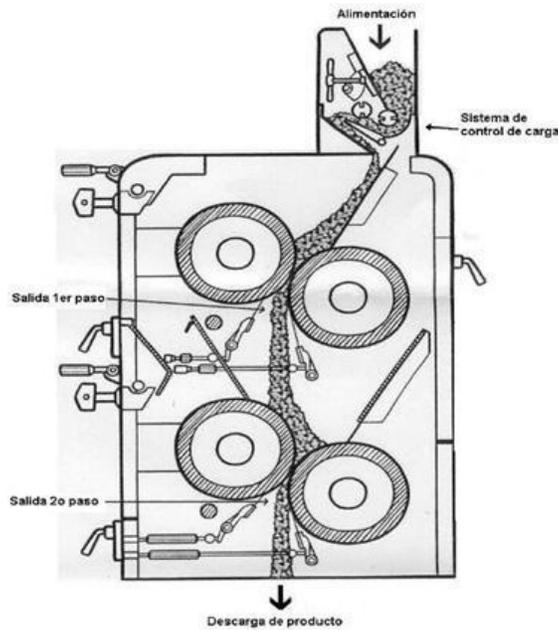


Figura 1. Vista de un molino de rodillos.

1.7.1. Proceso de Molienda de Trigo

El proceso de molienda desde que se recibe el grano hasta el empaque del producto terminado implica una serie de operaciones que se relacionan a continuación (Elisabeth, 2005):

1. Muestreo de los granos y toma de análisis
2. Almacenamiento del trigo en silos
3. Prelimpieza del grano en tamices vibratorios en donde se retiran las impurezas más gruesas
4. Primera Limpieza, se realiza a través de separadores de discos retirando las impurezas medianas

5. Segunda limpieza, consiste en retirar las impurezas que están adheridas al grano de trigo.
6. Lavado, se realiza esta operación haciendo circular agua en tanques con agitadores, terminando de retirar las impurezas más gruesas.
7. El acondicionamiento consiste en rociar agua al grano con el fin de adecuar la humedad y facilitar la separación de la cáscara.
8. Los granos acondicionados permanecen en reposo en silos durante un tiempo determinado de acuerdo al tipo de trigo.
9. Rompimiento o quebrado del grano, además se separan los granos imperfectos.
10. Trituración o primera molienda, se realiza en molinos de rodillos con acanaladuras.
11. Cribado, los granos de trigo triturados se tamizan en cribadores los cuales separan el producto en tres partes.
12. Purificación, se aplica corriente de aire para retirar el salvado y para preparar la sémola para la reducción.
13. Reducción, consiste en pasar la sémola cribada a través de molinos de rodillos lisos.
14. Tamizado, se repite la operación del numeral 11.
15. Purificación, reducción y tamizado. En esta operación se obtiene el germen

16. El producto de la operación 11, se somete a un proceso de purificación, reducción y tamizado de donde resulta tres productos como son salvado, mogolla y harina de segunda.

17. La harina obtenida de la operación 14 se somete a una purificación, reducción y tamizado.

18. La harina obtenida de las operaciones 16 y 17 se someten a una neutralización del color.

19. La harina blanqueada se almacena en silos metálicos con el fin de llevarse a cabo su maduración.

20. A la harina madurada se le adiciona algunas sustancias nutritivas permitidas como vitaminas y minerales.

21. Empaque.

1.8. Estudios energéticos en las empresas molineras.

La tecnología de molinos de rodillos para trigo es una tecnología madura y bien estudiada en todos sus aspectos (Campbell, 2007). Se han reportado numerosos estudios para evaluar el comportamiento de diferentes tipos de molinos en la industria de procesamiento de cereales (McKinney, 2007), pero el análisis se reduce a comparar el consumo energético y otros indicadores de costo de molinos de rodillos y martillos.

En (Fang, Haque, Spillman, Reddy, & Steele, 1998) se hace un estudio con un molino experimental de dos rodillos para determinar los requerimientos de potencia y energía necesarios para la reducción del tamaño del grano. Aunque los modelos obtenidos muestran una alta correlación, son basados en un prototipo experimental y no para una planta específica. En este estudio utilizan análisis estadístico para establecer las correlaciones, pero los modelos obtenidos no se pueden extrapolar a una planta real conformada por varios bancos de molinos y donde hay otras variables operacionales que pueden tener influencia en la demanda energética.

La dureza del trigo como factor influyente en el consumo de energía de los molinos fue estudiada por Kilborn y colaboradores (Kilborn, Black, dexter, & Martin, 1982) pero el estudio está enfocado a la descripción de dos sistemas de medición empleados en condiciones de laboratorio. Otros sistemas de medición de energía mecánica directamente para molinos de martillos han sido también estudiados en función del tamaño de la partícula de biomasa que manipulan pero no se enfocan a los molinos de cereales industriales (Bitra, Womac, Chevanan, Miu, & Igathinathane, 2009). Otros trabajos se han limitado al análisis de motores eléctricos en este sector (CORRALES, 2011).

Se reportan estudios para obtener el ajuste óptimo del banco de molinos (Concereal, 2010). En este estudio se demuestra que hay una correlación entre el consumo energético y el ajuste del molino, de manera que se puede monitorear el

ajuste mediante el consumo de corriente del motor. Se analiza el impacto económico de un ajuste incorrecto en un molino que tiene un motor de 22 kW y se observó que el “ajuste incorrecto” puede tener un impacto significativo en el consumo de electricidad. En este estudio se demuestra que apretar el mecanismo del cilindro en una vuelta incrementa el amperaje medio en 6 A (de 37 a 43 A), de manera que, si se mantiene este ajuste incorrecto durante un año, ello supondría un costo de hasta 3 250 € para un precio por kWh de 0,125 € en Francia.

En ningún caso se ha reportado el estudio de variables del proceso como la humedad, granulometría, etc en función del consumo energético de la planta.

1.9. Conclusiones parciales

1-En la actualidad es evidente la necesidad de incrementar la eficiencia energética y para ello las empresas deben implementar un SGEEn bien estructurado.

2-La experiencia acumulada a nivel internacional en materia de gestión energética ha permitido la elaboración de una norma internacional denominada ISO 50 001 que en la etapa de planificación requiere que las empresas determinen indicadores de desempeño energético. Para esto la literatura científica consultada recomienda la utilización fundamentalmente de herramientas de análisis estadístico.

3-El consumo de cereales a nivel mundial ha tenido una tendencia creciente y por lo tanto el consumo energético de la industria molinera también es significativo, siendo necesario incrementar su eficiencia energética.

4-No se reporta en la bibliografía consultada un estudio de campo para correlacionar variables operacionales con el consumo energético de industrias de molinos de trigo y que puedan ser utilizadas para tener indicadores de consumo más precisos o predecir el comportamiento energético de la instalación.

Capítulo 2

Aplicación de herramientas estadísticas
asociadas a la gestión energética en la
UEB Cereales Cienfuegos

Capítulo 2. Aplicación de herramientas estadísticas asociadas a la gestión energética en la UEB Cereales Cienfuegos

2.1. Generalidades sobre la empresa

La empresa Cereales Cienfuegos se encuentra localizada en la Zona Industrial No.2 carretera O'Bourke, municipio y provincia de Cienfuegos. La organización clasifica por sus características como una empresa con personalidad jurídica propia, de subordinación nacional perteneciente a la Unión Molinera del Ministerio de la Industria Alimenticia (MINAL). Dicha empresa fue fundada en el año 1976, es la única de su tipo en la región central y una de las cinco de todo el país. Su función es abastecer de harina de trigo una amplia región de nuestro país, producto que es obtenido a partir de la molienda del trigo y es empleado en la elaboración de alimentos.

Desde el punto de vista económico, la partida portadores energéticos NO representa valores significativos, pues los mayores gastos de la empresa son por conceptos de materias primas con un 96 % del total de los gastos. No obstante, esta empresa es considerada una de las mayores consumidoras de energía en la provincia justificándose así la necesidad de implementar un sistema de gestión que permita el uso y control racional de sus recursos energéticos. Debido a esto, resulta de gran importancia la implementación de un SGEN basado en la norma NC ISO 50 001.

Los primeros trabajos para la implementación del SGEN se llevaron a cabo por especialistas del Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente de la Universidad de Cienfuegos (CEEMA, 2015). En esta etapa y como requisitos generales de la norma se definió con la administración como alcance y límites del SGEN los siguientes:

Alcance: El Sistema de Gestión Energética (SGEn) se aplica a las diferentes áreas que conforman el Molino 1 considerando que esta sección de la empresa cuenta con servicios y equipamiento automatizado.

Límite: El SGEN se aplicará al Molino 1.

Ahora bien, el molino 1 cuenta con dos líneas de producción, haciéndose necesario establecer indicadores para cada una de ellas por separado para lograr una mejor gestión.

2.2. Balance general de energía

En el molino 1 el portador energético predominante es la electricidad, por lo que el estudio se enfoca en el mismo.

Censo de carga.

Para la realización del censo de carga, se realizó un inventario de los equipos consumidores de energía eléctrica en cada área para identificar los usos significativos de la energía (USEn) (ver Anexo 1). Un análisis de los USEn apunta principalmente a los bancos de molienda y al sistema de transporte neumático como máximos consumidores de energía.

2.3. Aplicación de las herramientas en la etapa de planificación

El análisis de los datos de producción y consumo obtenidos de la empresa permite realizar un proceso de identificación y evaluación del uso de la energía que finalmente debe conducir a la organización y a definir las áreas de usos significativos de la energía e identificar oportunidades para mejorar el desempeño energético.

La actualización de la revisión energética significa la actualización de la información relacionada con el análisis, determinación de la significación y determinación de las oportunidades de mejora del desempeño energético y para ello se parte de la información suministrada por la empresa. Se realizó un primer análisis con datos mensuales de consumo energético (en kWh) y producción de harina (en t), para el Molino 1 y para cada una de sus líneas de producción por separado en el periodo comprendido entre el mes de marzo y el 18 de mayo de 2016.

2.3.1. Las herramientas estadísticas que fueron aplicadas son:

- Gráficos de control.
- Gráficos de consumo de energía eléctrica y producción vs tiempo
- Gráficos de dispersión de consumo de energía eléctrica vs producción.

2.4. Gráficos de control

Los gráficos de control son diagramas lineales que permiten observar el comportamiento de una variable en función de ciertos límites establecidos. Se usan como instrumento de autocontrol y resultan muy útiles para detectar en qué momento se producen las alteraciones.

Considerando que el consumo energético cumple con una ley de distribución normal, entonces existe un consumo medio que puede ser considerado como un estimador del valor más probable y a medida que nos alejamos de este valor medio la probabilidad de aparición de otros valores de consumo cae significativamente si no aparecen causas externas que alteren el proceso, hasta hacerse prácticamente cero para desviaciones superiores a tres veces la desviación estándar (3σ) del valor medio. Este comportamiento permite detectar anomalías cuando existen valores fuera de los límites de control.

Para construir los gráficos de control se utilizaron los datos diarios correspondientes al periodo desde marzo hasta el 18 de mayo 2016.

En la Figura.2.1 se muestra el gráfico de control para el molino 1. El consumo medio diario para el Molino 1 es de 23 700,7 kWh y la desviación estándar $\sigma = 25$ 41,4 kWh.

Como puede observarse, no existen valores de consumo fuera de los límites de control.

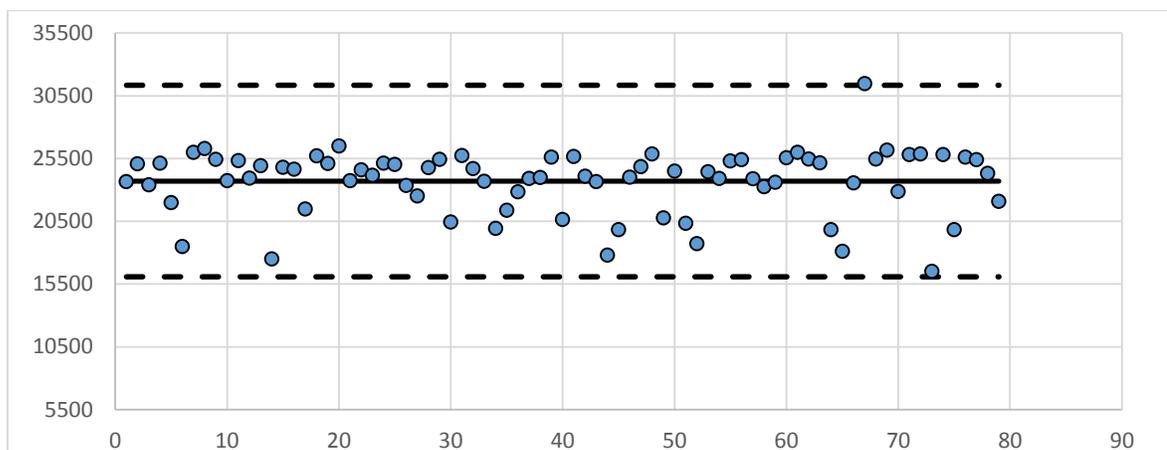


Figura 2.1. Gráfico de control realizado al Molino 1

Para el caso de cada una de las líneas, los gráficos de control son los que se muestran en las Figuras.2.2 y 2.3 para la línea A y B respectivamente. Se observa que el consumo está en control y que solamente hay un valor en la muestra correspondiente a la línea A que está fuera de control

El consumo medio diario para la Línea A es de 11 200,4 kWh y la desviación estándar $\sigma = 1 451,0$ kWh.

El consumo medio diario para la Línea B es de 12 500,3 kWh y la desviación estándar $\sigma = 1 548,7$ kWh.

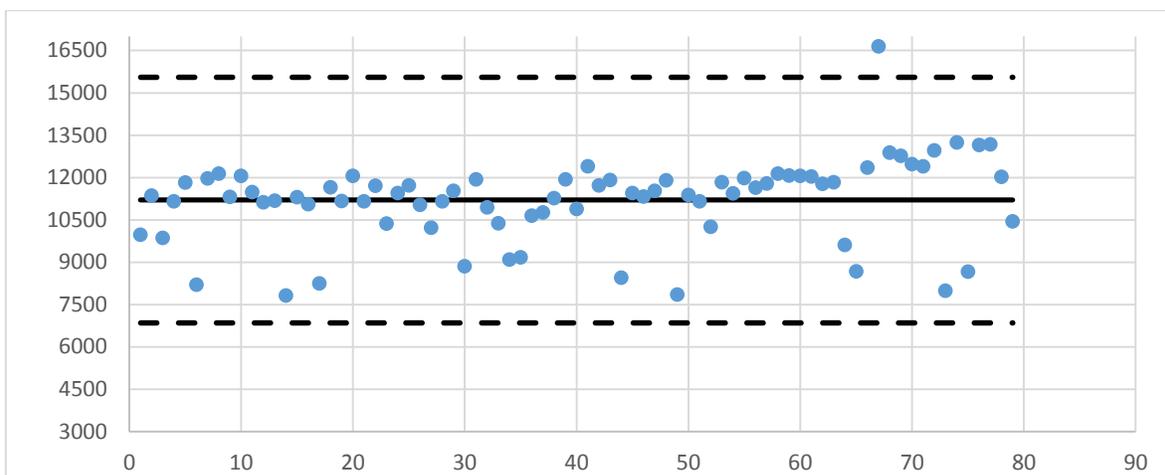


Figura 2.2. Gráfico de control realizado a la línea A.

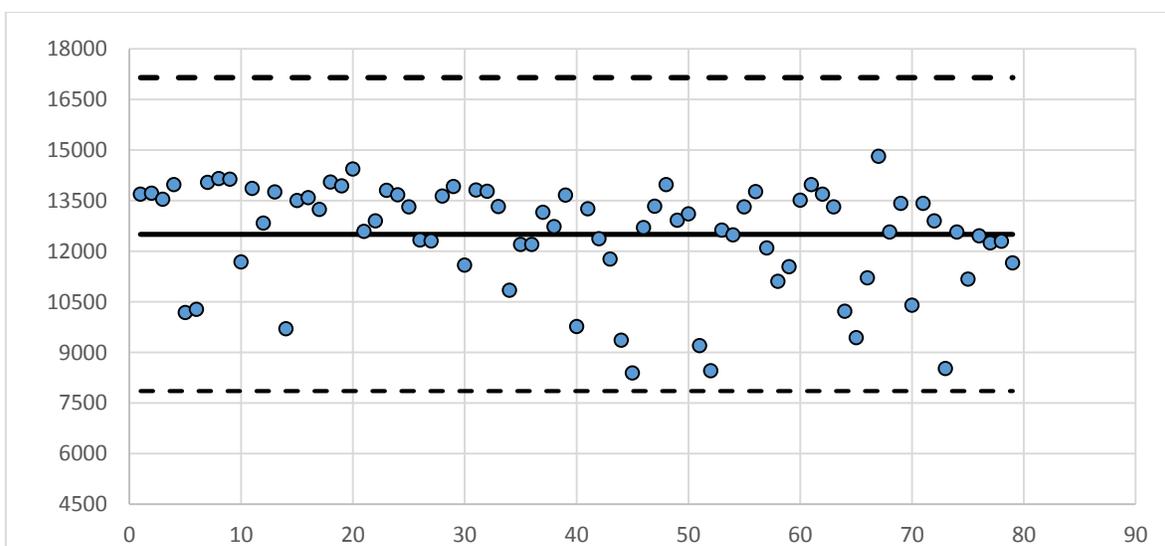


Figura 2.2. Gráfico de control realizado a la línea B.

2.5. Gráficos de consumo-producción vs tiempo (E-P vs T)

Esta herramienta posibilita observar la variación simultánea del consumo de energía con el nivel de producción durante un periodo de tiempo determinado, facilitando la identificación de comportamientos anómalos, o sea, aquellos en donde no exista una variabilidad proporcional.

