



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

**“IMPLEMENTACIÓN DE EFICIENCIA ENERGÉTICA EN
EMPRESA CEMENTERA BAJO NORMA ISO 50001”**

INFORME DE MATERIA INTEGRADORA

Previo a la obtención del Título de:

INGENIERO/A EN ELECTRICIDAD

ITÚRBURU VILLACRESES OLGA SORAYDA

ORTÍZ PAZMIÑO ANDRÉS EDUARDO

GUAYAQUIL – ECUADOR

AÑO: 2018

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mis padres por darme el apoyo, la sabiduría y la oportunidad de culminar mi carrera.

A mi familia, por ser el pilar fundamental de mi vida y por haberme forjado como la persona que soy en la actualidad.

A mis formadores, por transmitirme sus conocimientos para alcanzar mis metas.

A mis amigos, que estuvieron en los buenos y malos momentos.

Olga Sorayda Itúrburu Villacreses

Agradezco a mi madre, por su sacrificio desmedido e incondicional en la ardua tarea de mi crianza.

A mi padre, por su apoyo y sus incansables intentos de acercarse a mí.

De forma general, agradezco a mi familia, amistades y compañeros por su comprensión y amor en este camino lleno de incertidumbres y alegrías llamado “Vida” y en particular, en este pasaje llamado “Universidad”.

Y al final, pero no menos importante, agradezco a Dios por poner en mi camino a todas las personas quienes pensé al escribir este agradecimiento, sin ellos, nada de esto habría sido posible.

Andrés Eduardo Ortíz Pazmiño

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a Dios, por permitirme haber llegado hasta este momento tan importante de formación profesional. A mis padres, Arq. Leonor Villacreses Santana y Arq. Edison Itúrburu Salvador quienes con su apoyo incondicional me supieron forjar para un camino de sabiduría y éxitos. A mis hermanos, por su compañía en los momentos más difíciles. A mis amigos, por las horas de estudios dedicadas y por los momentos vividos en el colegio y en la universidad.

Olga Sorayda Itúrburu Villacreses

Dedico este trabajo a mi amada madre, Sra. Dora Pazmiño Mera, quien ha puesto toda su fe y esfuerzos en mí. Espero con ansias el día en que pueda sentir que he honrado con mis acciones todos los sacrificios y el amor que me sigues dando a pesar de mis desaciertos.

Andrés Eduardo Ortíz Pazmiño

TRIBUNAL DE EVALUACIÓN

.....
MSc. Iván Endara Vélez

TUTOR DE PROYECTO INTEGRADOR

.....
Dr. Javier Urquiza Calderón

CO-EVALUADOR DE PROYECTO INTEGRADOR

DECLARACIÓN EXPRESA

"La responsabilidad y la autoría del contenido de este Trabajo de Titulación, nos corresponde exclusivamente; y damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"

.....
Itúrburu Villacreses Olga Sorayda

.....
Ortíz Pazmiño Andrés Eduardo

RESUMEN

Se realiza el presente proyecto en una gran industria de Ecuador que tiene por objetivo la producción de cemento, ya que esta clase de industrias representan entre los mayores consumidores de energía eléctrica.

La eficiencia energética en una empresa cementera se basa en una reducción de pérdidas energéticas, que han sido adoptadas de una manera creciente en muchas industrias, generalmente como una política en búsqueda de una consciencia de ahorro energético, atendiendo a objetivos económicos, de seguridad energética y calidad ambiental.

En el presente documento se presenta el análisis de medidas de eficiencia energética para una industria cementera, las cuales conllevan en realizar ahorro energético, disminuir las pérdidas en motores de equipos principales que tienen el mayor consumo de energía, elaborar una plataforma para ahorro por tarifas eléctricas y análisis de recuperación de calor en un horno para generar energía.

El ahorro energético consiste en la utilización de herramientas estadísticas para el seguimiento de los procesos de producción con respecto a eficiencia energética. A partir de ello se encuentran las pérdidas y se asocia el potencial para reducción del consumo energético; este análisis se realiza con el fin de encontrar las posibles oportunidades de ahorro energético.

El análisis se realizará en cuatro motores de la empresa y consiste en una metodología de variables de estado para encontrar donde se encuentran las pérdidas en dichos motores. Se diagnosticaron los principales motores de la industria, por ser los mayores consumidores de energía; para poder encontrar las pérdidas eléctricas y mecánicas internas de los motores.

Con la información recolectada de la empresa cementera se pudo realizar un programa en la plataforma Matlab para realizar una optimización de la producción y del consumo energético, basados en el pliego tarifario de la empresa eléctrica para industrias. El programa indicará los horarios en que los equipos estarán

funcionando y la producción final que se tendrá; se realiza este programa con el fin de ahorrar los costos de consumo de energía eléctrica por un uso eficiente de los equipos principales de la planta para la producción de cemento.