La Figura.2.4 muestra el comportamiento de estas dos variables para el molino 1 en la Figura.2.5 para la Línea A y en la figura.2.6 para la Línea B. En estos gráficos se señalan las anomalías con un círculo.

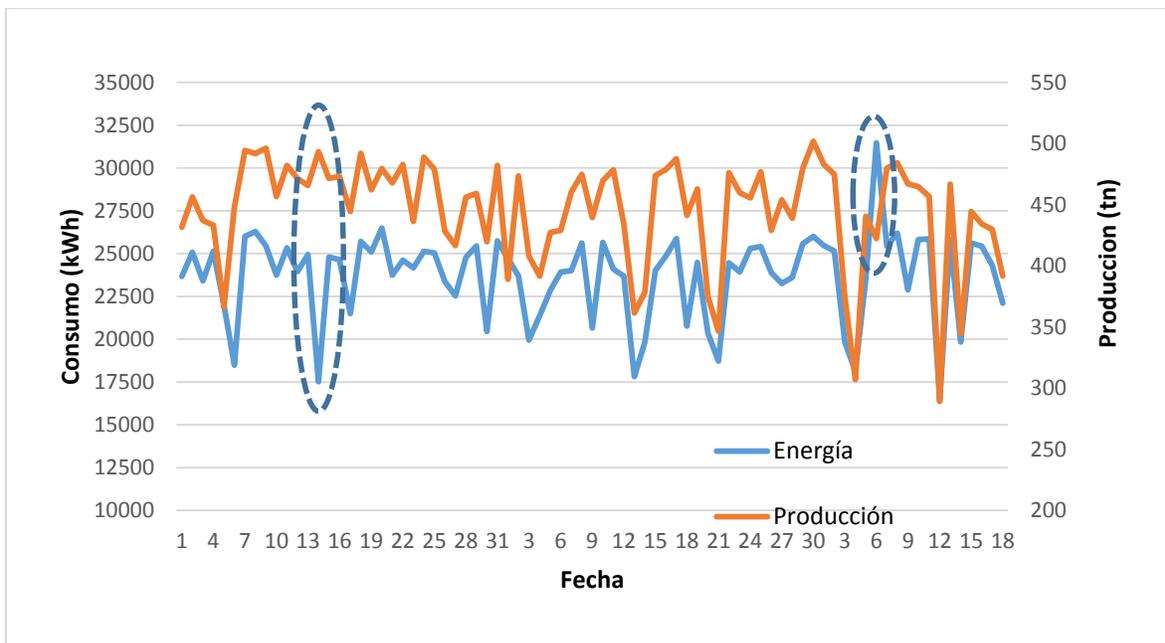


Figura.2.4. Consumo y Producción del molino 1 vs tiempo.

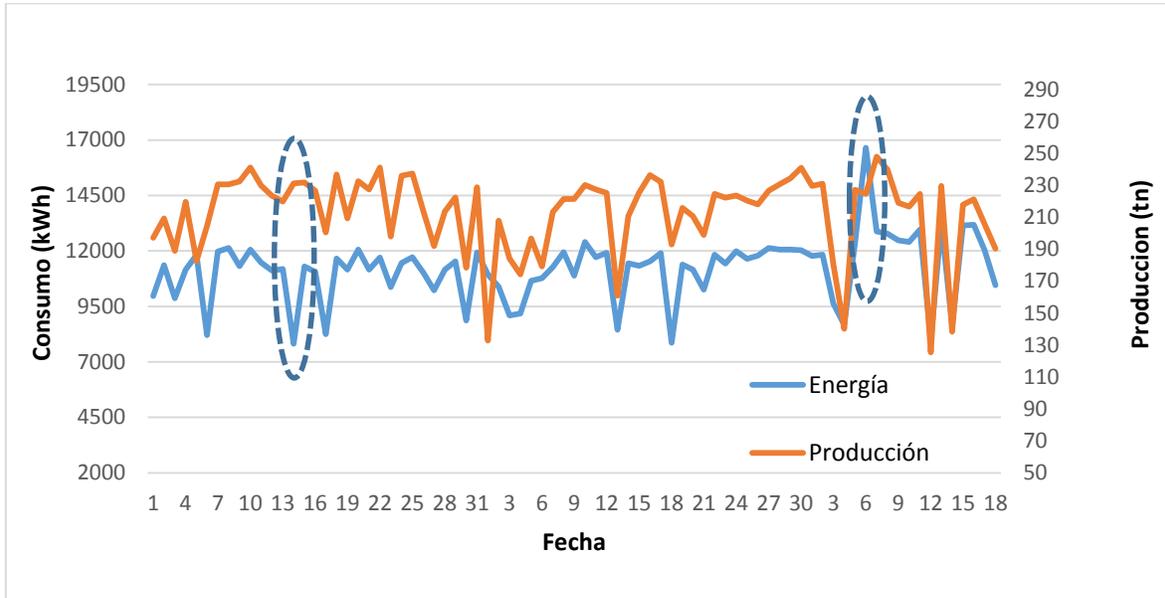


Figura.2.5. Consumo y Producción vs tiempo para la Línea A.

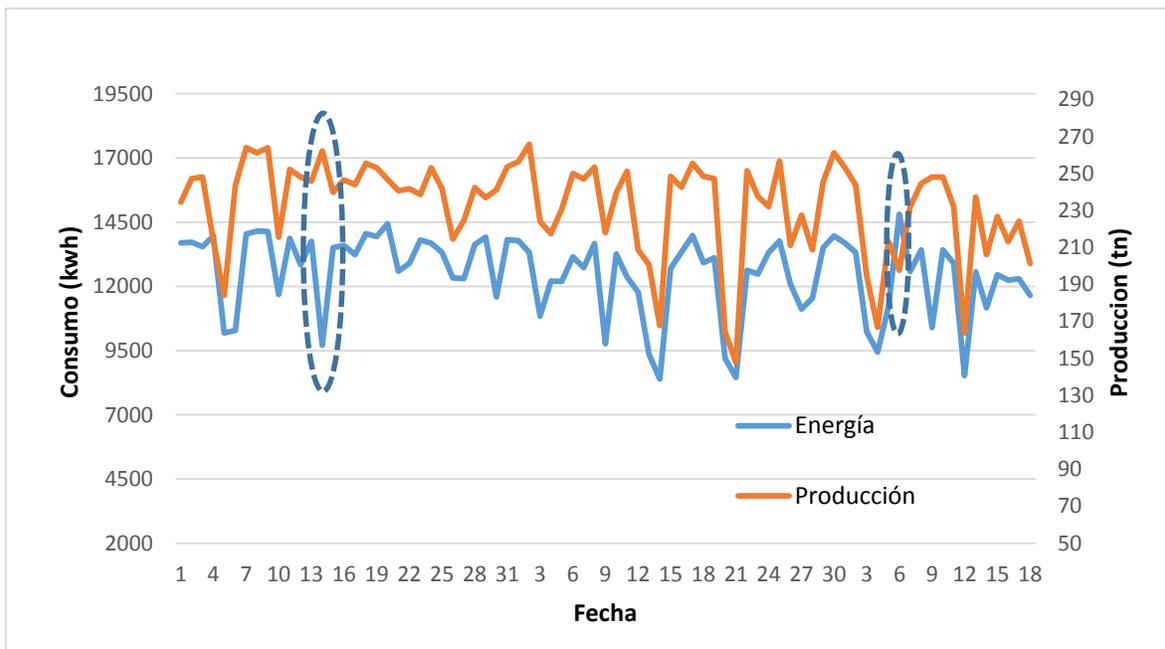


Figura.2.6. Consumo y Producción vs tiempo para la Línea B.

Del análisis del comportamiento de los gráficos mostrados en la Figura.2.5 y 2.6 se puede apreciar que el día 14 de marzo hubo una disminución del consumo eléctrico en 6 178,7 kWh y un aumento de la producción en 48 t respecto a la media y el 6 de mayo hubo un aumento en el consumo de energía eléctrica en 7 767,3 kWh y una disminución de 22,9 t respecto a la media, ambas anomalías detectadas en dichos gráficos influyen directamente en el diagrama de Consumo y Producción vs tiempo para el molino 1 mostrado en la Figura.2.4.

2.6. Diagrama de Consumo de Energía-Producción

Este diagrama revela importante información sobre el proceso. Se propone establecer una línea de base energética utilizando la información disponible y considerando unos 79 días para la recolección de datos. Los datos se seleccionan diariamente.

Este gráfico de E vs. P se realizó para la energía eléctrica en el Molino 1, y para cada una de sus líneas de producción, considerando la cantidad de harina producida.

La Figura.2.7 muestra el diagrama E vs P analizado en el periodo de marzo al 18 de mayo de 2016 para el Molino 1. Dicho gráfico, muestra que existe un comportamiento ajustable a un modelo lineal con $R^2=0,8105$. Este nivel de correlación se obtiene después de haber filtrado 5,53 % los datos.

El modelo de variación promedio de los consumos respecto a la producción identificado es lineal y tiene la siguiente expresión:

$$E = m.P + E_0 \quad (2.1)$$

Dónde:

E es el consumo energético, en kWh

m es el coeficiente que afecta la variable dependiente, se corresponde con la pendiente y se expresa en kWh/t

P es la cantidad de harina producida diariamente, en t

E_0 es la energía que es independiente de la producción o que no está asociada a la misma, en kWh

Para el molino 1 el resultado del ajuste es:

$$E = 45,057 P + 3\,737,2 \quad (kWh) \quad (2.2)$$

El valor de la energía mensual no asociada a la producción, determinada cuantitativamente desde este modelo es de 3 737,2 kWh.

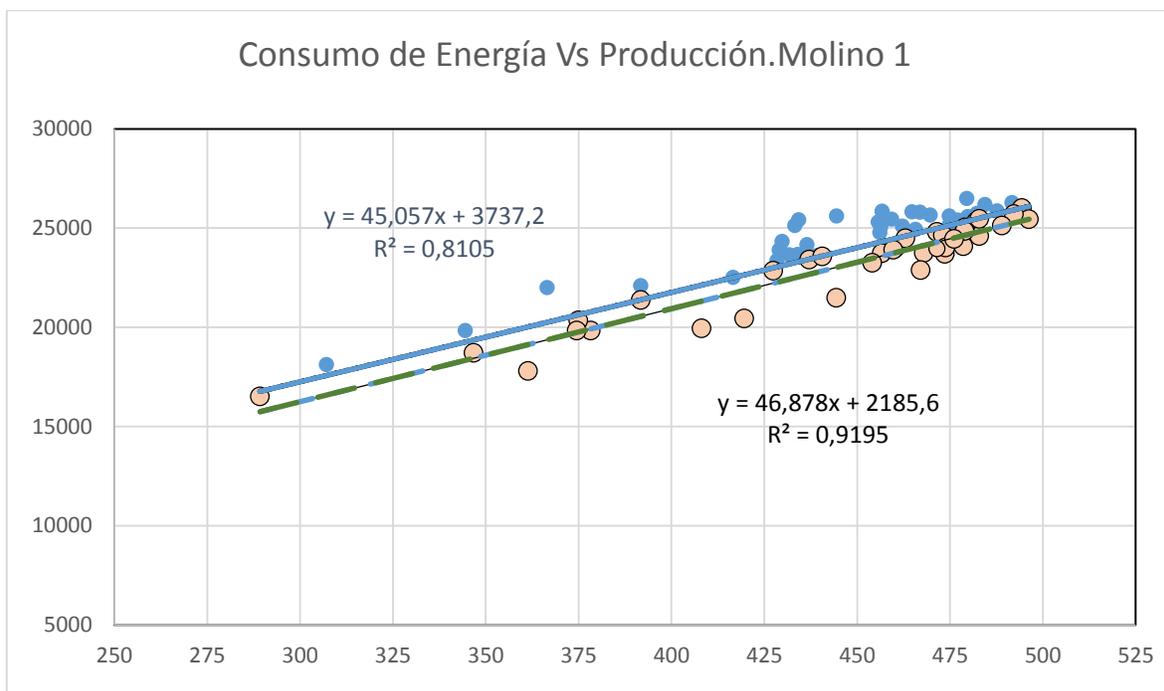


Figura.2.7.Gráfico de dispersión. Línea Base. Línea Meta.

A partir de la gráfica anterior se observan que para determinados niveles de producción se alcanzan valores de consumo energético inferiores a los esperados según el modelo de regresión obtenido. Por este motivo se obtiene con estos valores otro modelo lineal que se muestra en líneas discontinuas en la Figura.2.7 y que representa la línea meta. El modelo lineal que corresponde a la línea meta es:

$$E = 46,878 P + 2 185,6 \text{ (kWh)} \quad (2.3)$$

La línea meta permite cuantificar el ahorro potencial que puede obtenerse en el molino. Este potencial de ahorro ha sido calculado para niveles de producción por encima de 400 t/día. Para ello se calcula la energía que debe consumirse de acuerdo a la línea base y se hace lo mismo para la línea meta. Se calcula la

diferencia y se determina el promedio. El ahorro potencial para estos niveles productivos es de 712 kWh/día.

Las Figuras 2.8 y 2.9 muestran el diagrama E vs P analizado desde el 1 de marzo al 18 de mayo para las líneas A y B respectivamente.

El comportamiento de la energía en ambas líneas con relación a la producción como variable independiente se puede ajustar a un modelo lineal con $R^2=0,6596$ para la Línea A después de haber filtrado 11,06 % de los datos y $R^2=0,8921$ para la Línea B después de haber filtrado 6,32 % de los datos.

Para la Línea A el modelo obtenido es:

$$E = 40,849 P + 2\,453,7 \quad (kWh) \quad (2.4)$$

Para la Línea B es:

$$E = 49,057 P + 1\,210,7 \quad (kWh) \quad (2.5)$$

El valor de la energía mensual no asociada a la producción, determinada cuantitativamente desde el modelo para la Línea A es de 2 453,7 kWh y para la Línea B es de 1 210,7 kWh.

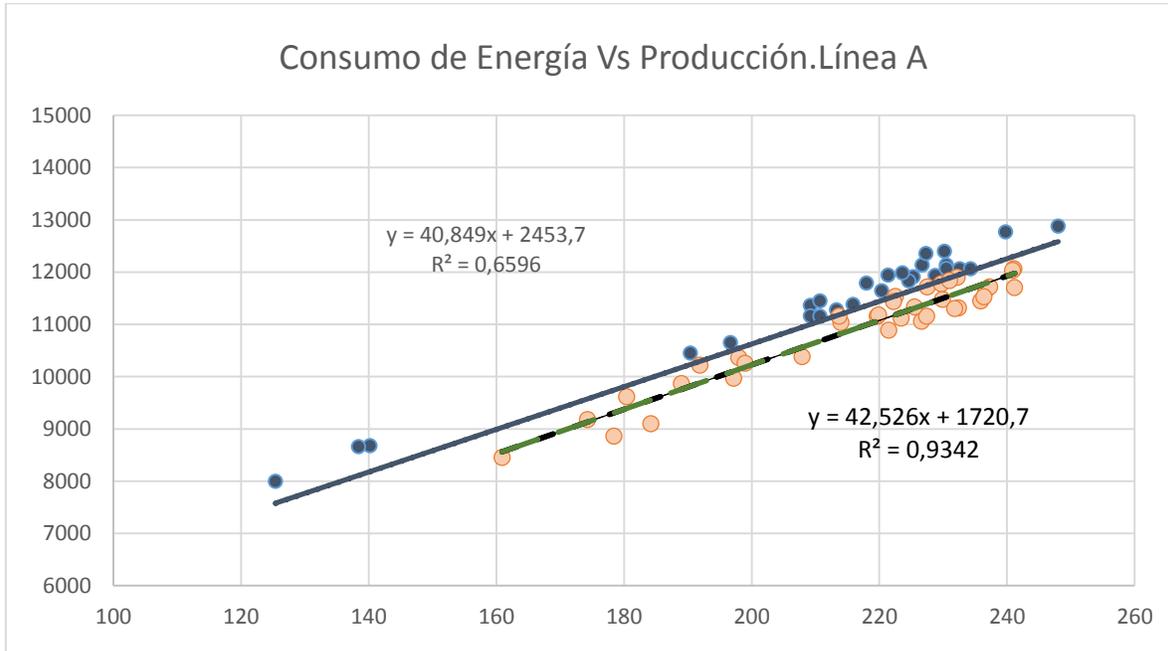


Figura.2.8.Gráfico de dispersión. Línea Base y Línea Meta.

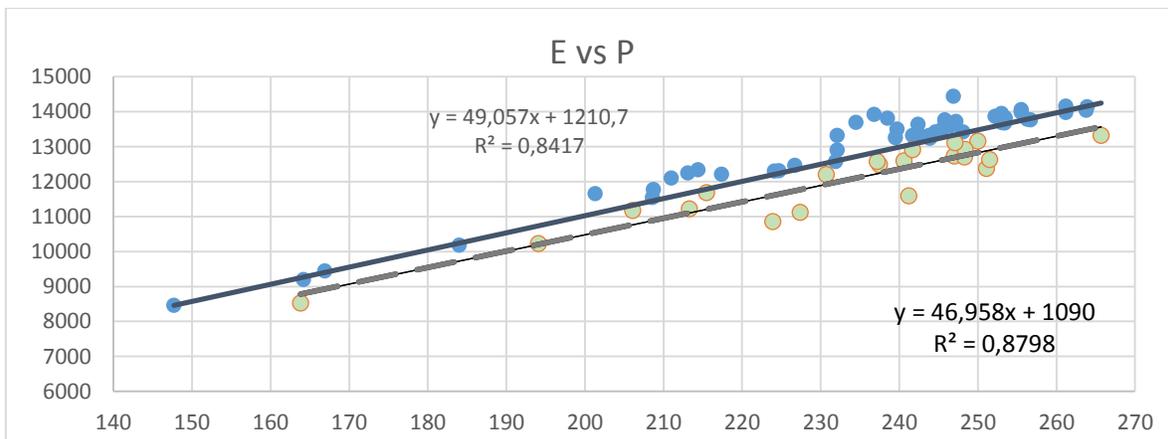


Figura.2.9.Gráfico de dispersión. Línea Base y Línea Meta.

Se determinan las líneas meta para cada línea de producción como se hizo anteriormente para todo el molino. Los valores utilizados para el ajuste son aquellos niveles de consumo que se encuentran por debajo de la línea de

consumo teórico y sus correspondientes valores de producción asociados. Los modelos obtenidos se muestran en líneas discontinuas en las Figuras 2.8 y 2.9 y representan las líneas meta. El modelo de las líneas meta es:

Para la Línea A

$$E = 42,526 P + 1\,720,7 \quad (kWh) \quad (2.6)$$

Para la Línea B

$$E = 46,958 P + 1\,090 \quad (kWh) \quad (2.7)$$

Estas líneas meta permiten cuantificar el ahorro potencial de energía eléctrica que puede obtenerse para cada línea de producción. Este potencial de ahorro ha sido calculado de igual manera a como se determinó para el molino 1 de manera global considerando niveles de producción por encima de 200 t/día. Para ello se calcula la energía que debe consumirse de acuerdo a la línea base y se hace lo mismo para la línea meta. Se calcula la diferencia y se determina el promedio. El ahorro potencial para estos niveles productivos es de 353,5 kWh para la Línea A y 623,7 kWh para la línea B.

2.7. Diagrama de Índice de Consumo de Energía – Producción. (IC vs. P).

El diagrama de Índice de Consumo de Energía - Producción para el Molino 1 y para cada una de sus líneas de producción se pueden observar en las Figuras 2.10, 2.11 y 2.12. Estos se obtienen del modelo de regresión de E vs. P. La expresión de la función $IC = f(P)$ se obtiene de la siguiente forma:

$$E = m \cdot P + E_0 \quad (2.8)$$

$$IC = E/P = m + E_0/P \quad (2.9)$$

$$IC = m + E_0/P \quad (2.9)$$

Dónde:

IC es el índice de consumo, en kWh/t

Para el caso del Molino 1 completo se tiene:

$$IC_{M1} = 45.057 + \frac{3\,737,5}{P} \quad (kWh/t) \quad (2.10)$$

Para la Línea A.

$$IC_{LA} = 40.849 + \frac{2\,453,7}{P} \quad (kWh/t) \quad (2.11)$$

Para la Línea B.

$$IC_{LB} = 49.057 + \frac{1\,210,7}{P} \quad (kWh/t) \quad (2.12)$$

En las Figuras 2.10 a 2.12 se observa el comportamiento del índice de consumo real en función de la producción y con respecto al valor considerado como teórico o plan. El índice de consumo de energía por tonelada de harina producida se toma como indicador de desempeño energético para el sistema de gestión de la energía.

Los valores de IC por debajo de la curva, representan un buen desempeño, o sea, se interpreta como un incremento en la eficiencia del proceso de producción de harina de trigo. Y los valores de IC para la misma producción, que se encuentren por encima de la curva representan un incumplimiento de la empresa. Este gráfico se puede usar para evaluar la eficiencia energética teórica de la empresa.

En estos mismos gráficos se ha establecido la curva de índice de consumo meta.

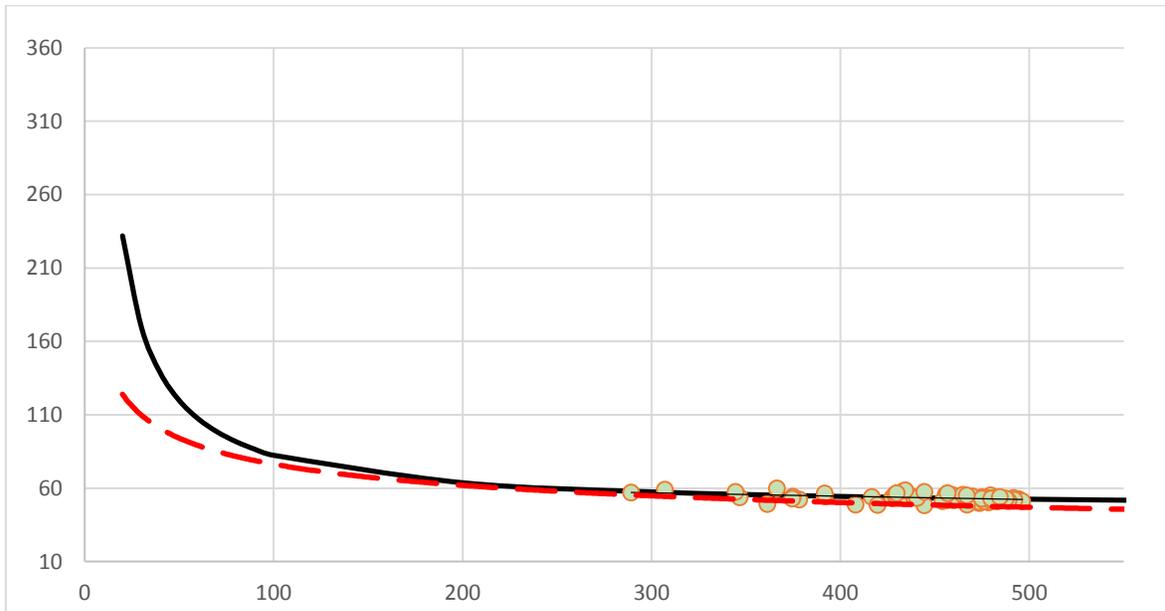


Figura 2.10. Gráfico Índice de Consumo Vs Producción y línea Meta.
Molino 1.

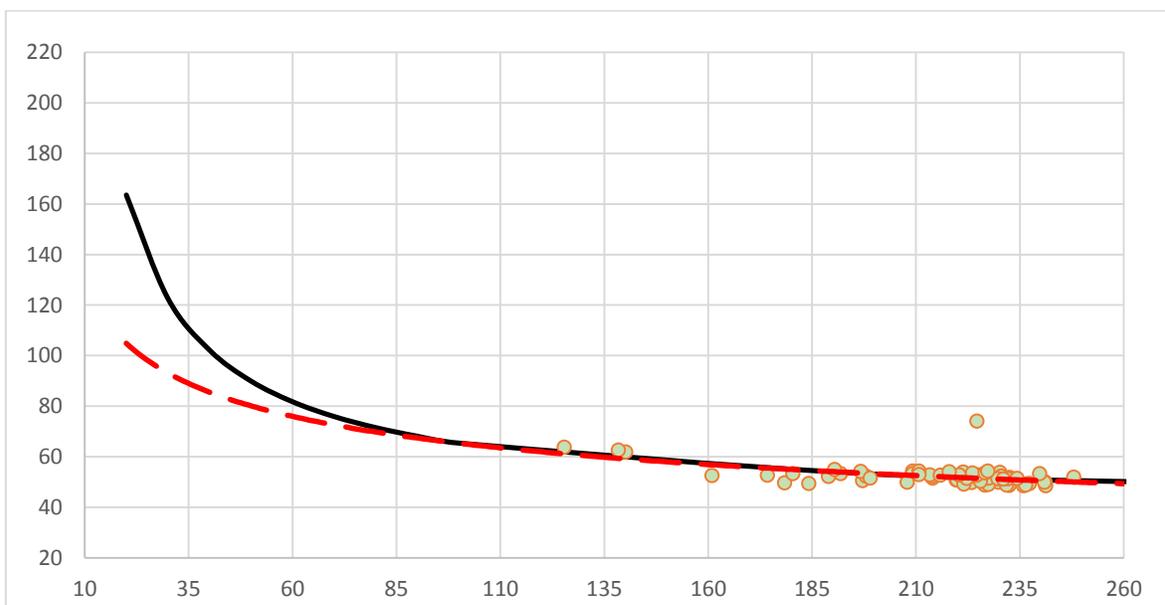


Figura 2.11. Gráfico Índice de Consumo Vs Producción y línea Meta. Línea A.

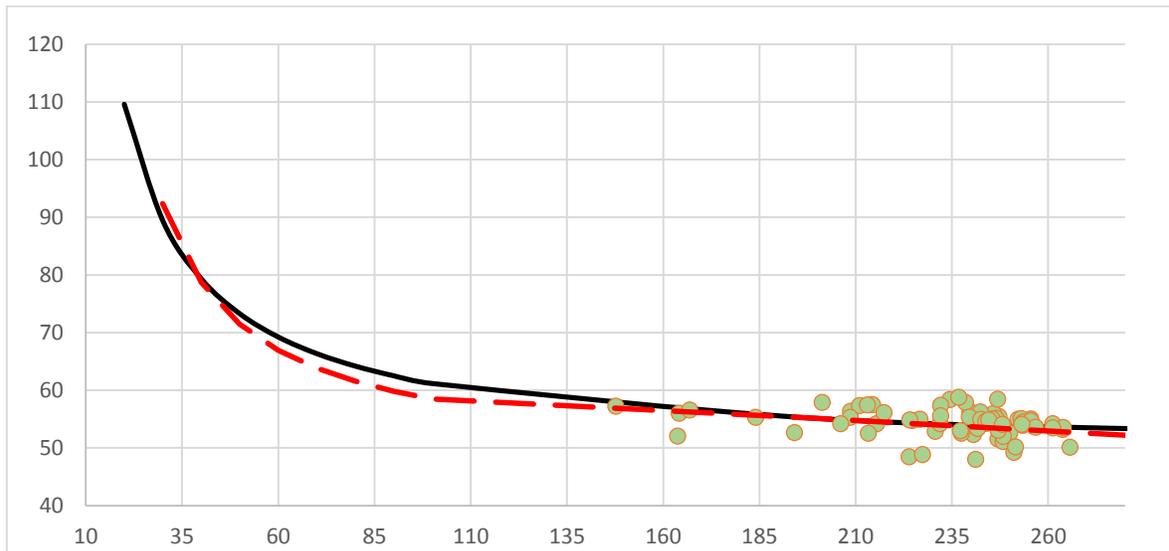


Figura 2.12. Gráfico Índice de Consumo Vs Producción y línea Meta. Línea B.

2.8. Conclusiones parciales

1-Existe una correlación positiva fuerte entre el consumo energético diario del molino 1 y la producción de harina. Igual comportamiento se observa para cada línea de producción independiente.

2-El modelo lineal obtenido y que se considera como línea base para el molino 1, no brinda información acerca del uso de la energía en cada una de las líneas ni tampoco considera otras variables operacionales que pudieran estar influyendo en el desempeño energético de estos procesos.

3-La aplicación de estas herramientas permite determinar un potencial de ahorro teórico para el molino 1 de 712 kWh/día.

4-El indicador de desempeño energético propuesto IC, al ser un indicador global para el molino 1 no permite conocer la efectividad del uso de la energía en cada una de las líneas individuales, por lo que se proponen indicadores similares para cada línea independientemente.

5-Aunque el índice de consumo, más que un valor escalar es una curva dependiente del nivel productivo, para niveles de producción típicos del molino 1 está en el orden de los 53 kWh/t. Para la Línea A es del orden de 51,6kWh/t y para la Línea B de 54,1 kWh/t.

6-Los índices de consumo propuestos para cada línea son para un análisis diario y no permiten evaluar el desempeño energético de cada línea por turno por lo que es necesario desarrollar nuevos modelos de consumo para periodos de tiempo correspondientes a los turnos de trabajo.

Capítulo 3

Obtención de un nuevo modelo de
consumo

Capítulo 3. Obtención de un nuevo modelo de consumo.

3.1. Líneas de producción

El diagrama tecnológico de la UEB Cereales se muestra en la Figura 3.1. En esta figura se puede apreciar que el molino 1 se divide en dos líneas productivas denominadas Línea A y Línea B respectivamente y cuyo equipamiento tecnológico instalado es similar.

La tecnología de que dispone la planta es italiana. Se cuenta con un sistema de dos limpias con capacidad 18 t/h, y dos moliendas, correspondientes a las dos líneas de producción con una capacidad de molienda de 14,5 t/h. Una vista de los bancos de molienda se muestra en el Anexo 2.

La producción aproximada diaria es de 420 t y este flujo culmina con la entrega de harina a través de empaques en sacos por dos vías: Automotor (camiones) y ferrocarril (casillas).

Aunque el sistema de medición de la energía utilizado para la facturación es centralizado y la medición es global para toda la planta, se cuenta con un sistema de medición de energía instalado en las pizarras de distribución de cada línea de producción al cual se puede acceder desde una computadora ubicada en el cuarto de control de la subestación principal. Esto permite hacer análisis energéticos individuales para cada línea.

En este capítulo se va a desarrollar un nuevo modelo de consumo en función de otras variables operacionales que expliquen mejor el comportamiento energético de cada línea de producción.

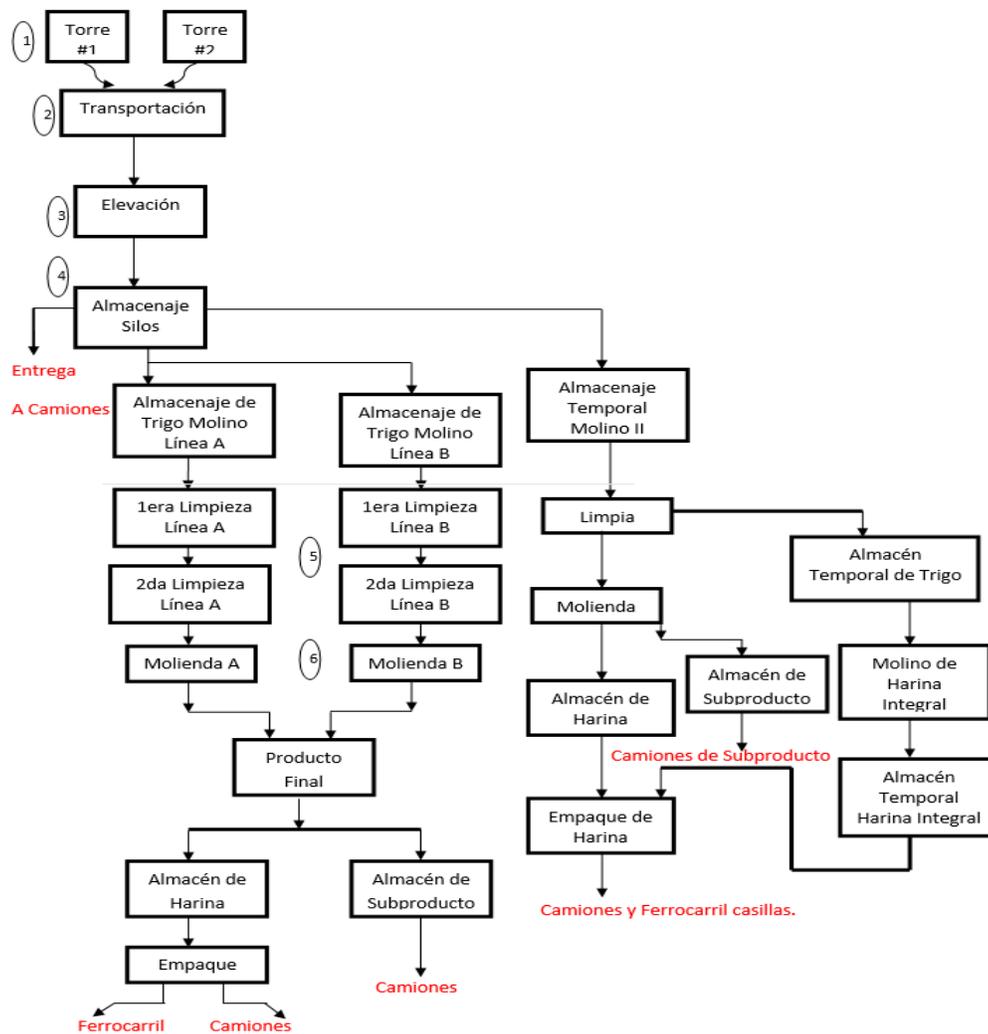


Figura 3.1. Diagrama de flujo de producción de la UEB Cereales Cienfuegos

3.2. Definición de las variables explicativas

En el capítulo anterior se estudió el modelo de consumo del molino 1 de manera global en función de una variable independiente que es la producción diaria. También se obtuvieron modelos de regresión para cada una de las líneas en función de la producción. Estos modelos que se utilizan como línea base se obtuvieron por regresión lineal simple. Como el interés ahora es investigar otras variables que pudieran influir en el patrón de consumo del proceso de molienda es necesario realizar regresión lineal múltiple. La regresión lineal múltiple es aquella en la que se tiene más de una variable explicativa; lo que nos ofrece la ventaja de utilizar más información en la construcción del modelo y, consecuentemente, realizar estimaciones más precisas.

Las variables que se van a considerar son:

Producción (P): Toneladas de harina producidas en un turno de 8 horas.

Humedad (He): Humedad con la que entra el trigo al Molino cuando viene de los silos de almacenaje, en %.

Humedad antes del reposo (Har): Humedad que alcanza el trigo después de rociarlo con agua para su ablandamiento, en %. (Anexo 10).

Humedad después del reposo (Hdr): Humedad del trigo después de ser sometido a un tiempo de reposo, es la humedad con la que realmente entra a los bancos de molinos, en %.

Granulometría (G): Magnitud que define la calidad del producto final.