Finalmente, se realizó un análisis térmico en el horno que causa mayores pérdidas de energía en la empresa para considerar la recuperación del calor residual para ahorrar energía y evitar que dichos gases salgan al ambiente, se toma la energía que producen y así optimizar el proceso.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTO	ii
DEDICATORIA	iii
TRIBUNAL DE EVALUACIÓN	iv
DECLARACIÓN EXPRESA	v
RESUMEN.....	vi
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Justificativo.....	1
1.2. Objetivos	3
1.2.1. Objetivo General.....	3
1.2.2. Objetivo Específico	3
1.3. Alcance	4
1.4. Eficiencia Energética (EE)	5
1.5. Sistema de Gestión Energética (SGE).....	5
1.6. Motores Eléctricos	8
1.7. Métodos Determinísticos	11
1.8. Tarifas Eléctricas	12
1.8.1. Consumidor Industrial.....	12
CAPITULO 2.....	14
2. METODOLOGÍA	14
2.1. Diseño de Gestión Energética en Base a la Norma ISO 50001:2012	14
2.1.1. Estructura de la Norma NTE INEN – ISO 5001:2012.....	15
2.1.2. Resultado del análisis inicial de diagnóstico	16
2.1.3. Revisión Energética.....	18

2.1.4. Línea de base energética	26
2.1.5. Indicadores de desempeño eléctrico (IDEn)	30
2.2. Metodología reducción de consumo energético en base al pliego tarifario ..	34
2.2.1. Cálculo del consumo de energía eléctrica.....	35
2.2.2. Programa para el cálculo del menor consumo de energía eléctrica .	38
2.3. Análisis de motores mediante variables de estado	40
2.3.1. Metodología aplicada en el estudio propuesto	40
2.3.2. Aplicación de la metodología para variables de estados.....	42
2.4. Metodología para recuperación de energía en un horno rotatorio.....	44
2.4.1. Auditoría de energía y recuperación de calor en hornos	45
2.4.2. Recuperación de calor en el sistema de horno	49
CAPITULO 3.....	49
3. RESULTADOS.....	49
3.1. Oportunidades de mejora para ahorro energético.....	49
3.2. Metodología de optimización de energía eléctrica en base al pliego tarifario	55
3.3. Metodología de variables de estado para pérdidas en motores	58
3.4. Análisis del uso de calor residual recuperar para generar energía	69
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	74
BIBLIOGRAFÍA.....	77
ANEXO # 1	79
ANEXO # 2.....	81
ANEXO # 3.....	82
ANEXO # 4.....	84
ANEXO # 5.....	101
ANEXO # 6.....	108

ANEXO # 7	110
ANEXO # 8	112

TABLA DE ABREVIATURA

E.E: Eficiencia Energética

SGE: Sistemas de Gestión de la Energía

USD: Dólares americanos

USE: Usos significativos de la energía

UCE: Usos de consumo de energía

IDEn: Indicadores de desempeño eléctrica

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Requisitos del SGEN [11]	16
Tabla 2. Consumo de Electricidad – Periodo 2016-2017	19
Tabla 3. Descripción de Equipo principal de la planta.....	21
Tabla 4. Consumo mensual de energía eléctrica por áreas.	23
Tabla 5. Datos de placa de motores	26
Tabla 6. IDEn de la empresa	30
Tabla 7. Calculo de índices de consumo energético en planta – Año 2016.....	32
Tabla 8. Calculo de índices de consumo energético en planta – Año 2017.....	32
Tabla 9. Porcentaje de cumplimiento de metas en las áreas de producción	33
Tabla 10. Líneas de producción posibles.....	35
Tabla 11. Cargos tarifarios para industrias de CNEL Guayaquil Enero – Diciembre 2018.	36
Tabla 12. Modelo de ingreso para utilización del programa.	38
Tabla 13. Resultados del programa para producir 4000 toneladas.	39
Tabla 14. Presentación de datos mínimos, máximos, promedio y moda sobre valores en Vector de Velocidad de Rotor.....	43
Tabla 15. Balance energético de los calores de entrada en el horno	47
Tabla 16. Balance energético de los calores de salida en el horno.....	47
Tabla 17. Datos condensados del cálculo del ahorro energético	50
Tabla 18. Plan de acción #1 para la industria.	51
Tabla 19. Plan de acción #2 para la industria.	52
Tabla 20. Plan de acción #3 para la industria.	52
Tabla 21. Factor de carga para motores principales	53