Todas estas variables son obtenidas de los reportes de análisis del laboratorio y de reportes de producción por turno.

La variable dependiente es la energía consumida (E), en kWh, y se toma como se explicó anteriormente del sistema de medición eléctrica.

Los valores, tanto de las variables explicativas como de la variable independiente se muestran en el Anexo 3.

Para la obtención del modelo se hicieron las siguientes consideraciones:

- Se trabaja con la información de los turnos de 7:00 am a 3:00 pm y de 3:00 pm a 11:00 pm ya que en el turno de la madrugada no se realizan todos los análisis de laboratorio y por tanto no se cuenta con los datos de humedades y granulometría.
- Debido a que tecnológicamente las líneas son iguales, se unifica la información de cada línea en una sola base de datos para obtener un solo modelo que simule el comportamiento de ambas líneas.
- Se crea una nueva variable denominada **Agua**, que representa la cantidad de agua que se añade para remojar el trigo que entra. Es la diferencia entre la humedad del trigo antes del reposo y la humedad con la que entra el trigo al molino, o sea:

$$Agua = Har - He \quad (3.1)$$

3.3. Modelos de regresión lineal múltiple

Los modelos de regresión lineal múltiple se obtuvieron utilizando el software Statgraphic centurión. Primeramente, se aprovecha la opción del software para seleccionar el mejor modelo de regresión. Para ello se tendrá en cuenta como criterio la R^2 ajustada. El software da la posibilidad de ajustar varios modelos de regresión múltiple para describir la relación entre el consumo de energía (E) y 4 variables predictoras. Las cuatro variables A, B, C y D para el software son:

A-producción (P)

B-Agua

C-Humedad después del reposo (Hdr)

D-granulometría (G)

Los modelos se han ajustado conteniendo todas las combinaciones desde 0 hasta 4 variables. En la tabla 3.1 se muestra el resultado de este análisis.

Tabla.3.1.Modelos con Mayor R^2 ajustada

| <i>CME</i> | R^2 | R^2 <i>Ajustada</i> | <i>Cp.</i> | <i>Variables Incluidas</i> |
|------------|---------|--------------------------|------------|--------------------------------|
| 143669. | 65.7891 | 65.4302 | 3.51201 | ABD |
| 143837. | 65.6294 | 65.3899 | 2.84467 | AD |
| 143915. | 65.8504 | 65.3711 | 5.0 | ABCD |
| 144015. | 65.7066 | 65.3469 | 4.20015 | ACD |
| 146286. | 65.0441 | 64.8005 | 7.7297 | AB |
| 146394. | 65.1402 | 64.7745 | 8.92782 | ABC |
| 146589. | 64.8498 | 64.7278 | 7.35095 | A |
| 146603. | 64.9685 | 64.7244 | 8.36019 | AC |
| 388165. | 6.92269 | 6.5995 | 490.79 | D |
| 389152. | 7.0101 | 6.36209 | 492.06 | BD |
| 389179. | 7.00362 | 6.35557 | 492.114 | CD |

| | | | | |
|---------|----------|---------|---------|-----|
| 390223. | 7.07895 | 6.10425 | 493.486 | BCD |
| 415592. | 0.346021 | 0.0 | 546.559 | C |
| 415592. | 0.346021 | 0.0 | 547.131 | B |
| 415592. | 0.0 | 0.0 | 546.564 | |

La tabla.3.1.muestra los modelos que dan los valores más altos de R^2 ajustada. El estadístico de R^2 ajustada mide la proporción de variabilidad en E que es explicada por el modelo. Valores grandes de R^2 ajustada corresponden a valores pequeños de cuadrado medio del error (CME). Se muestran hasta 5 modelos en cada subconjunto de entre 0 y 4 variables. El mejor modelo contiene 3 variables, P, Agua, y G.

3.3.1. Ajuste para el modelo seleccionado

El primer ajuste que se investiga es correlacionar la energía (E) con las variables explicativas P, Agua y G de acuerdo al resultado mostrado en la tabla 3.1.

El resultado de ajustar un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre E y 3 variables independientes da la siguiente ecuación:

$$E = 563,578 + 456\,602 \cdot P + 18,998 \cdot Agua - 74,496 \cdot G \quad (\text{KWh}) \quad (3.1)$$

Los resultados se muestran en el Anexo 4.

Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95,0%.

El estadístico R^2 indica que el modelo así ajustado explica 65,7891% de la variabilidad en E. El estadístico R^2 ajustada, que es más apropiada para

comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 65,4302%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 379,037. El error absoluto medio (MAE) de 237,78 es el valor promedio de los residuos.

La Figura.3.2.muestra la correlación entre las mediciones de energía (valores observados) y los resultados de energía obtenidos por el modelo (valores predichos). Los residuos se muestran graficados en la Figura.3.3 para cada juego de datos disponibles.

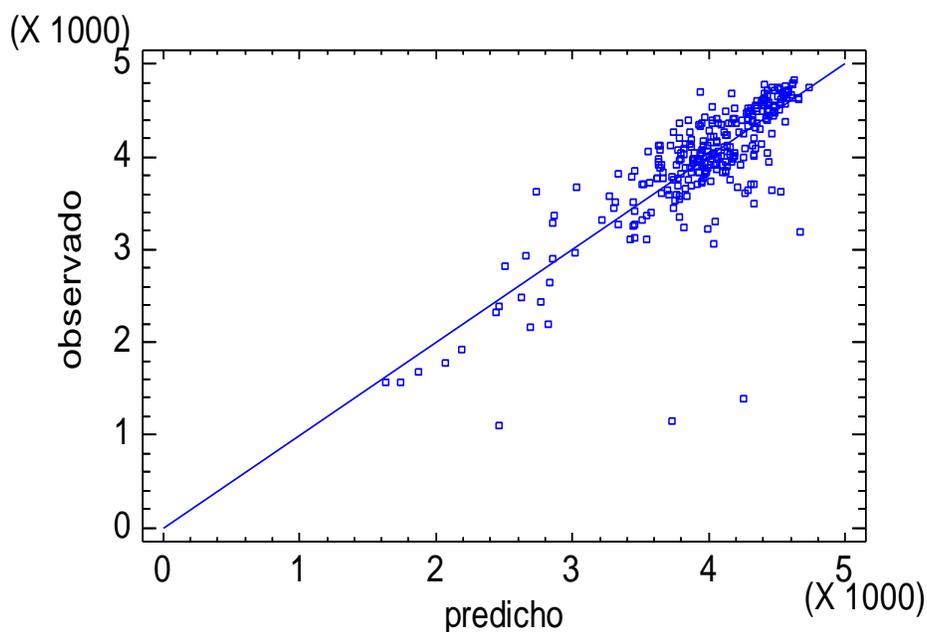


Figura 3.2.Gráfico de E mostrando la correlación entre los valores observados y predichos por el modelo considerando todos los datos disponibles.

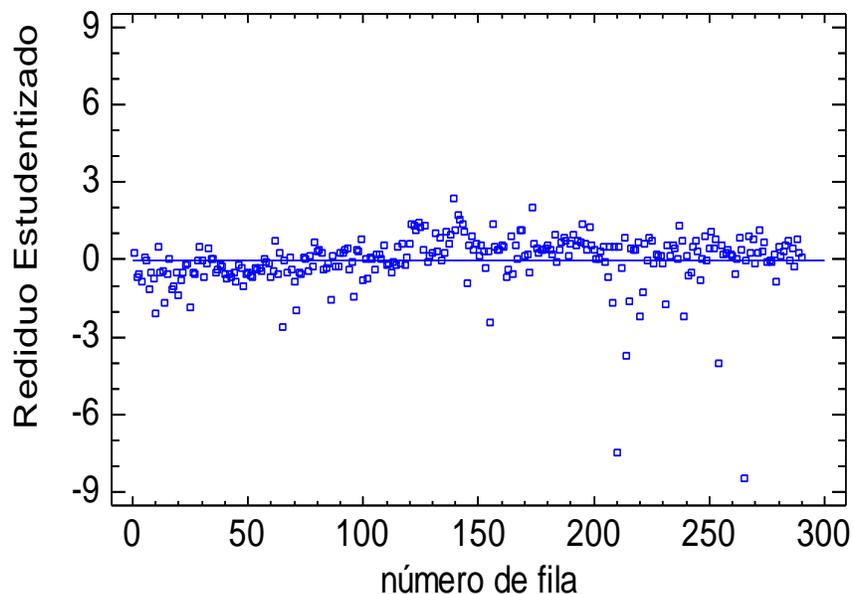


Figura 3.3. Gráfico de residuos para cada juego de datos.

En este ajuste, el valor-P más alto de las variables independientes es 0,2489 que corresponde a Agua, y es mayor que 0,05, puede considerarse eliminar esta variable del modelo para simplificarlo ya que está indicando que esta variable no tiene significación estadística.

No obstante, primero se filtrarán los datos para eliminar aquellos que tienen residuos atípicos y ver su influencia en el modelo. Para esto se utiliza la opción tabular del Statgraphic para mostrar los residuos atípicos e ir eliminando los puntos con valores observados mayores a 3 desviaciones estándar con relación al valor de E dado por el modelo ajustado. Estos valores pueden ser valores aberrantes y al eliminarlos mejora el ajuste obtenido.

3.3.2 Ajuste después de eliminar los datos aberrantes

Una vez que se eliminan los datos con residuos atípicos (15 juegos de valores en total para un 5%) se obtiene un nuevo modelo de regresión lineal múltiple que describe la relación entre E y 3 variables independientes. La ecuación del modelo ajustado es:

$$E = 526,652 + 46,923 \cdot P + 22,8948 \cdot Agua - 96,7038 \cdot G \quad (\text{KWh})$$

(3.2)

Los resultados del ajuste se muestran en el Anexo 5

Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95,0%.

El estadístico R^2 se incrementa desde 65,7891% hasta 84,4088%. Este estadístico indica que el modelo así ajustado explica 84.4088% de la variabilidad en E.

El estadístico R^2 ajustada, que es más apropiada para comparar modelos con diferente número de variables independientes, también se incrementa y es 84,2362%.

El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 231,28. El error absoluto medio (MAE) de 180,296 es el valor promedio de los residuos.

Debido a que el valor-P más alto de las variables independientes es 0,0351, que corresponde a Agua, pero es menor que 0,05, ese término es estadísticamente

significativo con un nivel de confianza del 95,0%. Consecuentemente, no es necesario eliminar ninguna variable del modelo.

La Figura.3.4.muestra el gráfico de los valores observados contra los predichos por el modelo. En este gráfico los marcadores de color rojo en forma de cruz indican los datos eliminados. Estos datos que fueron eliminados se corresponden con las líneas sombreadas en amarillo en la tabla del Anexo 3.

La Figura.3.5.muestra el gráfico de los residuos para cada juego de datos.

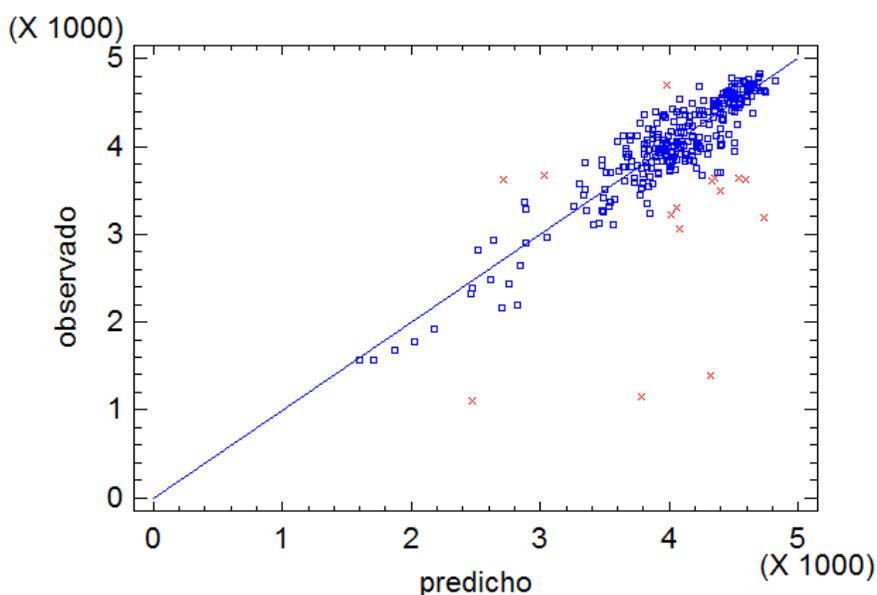


Figura 3.4. Gráfico de E mostrando la correlación entre los valores experimentales y el resultado del modelo.

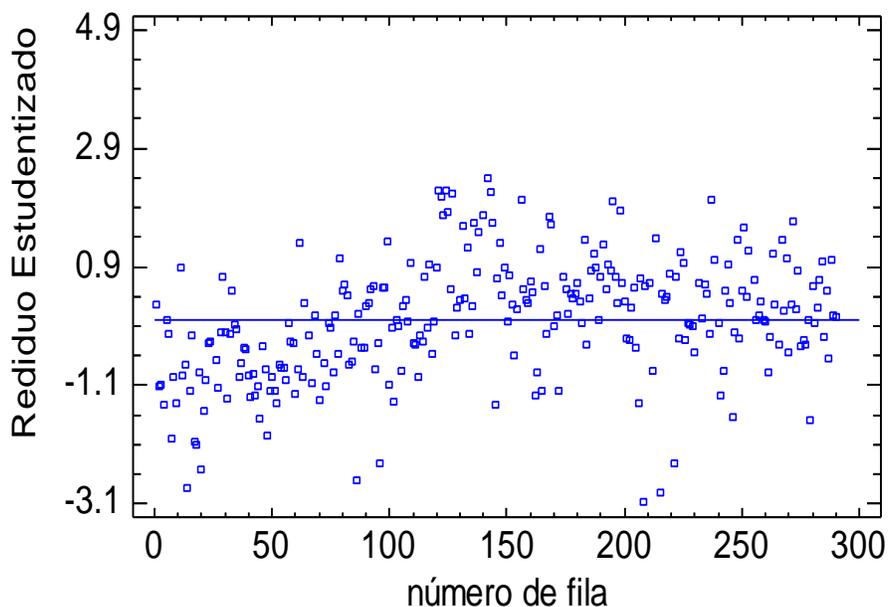


Figura 3.5. Residuos para el modelo ajustado por la expresión (3.2)

Como se observa en el modelo ajustado, incrementos de la producción implican incrementos del consumo, incrementos en la cantidad de agua añadida también incrementan el consumo, mientras que una mayor granulometría representa una disminución del consumo energético.

Estos resultados pueden explicarse debido a que una mayor diferencia entre la humedad de entrada y la humedad antes del reposo significa mayor cantidad de agua añadida y por lo tanto mayor consumo de energía en su bombeo. Por otro lado, un incremento en la granulometría es un indicio de mala calidad de la harina que se traduce en menor trabajo de los bancos.

3.3. Calidad del modelo obtenido.

Se puede utilizar el modelo para planificar el consumo, o sea, como un predictor del consumo. Para ello se grafican los valores reales y las predicciones del modelo para cada observación como se muestra en la Figura.3.6. En esta figura se observa que el modelo generalmente predice bien el consumo de las líneas de producción.

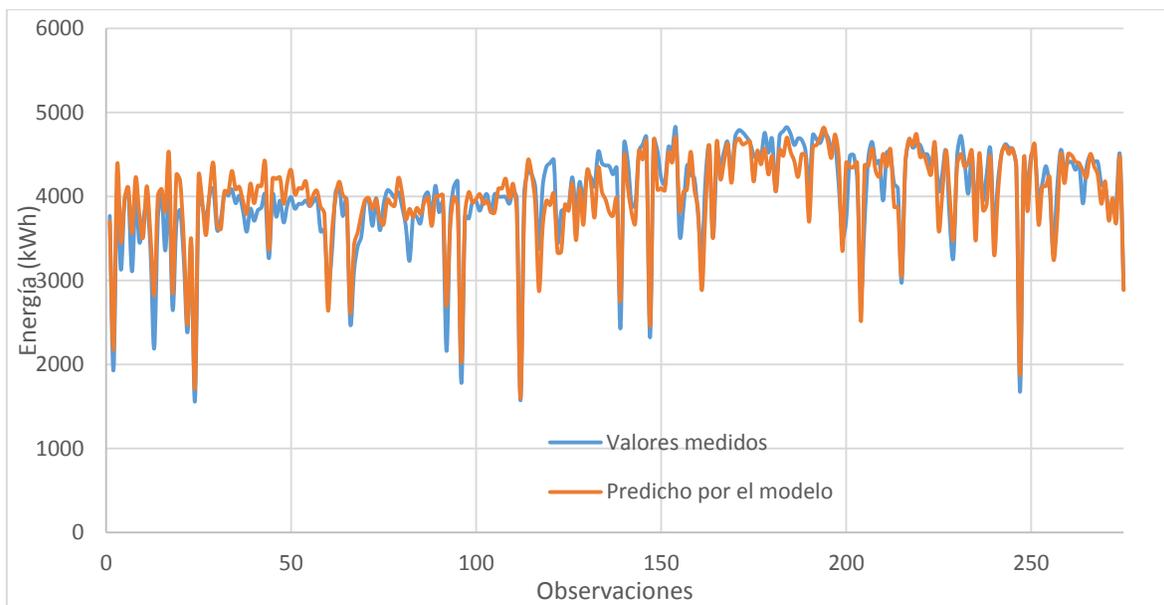


Figura 3.6. Gráfico de consumo real y predicho por el modelo contra observaciones.

El elevado coeficiente de correlación del modelo obtenido (0,84) no debe ser considerado como un indicador de que el modelo ajustado es bueno. Debe analizarse si los residuos tienen un comportamiento aleatorio y cumplen con una distribución Gaussiana. Este resultado se muestra en la Figura.3.7.

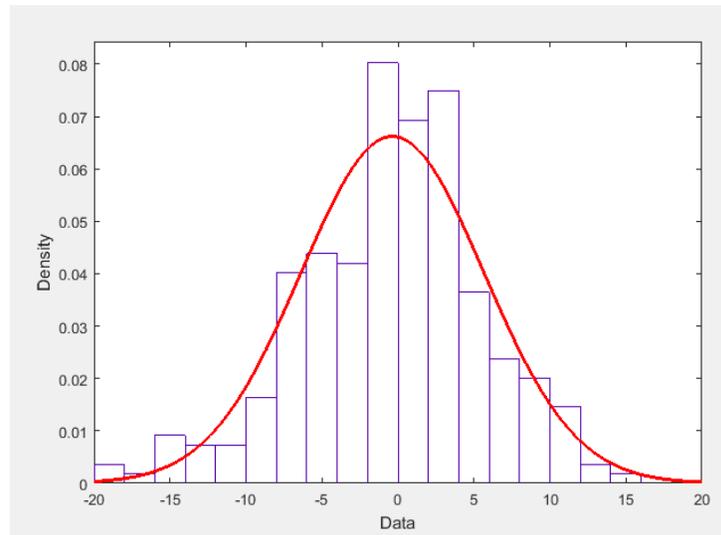


Figura 3.7. Distribución normal de los errores del modelo ajustado con $\mu = -0.36$ y $\sigma = 6.02$.

Además, se analizan otros indicadores como el MAPE (Mean Absolute Porcentaje Error). Este parámetro estadístico da una idea global de la diferencia entre los valores reales y predichos. El MAPE se calcula como:

$$MAPE = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{(P_i - A_i)}{A_i} \right| \right) \cdot 100 \quad (3.3)$$

Dónde:

n es el número de observaciones en el periodo analizado,

P_i y A_i son los i -ésimos valores predichos y reales respectivamente.

Para la Figura 3.6 el MAPE es 4,78%.

3.4. Nuevo indicador de desempeño energético para cada línea de producción.

El modelo obtenido es factible utilizarlo para establecer un indicador de desempeño energético más complejo manteniendo hasta el momento el mismo indicador utilizado para el molino 1 de manera global, o sea el índice de consumo (IC) pero calculado para la línea de producción y que considere las variables operacionales incluidas en el nuevo modelo.

Para ello se dividen ambos miembros de la expresión (3.2) por la producción (P), o sea:

$$\frac{E}{P} = \frac{526,652 + 46,923 \cdot P + 22,8948 \cdot \text{Agua} - 96,7038 \cdot G}{P} \quad (\text{KWh/t})$$

(3.4)

Arreglando esta expresión se tiene:

$$IC = 46.923 + \frac{526,652 + 22,8948 \cdot \text{Agua} - 96,7038 \cdot G}{P} \quad (\text{KWh/t}) \quad (3.5)$$

Este nuevo índice de consumo en función de la producción, del agua añadida y de la granulometría del producto final debe verse como una familia de curvas.

Por ejemplo, para una cantidad de agua añadida que represente un incremento en la humedad de entrada de un 4,15%, que es el valor medio de la variable Agua, se tienen las curvas de índices de consumo para diferentes granulometrías de la

harina obtenida. Estas curvas de índice de consumo teórico se muestran en la Figura.3.8.

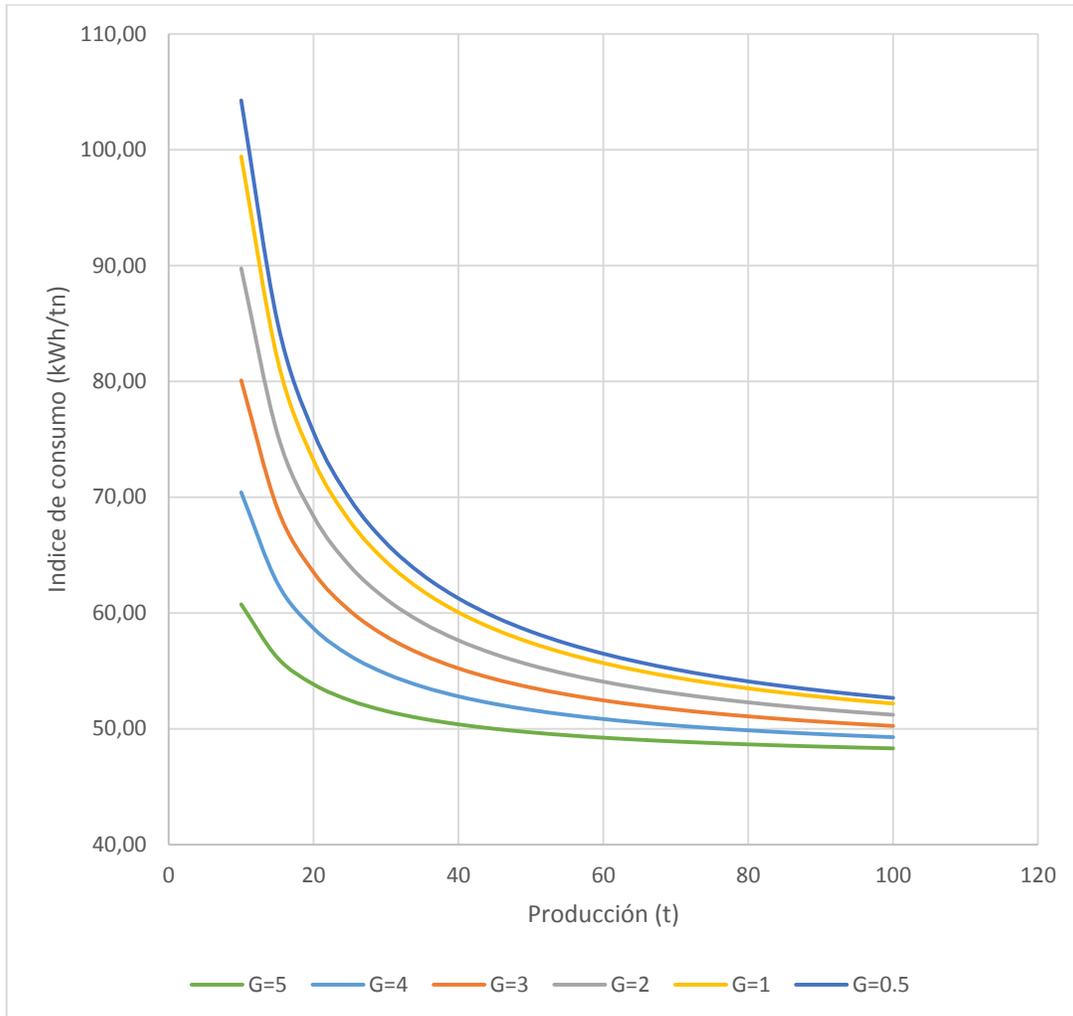


Figura 3.8. Índice de consumo teórico vs producción para 4.15% de Agua y diferentes granulometrías.

3.5 Análisis del comportamiento energético de cada línea considerando solo la producción.

Si se desprecia el efecto que sobre el consumo tienen las variables Agua y Granulometría, se puede construir un modelo de regresión lineal simple que

correlacione la energía con la Producción. Esto es el modelo clásico de la línea base, pero ahora para un intervalo de tiempo menor correspondiente a 8 horas de trabajo de los turnos.

El ajuste para cada línea de producción se muestra en las Figuras.3.9 y 3.10 respectivamente.

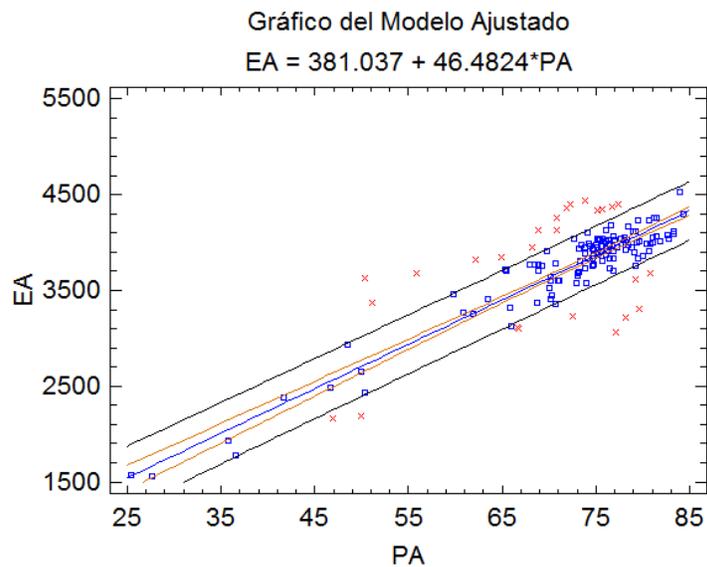


Figura 3.9 Ajuste del consumo vs producción por turno para la línea A.

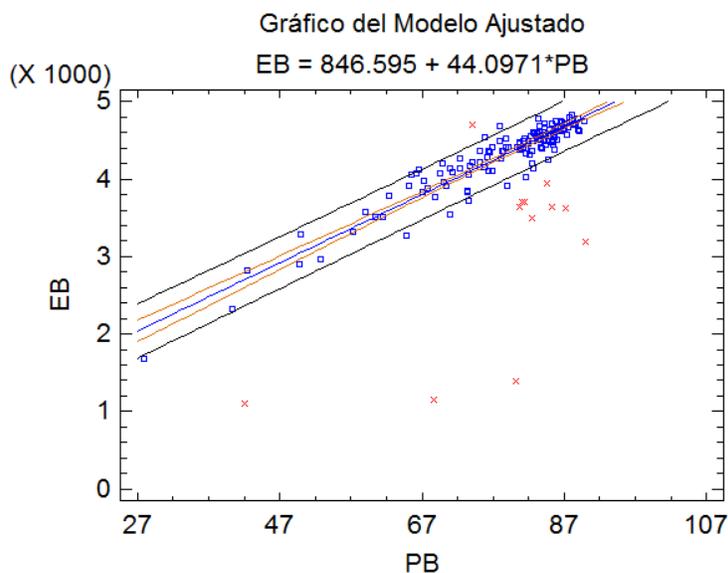


Figura 3.10 Ajuste del consumo vs producción por turno para la línea B.

Los resultados del ajuste para cada línea se muestran en los Anexos 6 y 7 respectivamente.

Con estos modelos se obtienen las curvas para índices de consumo teóricos por turno y que consideran solo la variable producción. Las expresiones correspondientes son las siguientes:

Para la línea A:

$$IC_{LA} = 46,4824 + \frac{381.037}{P} \quad (KWh/t) \quad (3.6)$$

Para la línea B:

$$IC_{LB} = 44,0971 + \frac{846.595}{P} \quad (KWh/t) \quad (3.7)$$

El efecto de considerar solamente la producción del turno se puede apreciar en la Figura .3.11. En esta figura se ha graficado en un mismo plano la familia de curvas dadas por la ecuación (3.5) para una cantidad de Agua añadida de 4,3% y diferentes granulometrías y la curva correspondiente a la ecuación (3.6) (curva de color negro) que representa el índice de consumo teórico por el método convencional para la Línea A, en el cual solo se considera la producción como variable independiente. En esta gráfica se ha colocado también el valor real del índice de consumo para el día 8 de marzo en el turno de 7:00 am a 3:00 pm. En este turno los parámetros de producción fueron:

Producción: 78 t de harina

Humedad de entrada: 11,9%

Humedad antes del reposo: 16,2%

Agua= $16,2 - 11,9 = 4,3\%$

Granulometría: 1,86

Consumo de energía: 4 052 kWh

Índice de consumo real: 51,95 kWh/t

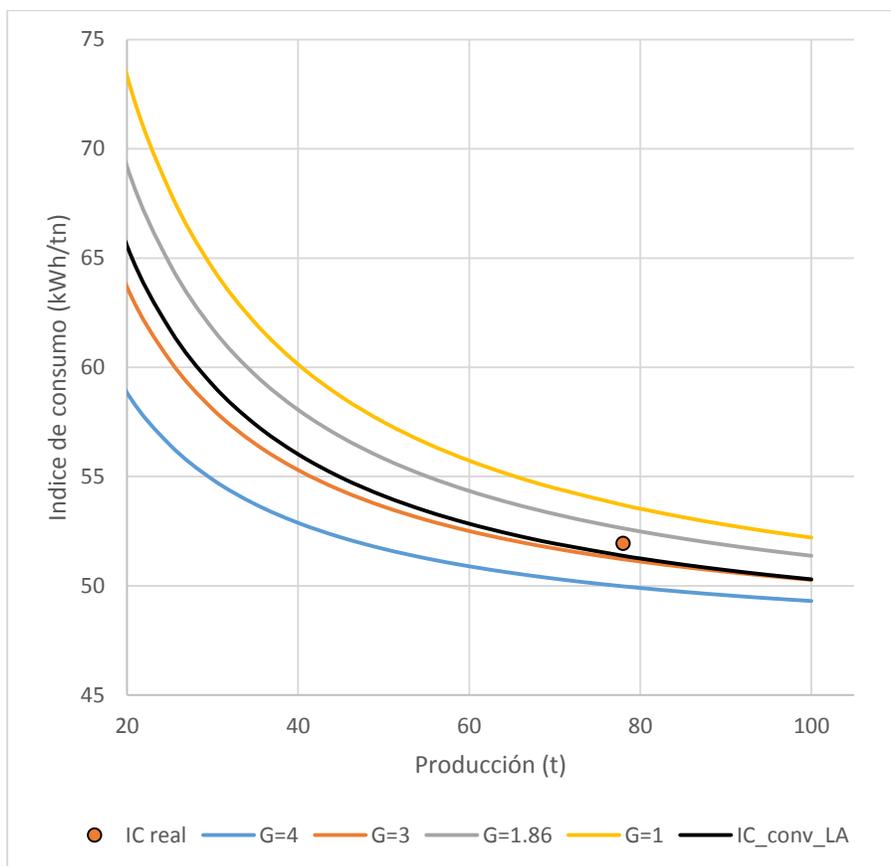


Figura 3.11. Línea A. Curvas de Índice de consumo para 4.3% de Agua y diferentes granulometrías por el modelo propuesto y curva de índice de consumo por el método convencional.

Se puede observar en la Figura.3.11 que el índice de consumo real está por encima del valor teórico correspondiente (51,37 kWh/t) calculado por el método convencional que no tiene en cuenta otras variables sino solamente la producción. Este comportamiento se interpreta como un pobre desempeño energético en este turno de trabajo. No obstante, hay que considerar que no se ha tenido en cuenta la adición de agua al trigo de entrada ni la granulometría obtenida.

Si se considera el modelo que se propone y que tiene en cuenta la cantidad de agua añadida antes del reposo y la granulometría que se obtiene en el proceso de molienda (curva de color gris) el desempeño es bueno al estar por debajo del teórico para estas condiciones que es de 54,32 kWh/t.

En la Figura 3.12. se ha graficado en un mismo plano la familia de curvas dadas por la ecuación (3.5) para una cantidad de Agua añadida de 5,3% y diferentes granulometrías y la curva correspondiente a la ecuación (3.7) (curva de color negro) que representa el índice de consumo teórico por el método convencional para la Línea B, en el cual solo se considera la producción como variable independiente. En esta gráfica se ha colocado también el valor real del índice de consumo para el día 5 de marzo en el turno de 3:00 pm a 11:00 pm. En este turno los parámetros de producción fueron:

Producción: 78,1 t de harina

Humedad de entrada: 11,9%

Humedad antes del reposo: 17,2%

Agua= $17,2 - 11,9 = 5,3\%$

Granulometría: 1,4

Consumo de energía: 4 262 kWh

Índice de consumo real: 54,57 kWh/t

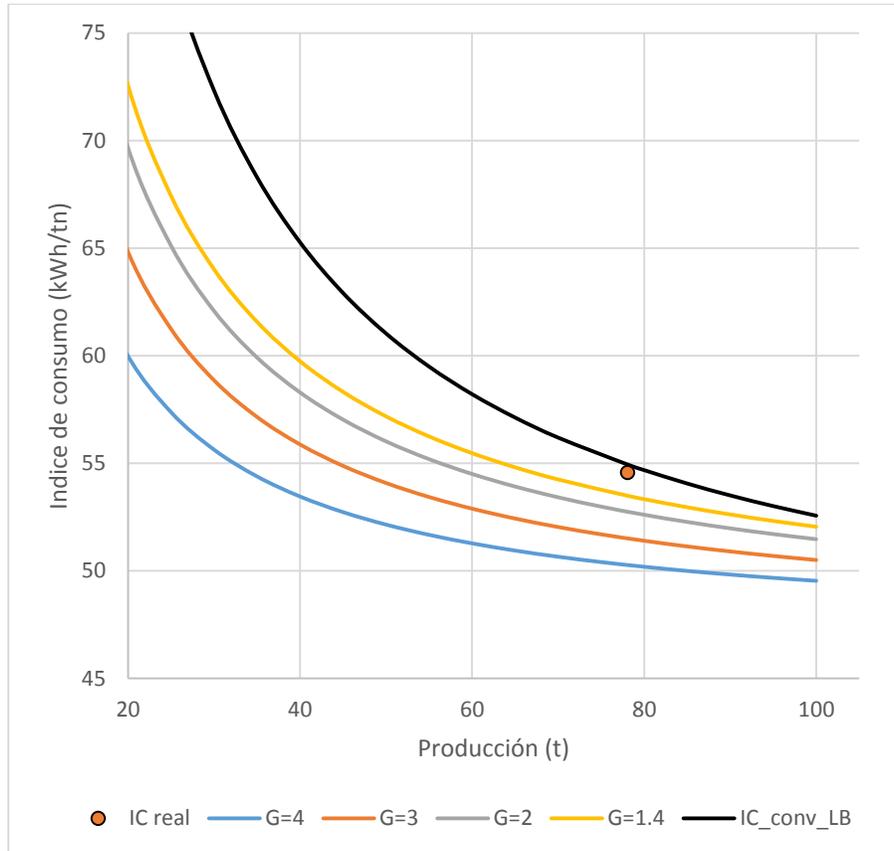


Figura 3.12. Línea B. Curvas de Índice de consumo para 5.3% de Agua y diferentes granulometrías por el modelo propuesto y curva de índice de consumo por el método convencional.

Se puede observar en la Figura.3.12 que el índice de consumo real está por debajo del valor teórico correspondiente (54,93 kWh/t) calculado por el método convencional que solo considera la producción como variable independiente. Este comportamiento se interpreta como un buen desempeño energético en este turno

de trabajo. Sin embargo, no se ha tenido en cuenta el efecto de la adición de agua al trigo de entrada ni la granulometría de la harina.

Si se considera el modelo que se propone y que tiene en cuenta estas variables operacionales (curva de color amarillo para granulometría igual a 1,4) el índice de consumo obtenido realmente no es bueno al estar por encima del teórico para estas condiciones que es de 53,49 kWh/t.

Este indicador de desempeño energético, aunque más complejo, porque involucra otras variables operacionales, permite valorar de manera más justa el comportamiento energético en el turno de trabajo.

3.6 Conclusiones parciales

1-En el nuevo modelo de consumo propuesto las variables con significación estadística son Producción, Agua y Granulometría.

2-Se aprecia que los coeficientes de las variables Producción y Agua producen el mismo efecto en el modelo mientras que la Granulometría produce el efecto contrario.

3-Los errores que se cometen en la predicción del consumo energético de las líneas de producción del molino 1 se ajustan a una distribución normal con un valor medio $\mu=-0,36$ y una desviación estándar $\sigma=6,02$.

4-El porcentaje de error absoluto medio (MAPE) para el modelo en el periodo analizado es del 4,78% lo que se considera adecuado para estas aplicaciones.

5-El índice de consumo (kWh/t) propuesto para las líneas de producción no solo depende de la cantidad de harina producida, sino que es función también de otras variables como la cantidad de agua añadida y la granulometría de la harina.

3-El índice de consumo de cada línea es de un orden similar al índice de consumo obtenido para todo el molino, pero se propone un nuevo indicador por turno que mejora la interpretación de los resultados al acercarlo más a la influencia de otras variables del proceso.

Conclusiones

Conclusiones

1-El consumo de cereales a nivel mundial ha tenido una tendencia creciente y por lo tanto el consumo energético de la industria molinera también es significativo, siendo necesario incrementar su eficiencia energética lo que debe hacerse de acuerdo con la práctica internacional implementando un SGE_n basado en la norma NC: ISO 50 001.

2-En la bibliografía consultada no se reportan estudios en empresas molineras de trigo y a nivel industrial que correlacionen variables operacionales con el consumo energético y que permitan tener modelos de consumo para predecir el comportamiento energético de la instalación o disponer de indicadores de desempeño energético más cercanos al proceso.

3-El análisis realizado para la UEB Cereales Cienfuegos demuestra que tanto para el molino 1 de esta empresa, como para cada una de sus líneas independientes, existe una correlación positiva fuerte entre el consumo energético diario y la producción de harina.

4-Con la aplicación de herramientas estadísticas para la gestión energética en esta empresa se obtuvo un modelo lineal que se considera como línea base para el molino 1. Este modelo no revela información acerca del uso de la energía en cada una de las líneas de producción individuales por lo que se proponen indicadores similares para cada línea independientemente. Estas curvas de índice de consumo en función de la producción muestran tendencia para valores productivos típicos de 53 kWh/t para el molino 1 y 51,6 kWh/t y 54,1 kWh/t para las Líneas A y B respectivamente.

5-Los modelos que tienen una base de tiempo diaria no permiten no permiten evaluar el desempeño energético de cada línea por turno por lo que se desarrollaron nuevos modelos de consumo para periodos de tiempo correspondientes a los turnos de trabajo y que incluyen otras variables operacionales estadísticamente significativas que son: Producción, Agua añadida al trigo que entra y Granulometría.

6-El efecto de los coeficientes de las variables Producción y Agua en el modelo de regresión lineal múltiple es similar, mientras que la Granulometría produce un efecto contrario. Esto se explica por el hecho de que un incremento de la granulometría significa menor trabajo de los bancos, ya sea de manera intencional o por problemas en el tamizado.

7-Del nuevo modelo de consumo propuesto para cada línea se deriva el indicador de desempeño energético que es el índice de consumo complejo, en función de la producción, del agua añadida y de la granulometría. Este indicador de desempeño energético, aunque más complejo, permite valorar de manera más justa el comportamiento energético a nivel de la línea de producción y en cada turno de trabajo lo que significa mayor efectividad en la gestión energética de la empresa.

Recomendaciones

Continuar la investigación para establecer modelos no lineales y comparar los resultados.

Aumentar la capacidad de almacenamiento del trigo después de adicionar el agua para incrementar el tiempo de reposo y estudiar la influencia de la humedad después del reposo sobre el consumo energético de los bancos de molinos.

Bibliografía

Bibliografía

Concereal. (2010). Recuperado el 23 de mayo de 2016, de http://www.concereal.es/optimizacion_molienda_sdmatic

Bitra, V. S., Womac, A. R., Chevanan, N., Miu, P. I., & Igathinathane, C. (2009). Direct mechanical energy measures of hammer mill comminution of switchgrass,. *Powder Technology*, 32–45.

Borroto Nordelo, A. E. (2006). *Gestión y Economía Energética*. Cienfuegos: (Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente). Universidad de Cienfuegos, Cuba.: Universidad de Cienfuegos. .

Campbell, G. M. (2007). Chapter 7. Roller Milling of Wheat. En *Handbook of PowderTechnology*, (págs. 391-428). Elsevier B.V.

CEEMA. (2015). Informe para la implementación de un sistema de gestión de la energía con base a la norma NC ISO 50001.

CORRALES, J. J. (2011). *Gestión energética de motores en la empresa harinera del*. Santiago de Cali.

Correa, J. S. (2011). *Mejora de la eficiencia energética en la empresa Cereales* . Cienfuegos.

Elisabeth, H. (2005). *Modulo de tecnologia de Cereales y Oleaginosas*. Colombia: Terranova.

Fang, Q., Haque, E., Spillman, C., Reddy, P., & Steele, J. L. (1998). Energy requirements for size reduction of wheat. *Transactions of the ASAE*, 1713-1720.

Giacone, E., & Mancò, S. (2012). Energy efficiency measurement in industrial processes. *Energy*, 38, 331-345.

Kilborn, R. H., Black, H. C., Dexter, J. E., & Martin, D. G. (1982). Energy consumption during flour milling: Description on measuring systems and the influences of wheat hardness on energy requirements. *Cereal Chemistry*, 284-288.

McKinney, L. J. (2007). *Grain processing: particle size reduction methods*. Kansas State University.

Muller, D. C., Marechal, F. M., Wolewinski, T., & Roux, P. J. (2007). An energy management method for the food industry. *Applied Thermal Engineering*, 2677-2686.

Organización Internacional de Normalización. (2011). ISO 50001. *Energy management systems. Requirements with guidance for use*.

Rudberg, M., Waldemarsson, M., & Lidestam, H. (2013). Strategic perspectives on energy management: A case study in the process industry. *Applied Energy*, 487-496.

Universidad Nacional Abierta y a Distancia. (2011). Recuperado el 23 de mayo de 2016, de UNAD Web Site:
[http://datateca.unad.edu.co/contenidos/332569/MODULO EXE/obtencin de harina de trigo.html](http://datateca.unad.edu.co/contenidos/332569/MODULO_EXE/obtencin%20de%20harina%20de%20trigo.html) 332569

Vega, A. T. (2004). *Guia para la elaboracion de Aceites Comestibles. Caracterización y procesamiento de nueces*. Bogotá. Colombia.

Anexos

Anexos

Anexo 1. USEn en las áreas

| AREA | USE | Función | Consumo mensual (kWh)/mes | Variable significativa | Parámetro de control |
|--------|--|---|---------------------------|-----------------------------|--|
| LIMPIA | Ventilador de baja presión. Motor 26.4 kW | Transporte de producto | 19008 | Consumo kW Presión (psi) | Tensión de correas Cambio y limpieza de mangas Temperatura de rodamiento Hermeticidad del sistema |
| | Cepillador a intensiva de trigo mod. PO 50/165 motor 18 kW | Limpieza del trigo | 10800 | Consumo kW | Revisión de la conexión del motor Limpieza del motor Tensado de correas Estado del tamiz |
| | Rociador intensivo mod.BI-MIX 30-55/180-15 motor 15 | Rociador de agua en el trigo, ablandamiento del grano | 5400 | Consumo kW Consumo Agua | Humedad del trigo revisión del conexionado del motor Limpieza del motor Revisión de paletas internas y tornillo sin fin |

| | | | | | |
|----------|--|---|----------|------------|---|
| | kW | | | | Ajustes de electroválvulas |
| | Elevador de cangilones mod. EAP 50/13 motorreductor 4.8 kW | Transporte del producto | 2880 | Consumo kW | Completamiento de cangilones Regulación de la carga del regulador |
| MOLIENDA | Molino de cilindros mod. SYNTHESIS 125x30-4M | Realizan la molienda o bien la reducción de la granulometría del grano y de los productos intermedios Los molinos disponen | 229824 | Consumo kW | Ajustes de cilindros Ajustes de correas |
| | Molino de cilindros mod. SYNTHESIS 130x30-4M | de diferentes tipos de esta máquina y a cada uno es atribuido un Determinado trabajo a base de los factores siguientes: | 242841.6 | Consumo kW | Estado del estriado de los cilindros monitoreo de la carga del motor |
| | Molino mod DAVM-Q | •Morfología de los cilindros (lisos o | 63360 | Consumo kW | |

| | | | | |
|---|---|---------|------------|--|
| motor 44 kW | ranurados) •Número inclinación y | | | |
| Milliflour MF-30 motor 36 kW | profundidad de las ranuras •Velocidad de rotación de los cilindros | 1087.2 | Consumo kW | Ajuste del flujo de materia prima Granulometría a la salida del equipo |
| Milliflour Gringer centrifugal mod.GSI- 37 motor 37 kW | Los bancos de cilindro se efectúan tres operaciones fundamentales: rotura raspado y reducción | 53280 | Consumo kW | Control del desgaste de los pines monitoreo de la carga del motor |
| Plansichter de libre oscilación mod. GQT/GS | El plansichter separa sémola, semita y harina a través del tamizado de los productos provenientes de los bancos de cilindros para clasificar los productos a los bancos de cilindros a base de la granulometría | 22464 | Consumo kW | Mantenimiento del motor Correas, tejidos Nivel de aceite Estado del rodamiento de contrapeso central |
| Terminado | Estas máquinas | 2867.04 | Consumo kW | Revisión de conexiones y |

| | | | | | |
|--|---|---|---------------|--|--|
| | <p>ras de salvado horizontal mod. GSO/5012 motor 13.2 kW</p> | <p>efectúan la tamizaduras de la harina aún adherente a las partes corticales del núcleo del grano .Esta harina tiene un aspecto graso. puntiagudo y oscuro .Este efecto se crea por medio de centrifugación del producto contra el manguito de chapa perforada con perforaciones adecuadas a diversos calibres de los subproductos</p> | | | <p>limpieza del motor Ajustes de correas Comprobación del estado del tamiz</p> |
| | <p>Sistema de transporte neumático por succión potencia instalada</p> | <p>Transporte del producto</p> | <p>138240</p> | <p>Consumo kW Temperatura del motor 0C</p> | <p>Limpieza del motor Reajuste de conexiones Ajuste de protecciones Tensado y sustitución de correas Limpieza de los alabes del ventilador</p> |

| | | | | | |
|----------------|--|-------------------------|-------|------------|---|
| | al ventilado 230 kW | | | | Limpieza de las mangas de los filtros Reparación de fugas de vacío del sistema |
| | Transporte neumático en presión motor 36 kW | | 21600 | Consumo kW | Revisión y ajuste de conexiones Tenado y ajustes de correas |
| EMPAQUE HARINA | Transporte neumático en presión (capacidad 40t/h) motor 90 kW. | Transporte del producto | 54000 | Consumo kW | Nivel de aceite en bombas Eliminación de salideros |
| | Ventilador de baja presión. Motor de 18 kW | | | Consumo kW | Limpieza del motor Limpieza de los alabes del ventilador |
| | Extractor para dos celdas de | | 5400 | Consumo kW | Limpieza del motor Control del estado de las cadenas y el nivel de |

| | | | | | |
|-----------------------------|---|----------------------------|------|-----------------------------|---|
| | tres roscas cónicas mod. GECt 250 motorredu ctor 7.5 KW | | | | aceite del reductor |
| Instalación aire comprimido | Línea neumática de transporte desechos molienda. Bomba 36 kW | Transporte del producto | 7920 | Consumo kW Presión (psi) | Control de parámetros del motor Estado de las correas Nivel de aceite de la bomba Nivel de aceite del compresor Limpieza de filtros de aceite |
| | Compresor es atlas copco motor 15 kW | | 7920 | Consumo kW Presión (psi) | Limpieza de los purificadores de aire Calidad de aire(Humedad, y presión) |

Anexo 2. Bancos de molienda. Líneas A y B del Molino 1.



Anexo 3. Datos de campo para la modelación del consumo de las líneas A y B.

| Observación | P | E | He | Har | Agua | Hdr | G |
|-------------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1 | 68.5 | 3768 | 11.9 | 16.2 | 4.3 | 12.5 | 1.39 |
| 2 | 35.8 | 1929 | 11.8 | 16.6 | 4.8 | 13.8 | 1.4 |
| 3 | 83.3 | 4118 | 12 | 17 | 5 | 13.8 | 1.86 |
| 4 | 66 | 3128 | 11.7 | 16.5 | 4.8 | 13.6 | 2.91 |
| 5 | 75.5 | 3964 | 12.4 | 16.6 | 4.2 | 12.8 | 2.1 |
| 6 | 78 | 4052 | 11.9 | 16.2 | 4.3 | 12.3 | 1.86 |
| 7 | 66.6 | 3108 | 12.1 | 15.6 | 3.5 | 13.6 | 1.73 |
| 8 | 81.1 | 4004 | 12.1 | 15.3 | 3.2 | 13.6 | 1.83 |
| 9 | 70.3 | 3454 | 12 | 15.1 | 3.1 | 13.4 | 1.24 |
| 10 | 78.1 | 3216 | 12 | 14.4 | 2.4 | 12 | 2.42 |

| | | | | | | | |
|----|------|------|------|------|------|------|------|
| 11 | 68.8 | 3712 | 11.9 | 13.1 | 1.2 | 12.4 | 2.8 |
| 12 | 80.6 | 3908 | 12 | 16.4 | 4.4 | 14.6 | 2.98 |
| 13 | 68.7 | 3372 | 12.1 | 15.1 | 3 | 13.9 | 2.86 |
| 14 | 50 | 2190 | 12.1 | 16.1 | 4 | 13.8 | 1.41 |
| 15 | 73.8 | 3732 | 12.6 | 15.3 | 2.7 | 13.8 | 0.45 |
| 16 | 75.4 | 4032 | 12.5 | 16.9 | 4.4 | 14.3 | 0.79 |
| 17 | 70.7 | 3356 | 12.4 | 15.6 | 3.2 | 14.1 | 0.96 |
| 18 | 82.7 | 4038 | 12.2 | 19.9 | 7.7 | 13.8 | 0.74 |
| 19 | 50 | 2648 | 12.2 | 15.2 | 3 | 13.9 | 0.98 |
| 20 | 80.8 | 3680 | 12.1 | 15.3 | 3.2 | 14.3 | 1.39 |
| 21 | 76.9 | 3836 | 12.8 | 18.2 | 5.4 | 13.4 | 0.72 |
| 22 | 61.9 | 3252 | 12.8 | 19.9 | 7.1 | 13.9 | 1.12 |
| 23 | 41.7 | 2382 | 12.8 | 15.3 | 2.5 | 13.4 | 0.71 |
| 24 | 63.4 | 3414 | 12.3 | 16.1 | 3.8 | 13.7 | 0.97 |
| 25 | 79.2 | 3612 | 12.2 | 24 | 11.8 | 13.4 | 1.84 |
| 26 | 27.6 | 1560 | 12.1 | 15.2 | 3.1 | 13.4 | 1.87 |
| 27 | 78.4 | 3980 | 11.7 | 18.4 | 6.7 | 12.8 | 1.2 |
| 28 | 75.5 | 3894 | 12 | 14.4 | 2.4 | 13.6 | 1.9 |
| 29 | 65.4 | 3708 | 11.6 | 17.2 | 5.6 | 13.6 | 1.9 |
| 30 | 76.3 | 4024 | 11.9 | 16.6 | 4.7 | 13.8 | 1.5 |
| 31 | 83.3 | 4090 | 11.8 | 17.6 | 5.8 | 13.6 | 1.8 |
| 32 | 70.1 | 3602 | 11.6 | 17.3 | 5.7 | 13.6 | 3 |
| 33 | 65.3 | 3724 | 11.9 | 15.3 | 3.4 | 13.6 | 0.6 |
| 34 | 77.7 | 4046 | 12 | 16.1 | 4.1 | 13.8 | 2.1 |
| 35 | 76.1 | 4008 | 12.6 | 16.9 | 4.3 | 13.8 | 1.6 |
| 36 | 82.6 | 4084 | 12.6 | 15.9 | 3.3 | 13.6 | 1.8 |
| 37 | 78.1 | 3920 | 12 | 15.3 | 3.3 | 13.8 | 1.85 |
| 38 | 79.6 | 4008 | 12 | 16 | 4 | 13.9 | 2.47 |
| 39 | 76.5 | 3830 | 12.1 | 15 | 2.9 | 13.5 | 2.46 |
| 40 | 74 | 3580 | 12 | 14.3 | 2.3 | 13.4 | 2.64 |
| 41 | 80 | 3854 | 11.8 | 16.8 | 5 | 13.4 | 2.5 |
| 42 | 76.8 | 3710 | 12 | 15.2 | 3.2 | 14.2 | 2.94 |
| 43 | 79.5 | 3834 | 12.1 | 15.8 | 3.7 | 13.8 | 2.23 |
| 44 | 75.1 | 3870 | 12.4 | 17.3 | 4.9 | 13.9 | 0.36 |
| 45 | 81.9 | 4018 | 12.2 | 15.3 | 3.1 | 13.8 | 0.41 |
| 46 | 60.8 | 3264 | 12.2 | 15.4 | 3.2 | 14 | 0.92 |
| 47 | 78.3 | 4024 | 12.4 | 16.5 | 4.1 | 13.8 | 0.83 |
| 48 | 79.2 | 3758 | 12.6 | 15 | 2.4 | 14.1 | 0.94 |

| | | | | | | | |
|----|------|------|------|------|-----|------|------|
| 49 | 78.8 | 3950 | 12.4 | 14.9 | 2.5 | 13.9 | 0.59 |
| 50 | 73.2 | 3690 | 12 | 15.8 | 3.8 | 13.6 | 1.41 |
| 51 | 79.1 | 3900 | 12 | 15.1 | 3.1 | 14.2 | 1.37 |
| 52 | 80.4 | 3992 | 12.7 | 16.8 | 4.1 | 13.8 | 0.81 |
| 53 | 74.7 | 3854 | 11.9 | 16.9 | 5 | 14 | 1.24 |
| 54 | 76.9 | 3910 | 12.7 | 15.2 | 2.5 | 13.4 | 0.99 |
| 55 | 75.5 | 3912 | 12.1 | 16.9 | 4.8 | 14 | 0.87 |
| 56 | 77.3 | 3952 | 12.1 | 20.6 | 8.5 | 13.5 | 1.76 |
| 57 | 73.8 | 3884 | 12 | 15.4 | 3.4 | 13.7 | 1.76 |
| 58 | 74.6 | 3936 | 11.9 | 16.8 | 4.9 | 13.9 | 1.23 |
| 59 | 76.5 | 3978 | 11.9 | 16.7 | 4.8 | 13.1 | 1.66 |
| 60 | 72.9 | 3582 | 11.9 | 15.3 | 3.4 | 13.4 | 1.59 |
| 61 | 71.1 | 3598 | 12.1 | 16.3 | 4.2 | 13.6 | 1.72 |
| 62 | 48.5 | 2940 | 12 | 14.9 | 2.9 | 13.6 | 2.35 |
| 63 | 65.8 | 3314 | 12.2 | 16.8 | 4.6 | 13.8 | 1.89 |
| 64 | 75.2 | 4044 | 12.1 | 15.3 | 3.2 | 13.6 | 1.59 |
| 65 | 77.1 | 3062 | 11.8 | 16.1 | 4.3 | 13.5 | 1.7 |
| 66 | 78.9 | 4118 | 12 | 15.6 | 3.6 | 13.6 | 1.4 |
| 67 | 74.8 | 3766 | 12 | 15 | 3 | 13.7 | 0.97 |
| 68 | 75.7 | 3962 | 12.9 | 15 | 2.1 | 13.5 | 1.87 |
| 69 | 46.7 | 2486 | 12.4 | 15.7 | 3.3 | 13.5 | 1.82 |
| 70 | 66.7 | 3105 | 12.1 | 15.8 | 3.7 | 13.8 | 3.38 |
| 71 | 79.6 | 3310 | 12.2 | 16.3 | 4.1 | 13.6 | 3.02 |
| 72 | 70.2 | 3405 | 12.2 | 15.2 | 3 | 13.7 | 3.28 |
| 73 | 70 | 3528 | 12 | 16.2 | 4.2 | 13.4 | 1.24 |
| 74 | 73.8 | 3944 | 12.2 | 15.9 | 3.7 | 13.2 | 1.21 |
| 75 | 75.2 | 3950 | 12.2 | 15.8 | 3.6 | 13.4 | 1.64 |
| 76 | 73 | 3650 | 12 | 15 | 3 | 13.4 | 1.74 |
| 77 | 75 | 3980 | 12.4 | 15.6 | 3.2 | 13.4 | 1.63 |
| 78 | 70.9 | 3598 | 12.2 | 15.5 | 3.3 | 13.2 | 2.08 |
| 79 | 69.8 | 3908 | 12.2 | 16.3 | 4.1 | 13.5 | 2.36 |
| 80 | 76.9 | 4070 | 12 | 16.8 | 4.8 | 13.9 | 2.96 |
| 81 | 75.3 | 4044 | 12 | 15.9 | 3.9 | 13.3 | 2.49 |
| 82 | 76.3 | 3984 | 12 | 15 | 3 | 13.5 | 2.95 |
| 83 | 81.0 | 4050 | 12 | 15.3 | 3.3 | 13.6 | 1.88 |
| 84 | 76 | 3876 | 12 | 16 | 4 | 13.1 | 1.53 |
| 85 | 70.1 | 3646 | 12.2 | 15.2 | 3 | 13.3 | 1.62 |
| 86 | 72.5 | 3234 | 12.3 | 15.1 | 2.8 | 13.4 | 1.46 |

| | | | | | | | |
|-----|------|------|------|------|-----|------|------|
| 87 | 70.7 | 3780 | 12 | 16.2 | 4.2 | 13.9 | 1.92 |
| 88 | 74.6 | 3754 | 12 | 14.2 | 2.2 | 13.4 | 2.22 |
| 89 | 73.1 | 3684 | 12.1 | 15.8 | 3.7 | 13.7 | 2.58 |
| 90 | 74.2 | 3984 | 12 | 16 | 4 | 13.5 | 1.78 |
| 91 | 75.7 | 4044 | 12 | 14.8 | 2.8 | 13 | 1.68 |
| 92 | 67.9 | 3772 | 11.9 | 16 | 4.1 | 13.1 | 1.63 |
| 93 | 76.1 | 4128 | 12 | 15.8 | 3.8 | 13.2 | 1.97 |
| 94 | 75.7 | 3812 | 11.8 | 15.1 | 3.3 | 13.4 | 1.55 |
| 95 | 74.7 | 3926 | 12.1 | 15.6 | 3.5 | 13.6 | 0.98 |
| 96 | 46.9 | 2160 | 12.2 | 19.1 | 6.9 | 13.6 | 1.92 |
| 97 | 68.8 | 3766 | 12.1 | 15.1 | 3 | 13.6 | 1.89 |
| 98 | 79.2 | 4120 | 11.8 | 16.2 | 4.4 | 13.5 | 3.59 |
| 99 | 76.6 | 4180 | 12.3 | 15.2 | 2.9 | 13.7 | 3.21 |
| 100 | 36.6 | 1780 | 12.1 | 15 | 2.9 | 13.5 | 2.96 |
| 101 | 69.2 | 3760 | 12.2 | 18.2 | 6 | 13.4 | 1.27 |
| 102 | 76.4 | 3736 | 12.1 | 15.1 | 3 | 13.4 | 1.34 |
| 103 | 73.2 | 3932 | 12.1 | 16.6 | 4.5 | 13.5 | 1.39 |
| 104 | 74.6 | 3942 | 12 | 16 | 4 | 13.4 | 1.56 |
| 105 | 74.6 | 3830 | 12.1 | 17.3 | 5.2 | 13.9 | 1.23 |
| 106 | 74.3 | 3968 | 12.2 | 15.9 | 3.7 | 13.6 | 1.93 |
| 107 | 77 | 4022 | 12 | 15.8 | 3.8 | 13.3 | 2.9 |
| 108 | 73.3 | 3812 | 12 | 15.3 | 3.3 | 13.5 | 2.33 |
| 109 | 75.2 | 4026 | 12.2 | 16.9 | 4.7 | 13.6 | 3.67 |
| 110 | 79.3 | 3998 | 12.2 | 16.3 | 4.1 | 13.5 | 2.61 |
| 111 | 78.1 | 3996 | 12.1 | 14.9 | 2.8 | 13.4 | 1.67 |
| 112 | 80.8 | 3992 | 12.6 | 16.1 | 3.5 | 13.8 | 1.94 |
| 113 | 76.2 | 3914 | 11.8 | 15.5 | 3.7 | 13.3 | 2.2 |
| 114 | 81.5 | 4066 | 12 | 15.1 | 3.1 | 13.6 | 2.81 |
| 115 | 73.4 | 3974 | 12 | 16.1 | 4.1 | 13.9 | 2.69 |
| 116 | 25.4 | 1572 | 12.1 | 15.4 | 3.3 | 13.8 | 2.02 |
| 117 | 72.6 | 4040 | 12.1 | 15.1 | 3 | 13.4 | 1.84 |
| 118 | 84.3 | 4294 | 12 | 15.8 | 3.8 | 13.5 | 1.5 |
| 119 | 81.2 | 4262 | 12.1 | 16 | 3.9 | 13.3 | 1.61 |
| 120 | 74.1 | 4104 | 12.2 | 15.8 | 3.6 | 13.8 | 1.9 |
| 121 | 51.1 | 3372 | 12.1 | 18 | 5.9 | 13.4 | 1.92 |
| 122 | 68.8 | 4124 | 12.2 | 17.6 | 5.4 | 14.3 | 2.4 |
| 123 | 75.7 | 4352 | 12.2 | 16.8 | 4.6 | 13.4 | 2.45 |
| 124 | 72.3 | 4396 | 12.2 | 15.6 | 3.4 | 13.4 | 1.04 |

| | | | | | | | |
|-----|------|------|-------|------|------|------|------|
| 125 | 73.8 | 4436 | 12.3 | 21.4 | 9.1 | 13.7 | 1.76 |
| 126 | 59.8 | 3456 | 12 | 20.2 | 8.2 | 13.8 | 1.91 |
| 127 | 62.2 | 3822 | 12.2 | 19.3 | 7.1 | 13.9 | 2.74 |
| 128 | 74.1 | 3840 | 11.8 | 15.4 | 3.6 | 13.2 | 1.92 |
| 129 | 75.1 | 3880 | 12.3 | 15.2 | 2.9 | 13.4 | 2.97 |
| 130 | 80.6 | 4228 | 12.2 | 16 | 3.8 | 13.6 | 2.56 |
| 131 | 64.9 | 3844 | 12.2 | 16.6 | 4.4 | 13.6 | 2 |
| 132 | 78.4 | 4174 | 12 | 15.3 | 3.3 | 13.4 | 1.95 |
| 133 | 68.2 | 3946 | 12 | 16.1 | 4.1 | 13.8 | 1.63 |
| 134 | 81.5 | 4256 | 12.2 | 15.6 | 3.4 | 13.4 | 1.25 |
| 135 | 79.5 | 4228 | 12.2 | 15.2 | 3 | 13.4 | 1.57 |
| 136 | 70.8 | 4126 | 12 | 15.5 | 3.5 | 13.7 | 1.86 |
| 137 | 84 | 4532 | 12.2 | 16.5 | 4.3 | 13.3 | 2.29 |
| 138 | 77.4 | 4396 | 12.1 | 17 | 4.9 | 14 | 2.23 |
| 139 | 50.3 | 3624 | 12.2 | 15.8 | 3.6 | 13.2 | 2.61 |
| 140 | 76.7 | 4368 | 12.2 | 16.2 | 4 | 13.2 | 2.63 |
| 141 | 55.9 | 3678 | 12.1 | 15.1 | 3 | 13.2 | 1.94 |
| 142 | 71.8 | 4360 | 12.3 | 15.8 | 3.5 | 13.4 | 1.7 |
| 143 | 70.8 | 4262 | 12.2 | 17.9 | 5.7 | 13.5 | 2.15 |
| 144 | 75.1 | 4340 | 12.1 | 16.8 | 4.7 | 13.8 | 1.99 |
| 145 | 50.3 | 2428 | 12.3 | 17.2 | 4.9 | 13.8 | 2.52 |
| 146 | 85 | 4630 | 11.9 | 14.4 | 2.5 | 12.9 | 1.1 |
| 147 | 76.8 | 4412 | 12.2 | 16.8 | 4.6 | 14.6 | 1.3 |
| 148 | 70.4 | 3910 | 11.7 | 15.5 | 3.8 | 14.2 | 1.1 |
| 149 | 67.7 | 3884 | 11.8 | 16.7 | 4.9 | 13.7 | 1.4 |
| 150 | 85.6 | 4536 | 12.1 | 16.2 | 4.1 | 13.1 | 1 |
| 151 | 85.9 | 4614 | 12 | 14 | 2 | 12.6 | 1.7 |
| 152 | 88.6 | 4708 | 11.9 | 15.1 | 3.2 | 13.6 | 1.16 |
| 153 | 40.3 | 2322 | 12 | 15.4 | 3.4 | 13.5 | 0.4 |
| 154 | 86.1 | 4670 | 12.2 | 16.8 | 4.6 | 13.8 | 0.45 |
| 155 | 87.2 | 3620 | 11.9 | 13.8 | 1.9 | 12.8 | 0.68 |
| 156 | 75.9 | 4544 | 11.9 | 14.2 | 2.3 | 13.6 | 0.6 |
| 157 | 75.2 | 4220 | 12.01 | 15.8 | 3.79 | 13.9 | 0.44 |
| 158 | 75.1 | 4152 | 12 | 14.6 | 2.6 | 13.4 | 0.38 |
| 159 | 82.8 | 4590 | 12.8 | 19.8 | 7 | 13.3 | 0.49 |
| 160 | 82.3 | 4552 | 12.6 | 15.8 | 3.2 | 13.9 | 0.59 |
| 161 | 87.7 | 4802 | 12.6 | 17 | 4.4 | 14.5 | 0.49 |
| 162 | 70.9 | 3544 | 12.6 | 15.6 | 3 | 13.7 | 0.91 |

| | | | | | | | |
|-----|------|------|------|------|-----|------|------|
| 163 | 73.3 | 3852 | 11.8 | 18.6 | 6.8 | 13.6 | 0.71 |
| 164 | 75.1 | 4364 | 12 | 16 | 4 | 14 | 0.59 |
| 165 | 84.7 | 4254 | 12 | 15.5 | 3.5 | 14.1 | 0.51 |
| 166 | 74 | 4214 | 12.5 | 18.7 | 6.2 | 13.5 | 0.64 |
| 167 | 68.9 | 3772 | 12.6 | 18.8 | 6.2 | 13.7 | 0.76 |
| 168 | 49.9 | 3280 | 12.8 | 16.1 | 3.3 | 13.4 | 0.62 |
| 169 | 69.8 | 4208 | 12.2 | 16.9 | 4.7 | 13.9 | 0.75 |
| 170 | 84.8 | 4588 | 12 | 18.6 | 6.6 | 13.2 | 0.49 |
| 171 | 61.5 | 3518 | 12 | 18.6 | 6.6 | 13.9 | 0.63 |
| 172 | 85.7 | 4374 | 11.8 | 18.5 | 6.7 | 13.2 | 0.56 |
| 173 | 74.1 | 4700 | 11.9 | 15.1 | 3.2 | 13.9 | 1 |
| 174 | 78.2 | 4372 | 12 | 16.6 | 4.6 | 14 | 1 |
| 175 | 83.4 | 4530 | 12.1 | 16.7 | 4.6 | 14.3 | 1.4 |
| 176 | 87 | 4646 | 11.9 | 17.2 | 5.3 | 14.4 | 1.1 |
| 177 | 78.1 | 4262 | 11.8 | 16.4 | 4.6 | 14.3 | 1.4 |
| 178 | 88.3 | 4706 | 11.9 | 15.8 | 3.9 | 13.6 | 1.4 |
| 179 | 89 | 4788 | 12.1 | 15.7 | 3.6 | 13.3 | 1 |
| 180 | 88 | 4764 | 12.2 | 17 | 4.8 | 13.6 | 1.5 |
| 181 | 88.4 | 4712 | 12.2 | 16 | 3.8 | 13.8 | 1.28 |
| 182 | 87 | 4644 | 12 | 15.4 | 3.4 | 13.7 | 0.32 |
| 183 | 78 | 4494 | 12 | 16.3 | 4.3 | 13.4 | 1.1 |
| 184 | 85.5 | 4446 | 12 | 15.2 | 3.2 | 13.3 | 0.71 |
| 185 | 81.9 | 4464 | 12.1 | 15.1 | 3 | 13.8 | 0.58 |
| 186 | 86.5 | 4758 | 12 | 13.8 | 1.8 | 13.8 | 0.6 |
| 187 | 78.8 | 4522 | 12 | 15.4 | 3.4 | 13.8 | 0.42 |
| 188 | 83.5 | 4684 | 12.1 | 15.8 | 3.7 | 13.6 | 0.49 |
| 189 | 73.5 | 4060 | 12.6 | 18.6 | 6 | 13.6 | 0.53 |
| 190 | 85.3 | 4720 | 12.6 | 16 | 3.4 | 14 | 0.56 |
| 191 | 83.3 | 4776 | 12.1 | 16.2 | 4.1 | 13.8 | 0.48 |
| 192 | 88.1 | 4824 | 12.2 | 16.7 | 4.5 | 13.8 | 0.65 |
| 193 | 85.8 | 4744 | 12.6 | 15.4 | 2.8 | 13.9 | 0.91 |
| 194 | 82.7 | 4612 | 11.9 | 15.1 | 3.2 | 13.6 | 0.63 |
| 195 | 77.9 | 4690 | 12 | 16.2 | 4.2 | 13.9 | 0.48 |
| 196 | 84.3 | 4672 | 12 | 15.2 | 3.2 | 14.1 | 0.53 |
| 197 | 83.4 | 4550 | 12.8 | 17.1 | 4.3 | 13.8 | 0.56 |
| 198 | 66.6 | 4120 | 12.2 | 16.4 | 4.2 | 13.9 | 0.51 |
| 199 | 86.7 | 4732 | 12.8 | 15.7 | 2.9 | 13.3 | 0.78 |
| 200 | 86.1 | 4680 | 12 | 16.8 | 4.8 | 13.8 | 0.69 |

| | | | | | | | |
|-----|------|------|------|------|-----|------|------|
| 201 | 86.8 | 4636 | 12.2 | 19.2 | 7 | 13.4 | 0.52 |
| 202 | 89.9 | 4742 | 12 | 18 | 6 | 13.9 | 0.65 |
| 203 | 87.1 | 4712 | 12.1 | 16.9 | 4.8 | 13.6 | 0.62 |
| 204 | 83.1 | 4584 | 11.8 | 15.1 | 3.3 | 13.2 | 0.46 |
| 205 | 88.9 | 4630 | 12.3 | 16 | 3.7 | 13.7 | 0.46 |
| 206 | 82.7 | 4136 | 12.3 | 17.2 | 4.9 | 13.8 | 0.61 |
| 207 | 60.4 | 3512 | 12 | 15.8 | 3.8 | 13.6 | 1.02 |
| 208 | 81.1 | 3710 | 12.6 | 19.7 | 7.1 | 13.7 | 0.97 |
| 209 | 80.8 | 4480 | 12 | 16.3 | 4.3 | 13.3 | 0.71 |
| 210 | 68.7 | 1148 | 12 | 16.8 | 4.8 | 13.2 | 0.8 |
| 211 | 82.4 | 4494 | 11.9 | 17.3 | 5.4 | 13.5 | 1.73 |
| 212 | 82.4 | 4204 | 12 | 15.6 | 3.6 | 13.9 | 0.78 |
| 213 | 42.4 | 2826 | 13.1 | 15.8 | 2.7 | 13.7 | 0.66 |
| 214 | 42 | 1108 | 12 | 15.4 | 3.4 | 13.3 | 1.09 |
| 215 | 81.4 | 3708 | 12.2 | 16.1 | 3.9 | 13.9 | 0.67 |
| 216 | 80.8 | 4460 | 12 | 16.8 | 4.8 | 13.5 | 0.7 |
| 217 | 85.8 | 4650 | 12 | 15.8 | 3.8 | 13.6 | 0.69 |
| 218 | 80.9 | 4392 | 12.2 | 15 | 2.8 | 13.8 | 0.89 |
| 219 | 78.8 | 4420 | 12.1 | 14.9 | 2.8 | 13 | 0.52 |
| 220 | 85.3 | 3644 | 12 | 15.1 | 3.1 | 13.2 | 0.67 |
| 221 | 84.6 | 3952 | 12 | 15.3 | 3.3 | 14.8 | 0.69 |
| 222 | 81.5 | 4524 | 12.4 | 15.1 | 2.7 | 13.3 | 0.6 |
| 223 | 85.3 | 4482 | 12.3 | 17.6 | 5.3 | 13.6 | 0.98 |
| 224 | 70.9 | 4142 | 12 | 16.5 | 4.5 | 13.8 | 0.82 |
| 225 | 71.3 | 4090 | 11.9 | 15.8 | 3.9 | 13.7 | 0.97 |
| 226 | 52.7 | 2974 | 11.9 | 17.1 | 5.2 | 13.4 | 0.68 |
| 227 | 80.7 | 4384 | 12 | 17.6 | 5.6 | 13.6 | 0.5 |
| 228 | 87.6 | 4668 | 12.2 | 16.6 | 4.4 | 13.9 | 0.56 |
| 229 | 85.7 | 4580 | 12.3 | 16 | 3.7 | 13.3 | 0.31 |
| 230 | 89.1 | 4618 | 12.2 | 15.8 | 3.6 | 13.6 | 0.49 |
| 231 | 80.7 | 3644 | 12.4 | 17.4 | 5 | 13.6 | 0.79 |
| 232 | 83.5 | 4612 | 12.5 | 18.5 | 6 | 13.9 | 1.15 |
| 233 | 85.9 | 4504 | 12 | 16.1 | 4.1 | 13.8 | 1.6 |
| 234 | 81.4 | 4498 | 11.9 | 16.1 | 4.2 | 13.9 | 0.83 |
| 235 | 78.2 | 4366 | 12.3 | 18.9 | 6.6 | 13.8 | 0.86 |
| 236 | 87.3 | 4578 | 12 | 15.4 | 3.4 | 13.4 | 0.69 |
| 237 | 65.5 | 4064 | 11.9 | 16.3 | 4.4 | 13.3 | 1.09 |
| 238 | 76.1 | 4276 | 12 | 16.6 | 4.6 | 13.6 | 1.69 |

| | | | | | | | |
|-----|------|------|------|------|-----|------|------|
| 239 | 82.4 | 3500 | 11.9 | 15.3 | 3.4 | 13.5 | 0.76 |
| 240 | 85.4 | 4538 | 12 | 16.1 | 4.1 | 13.9 | 0.82 |
| 241 | 73.5 | 3716 | 12 | 19.7 | 7.7 | 13.6 | 1.54 |
| 242 | 64.9 | 3276 | 12.1 | 15.8 | 3.7 | 13.9 | 1.87 |
| 243 | 81.2 | 4485 | 12.2 | 16.6 | 4.4 | 13.8 | 0.69 |
| 244 | 84.3 | 4722 | 12 | 15.8 | 3.8 | 13.6 | 0.67 |
| 245 | 81.3 | 4420 | 12.3 | 15.8 | 3.5 | 13.8 | 0.7 |
| 246 | 81.6 | 4032 | 12.3 | 17.9 | 5.6 | 13.3 | 0.8 |
| 247 | 85.4 | 4492 | 12.1 | 15 | 2.9 | 13.2 | 0.63 |
| 248 | 62.3 | 3784 | 12.1 | 15.9 | 3.8 | 13.2 | 0.65 |
| 249 | 84.4 | 4440 | 12 | 15.8 | 3.8 | 13.3 | 0.63 |
| 250 | 70 | 3956 | 12.3 | 17.1 | 4.8 | 13.1 | 0.84 |
| 251 | 72.4 | 4270 | 12.1 | 15.1 | 3 | 13.4 | 0.87 |
| 252 | 83.7 | 4562 | 12.2 | 16.2 | 4 | 13.8 | 0.74 |
| 253 | 59 | 3572 | 12 | 15.8 | 3.8 | 14.2 | 0.81 |
| 254 | 90 | 3186 | 12 | 15.6 | 3.6 | 13.9 | 1.01 |
| 255 | 73.7 | 4166 | 12 | 16.2 | 4.2 | 13.6 | 0.72 |
| 256 | 83.7 | 4506 | 12.3 | 16.6 | 4.3 | 13.6 | 0.46 |
| 257 | 86.5 | 4620 | 12.8 | 15.8 | 3 | 13.6 | 0.53 |
| 258 | 84 | 4578 | 12.2 | 15.2 | 3 | 13.6 | 0.33 |
| 259 | 85.1 | 4564 | 12.3 | 15.6 | 3.3 | 13.9 | 0.3 |
| 260 | 81.6 | 4338 | 11.9 | 15.3 | 3.4 | 13.6 | 0.9 |
| 261 | 27.9 | 1674 | 12 | 15.6 | 3.6 | 13.7 | 0.48 |
| 262 | 82.5 | 4360 | 12 | 15.6 | 3.6 | 13 | 0.59 |
| 263 | 69.5 | 4082 | 12.2 | 16 | 3.8 | 13.6 | 0.53 |
| 264 | 81.4 | 4494 | 12 | 18.6 | 6.6 | 12 | 0.68 |
| 265 | 80.2 | 1388 | 12.1 | 16.1 | 4 | 13.6 | 0.65 |
| 266 | 84.1 | 4516 | 12 | 20.8 | 8.8 | 13.6 | 0.69 |
| 267 | 67.3 | 3976 | 12.3 | 19.5 | 7.2 | 13.8 | 1.86 |
| 268 | 75.8 | 4148 | 12 | 18.1 | 6.1 | 13.8 | 1.16 |
| 269 | 76.3 | 4360 | 12.4 | 16.1 | 3.7 | 13.5 | 0.72 |
| 270 | 76.4 | 4106 | 12.5 | 20.3 | 7.8 | 13 | 0.63 |
| 271 | 57.3 | 3316 | 11.8 | 17.4 | 5.6 | 13.6 | 0.92 |
| 272 | 66.2 | 4074 | 11.9 | 18.4 | 6.5 | 13.6 | 0.92 |
| 273 | 84.2 | 4550 | 12 | 15.3 | 3.3 | 13.3 | 0.48 |
| 274 | 76.6 | 4350 | 12.3 | 15.8 | 3.5 | 14 | 0.45 |
| 275 | 83.9 | 4402 | 12 | 15.6 | 3.6 | 13.9 | 0.43 |
| 276 | 83.7 | 4408 | 12.4 | 15.9 | 3.5 | 13.3 | 0.51 |

| | | | | | | | |
|-----|------|------|------|------|-----|------|------|
| 277 | 82.2 | 4316 | 11.9 | 15.1 | 3.2 | 13.1 | 0.46 |
| 278 | 81.6 | 4390 | 12.1 | 15.7 | 3.6 | 13.8 | 0.47 |
| 279 | 79 | 3916 | 12.2 | 16.7 | 4.5 | 13.6 | 0.34 |
| 280 | 78.5 | 4358 | 12.2 | 15.9 | 3.7 | 13.4 | 0.69 |
| 281 | 84.3 | 4494 | 12 | 15.9 | 3.9 | 13.4 | 0.69 |
| 282 | 80.3 | 4408 | 12.4 | 18 | 5.6 | 13.8 | 0.66 |
| 283 | 79.2 | 4412 | 12 | 15.5 | 3.5 | 13.5 | 0.7 |
| 284 | 72.4 | 4140 | 12.6 | 15.6 | 3 | 13.7 | 0.83 |
| 285 | 76.9 | 4114 | 12.4 | 17 | 4.6 | 13.5 | 0.64 |
| 286 | 67.1 | 3826 | 12 | 16.1 | 4.1 | 13 | 0.59 |
| 287 | 73.3 | 3828 | 12.4 | 15.9 | 3.5 | 13.6 | 0.69 |
| 288 | 65.1 | 3922 | 12.2 | 19.2 | 7 | 13.8 | 0.56 |
| 289 | 82.7 | 4488 | 11.9 | 17.3 | 5.4 | 13.7 | 0.66 |
| 290 | 49.7 | 2898 | 12 | 16.8 | 4.8 | 13.6 | 0.87 |

Anexo 4. Resultados de la regresión lineal múltiple sin filtrar datos

Regresión Múltiple - E

Variable dependiente: E

Variabes independientes:

P

Agua

G

| | | Error | Estadístico | |
|-----------|------------|----------|-------------|---------|
| Parámetro | Estimación | Estándar | T | Valor-P |
| CONSTANTE | 563.578 | 183.471 | 3.07176 | 0.0023 |
| P | 45.6602 | 2.0598 | 22.1672 | 0.0000 |
| Agua | 18.998 | 16.4429 | 1.1554 | 0.2489 |
| G | -74.496 | 29.8502 | -2.49566 | 0.0131 |

Análisis de Varianza

| Fuente | Suma de Cuadrados | Gl | Cuadrado Medio | Razón-F | Valor-P |
|---------------|-------------------|-----|----------------|---------|---------|
| Modelo | 7.90167E7 | 3 | 2.63389E7 | 183.33 | 0.0000 |
| Residuo | 4.10894E7 | 286 | 143669. | | |
| Total (Corr.) | 1.20106E8 | 289 | | | |

R-cuadrada = 65.7891 por ciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 65.4302 por ciento

Error estándar del est. = 379.037

Error absoluto medio = 237.78

Estadístico Durbin-Watson = 1.76689 (P=0.0235)

Autocorrelación de residuos en retraso 1 = 0.116418

Anexo 5. Resultados de la regresión lineal múltiple eliminando datos con residuos atípicos

Regresión Múltiple - E

Variable dependiente: E

VARIABLES INDEPENDIENTES:

P

Agua

G

| | | <i>Error</i> | <i>Estadístico</i> | |
|------------------|-------------------|-----------------|--------------------|----------------|
| <i>Parámetro</i> | <i>Estimación</i> | <i>Estándar</i> | <i>T</i> | <i>Valor-P</i> |
| CONSTANTE | 526.652 | 117.497 | 4.48226 | 0.0000 |
| P | 46.923 | 1.30705 | 35.8998 | 0.0000 |
| Agua | 22.8948 | 10.8116 | 2.11761 | 0.0351 |
| G | -96.7038 | 18.7118 | -5.16806 | 0.0000 |

Análisis de Varianza

| <i>Fuente</i> | <i>Suma de Cuadrados</i> | <i>Gl</i> | <i>Cuadrado Medio</i> | <i>Razón-F</i> | <i>Valor-P</i> |
|---------------|--------------------------|-----------|-----------------------|----------------|----------------|
| Modelo | 7.8479E7 | 3 | 2.61597E7 | 489.05 | 0.0000 |
| Residuo | 1.44959E7 | 271 | 53490.4 | | |
| Total (Corr.) | 9.29749E7 | 274 | | | |

R-cuadrada = 84.4088 por ciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 84.2362 por ciento

Error estándar del est. = 231.28

Error absoluto medio = 180.296

Estadístico Durbin-Watson = 1.35636 (P=0.0000)

Autocorrelación de residuos en retraso 1 = 0.321676

Número de filas excluidas: 15

Anexo 6. Regresión lineal simple entre consumo y producción para un turno de 8 horas de la línea A

Regresión Simple - EA vs. PA

Variable dependiente: EA

Variable independiente: PA

Lineal: $Y = a + b \cdot X$

Coefficientes

| | <i>Mínimos Cuadrados</i> | <i>Estándar</i> | <i>Estadístico</i> | |
|--|--------------------------|-----------------|--------------------|--|
| | | | | |

| Parámetro | Estimado | Error | T | Valor-P |
|------------|----------|---------|---------|---------|
| Intercepto | 381.037 | 97.0367 | 3.92673 | 0.0001 |
| Pendiente | 46.4824 | 1.32586 | 35.0583 | 0.0000 |

Análisis de Varianza

| Fuente | Suma de Cuadrados | Gl | Cuadrado Medio | Razón-F | Valor-P |
|---------------|-------------------|-----|----------------|---------|---------|
| Modelo | 2.9051E7 | 1 | 2.9051E7 | 1229.08 | 0.0000 |
| Residuo | 2.76545E6 | 117 | 23636.3 | | |
| Total (Corr.) | 3.18165E7 | 118 | | | |

Coefficiente de Correlación = 0.955553

R-cuadrada = 91.3081 por ciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 91.2338 por ciento

Error estándar del est. = 153.741

Error absoluto medio = 126.264

Estadístico Durbin-Watson = 1.67744 (P=0.0392)

Autocorrelación de residuos en retraso 1 = 0.138514

Número de filas excluidas: 26

Anexo 7. Regresión lineal simple entre consumo y producción para un turno de 8 horas de la línea B

Regresión Simple - EB vs. PB

Variable dependiente: EB

Variable independiente: PB

Lineal: $Y = a + b \cdot X$

Coefficientes

| | Mínimos Cuadrados | Estándar | Estadístico | |
|------------|-------------------|----------|-------------|---------|
| Parámetro | Estimado | Error | T | Valor-P |
| Intercepto | 846.595 | 106.262 | 7.96705 | 0.0000 |
| Pendiente | 44.0971 | 1.35009 | 32.6623 | 0.0000 |

Análisis de Varianza

| Fuente | Suma de Cuadrados | Gl | Cuadrado Medio | Razón-F | Valor-P |
|---------------|-------------------|-----|----------------|---------|---------|
| Modelo | 2.84825E7 | 1 | 2.84825E7 | 1066.82 | 0.0000 |
| Residuo | 3.49749E6 | 131 | 26698.4 | | |
| Total (Corr.) | 3.198E7 | 132 | | | |

Coefficiente de Correlación = 0.943735

R-cuadrada = 89.0635 por ciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 88.98 por ciento

Error estándar del est. = 163.397

Error absoluto medio = 120.853

Estadístico Durbin-Watson = 1.81608 (P=0.1453)

Autocorrelación de residuos en retraso 1 = 0.088972

Número de filas excluidas: 12

Anexo 8. Imagen del banco de molienda B1.



El **B1** es el primero banco por donde pasa el trigo una vez que sale de su tiempo de reposo.

Anexo 9. Imagen del instrumento implementado para la adición de agua al trigo que se quiere acondicionar.



Anexo 10. Imagen del instrumento implementado para medir la humedad del



trigo.

Anexo 11. Imagen del instrumento que se utiliza para retirarle al trigo todo tipo de partículas extraña.



Anexo 12. Imagen del instrumento utilizado para cernir la harina durante el proceso, Planschister.