Tabla 22. Ahorro de consumo de energía eléctrica para producción de 9,000 toneladas de cemento.	57
Tabla 23. Valores de Potencia consumida, aplicada y pérdidas en motores	58
Tabla 24. Comparativa de Velocidades, Potencia como eje, motor 564-AP1	61
Tabla 25. Comparativa de Amperaje, Potencia como eje, motor 564-AP1	62
Tabla 26. Comparativa de Velocidades, Potencia como eje, motor 564-VE1.....	64
Tabla 27. Comparativa de Velocidades, Potencia como eje, motor 473-VT1.....	65
Tabla 28. Comparativa de Amperaje, Potencia como eje, motor 473-VT1.....	66
Tabla 29. Comparativa de Velocidad, Potencia como eje, motor 463-AP1.....	67
Tabla 30. Comparativa de Amperaje, Potencia como eje, motor 463-AP1.....	69
Tabla 31. Cálculo de los costos de la energía eléctrica durante un día para distintos niveles de consumo.	83
Tabla 32. Ahorro de consumo de energía eléctrica para producción de 4,000 toneladas y Eq32 fuera de servicio.	109
Tabla 33. Ahorro de consumo de energía eléctrica para producción de 5,000 toneladas y Eq22 fuera de servicio	111
Tabla 34. Parámetros Eléctricos del Motor 564-AP1.....	112
Tabla 35. Parámetros Eléctricos del Motor 564-VE1.....	112
Tabla 36. Parámetros Eléctricos del Motor 473-VT1.....	113
Tabla 37. Parámetros Eléctricos del Motor 463-AP1.....	113
Tabla 38. Comparativa de Velocidades, Potencia como eje, motor 564-VE1.....	116
Tabla 39. Comparativa de Velocidades, Potencia como eje, motor 473-VT1.....	117
Tabla 40. Comparativa de Corrientes, Potencia como eje, motor 473-VT1.....	118
Tabla 41. Comparativa de Velocidades, Potencia como eje, motor 463-AP1.....	119
Tabla 42. Comparativa de Corrientes, Potencia como eje, motor 463-AP1.....	120

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Proceso de producción de cemento.....	2
Figura 1.2 Sistema de gestión de energía. Circulo de Deming [4].....	6
Figura 1.3 Enfoque del ciclo PHVA. [4].....	7
Figura 2.1 Cumplimiento de la empresa en general.....	17
Figura 2.2 Diagrama de Kiviat del análisis inicial de diagnóstico.....	17
Figura 2.3 Datos de control del consumo de electricidad.....	19
Figura 2.4 Comparación del aumento de energía y producción.....	20
Figura 2.5 Diagrama de Pareto de los consumos de energía de las áreas de producción.....	22
Figura 2.6 Diagrama de Pareto de los consumos mensuales de energía eléctrica de los motores de las áreas.....	24
Figura 2.7 Porcentaje de consumo eléctrico [kWh] de los equipos de USE.....	24
Figura 2.8 Consumo eléctrico vs. Producción.....	28
Figura 2.9 Línea base y línea meta en Planta.....	29
Figura 2.10 Indicador de consumo eléctrico de producción en Planta.....	32
Figura 2.11 Porcentaje de cumplimiento de metas en la Planta.....	34
Figura 2.12 Diagrama del proceso en la industria.....	34
Figura 2.13 Precios horarios de la energía eléctrica de lunes a viernes.....	37
Figura 2.14 Costos de tarifas eléctricas a partir del consumo de energía eléctrica realizado en cada hora de un día.....	37
Figura 2.15 Registro Histórico de Velocidades en Rotor.....	43
Figura 2.16 Bloque de Variables, Variaciones de Torque, Variaciones de Velocidad.....	44

Figura 2.17 Calores residuales del sistema del horno rotatorio.....	45
Figura 2.18 Diagrama Sankey - Balance de energía.....	48
Figura 3.1 Curva de producción vs. Tiempo para 9000 toneladas de producción. ..	55
Figura 3.2 Curvas de producción vs. Tiempo de las líneas L1 - L3	56
Figura 3.3 Curva de producción vs. Tiempo de operatividad de equipo C3.....	57
Figura 3.4 Respuesta de Potencia Consumida, incremento de Torque de Carga, motor 564-AP1	60
Figura 3.5 Superficies de un horno rotatorio	71
Figura 0. 1 Documentación a desarrollar. Fuente: Norma ISO 50001:2012	79
Figura 0. 2 Diagrama del proceso de planificación energética. Fuente. Norma NTE INEN- ISO50001.....	80
Figura 0. 3 Precios horarios de la energía eléctrica de lunes a viernes.....	81
Figura 0. 4 Línea base de Molienda de Crudo 1	84
Figura 0. 5 Línea base y línea meta en Molienda de Crudo 1	85
Figura 0. 6 Línea base de Molienda de Crudo 3	86
Figura 0. 7 Línea base y línea meta en Molienda de Crudo 3	87
Figura 0. 8 Línea base de Horno 1	88
Figura 0. 9 Línea base y línea meta en Horno 1	89
Figura 0. 10 Línea base de Horno 2	90
Figura 0. 11 Línea base y línea meta en Horno 2	91
Figura 0. 12 Línea base de Horno 3	92
Figura 0. 13 Línea base y línea meta en Horno 3	92
Figura 0. 14 Línea base de Molienda de Cemento 1.....	93
Figura 0. 15 Línea base y línea meta en Molienda de Cemento 1	94
Figura 0. 16 Línea base de Molienda de Cemento 2.....	95

Figura 0. 17 Línea base y línea meta en Molienda de Cemento 2	96
Figura 0. 18 Línea base de Molienda de Cemento 4.....	97
Figura 0. 19 Línea base y línea meta en Molienda de Cemento 4	98
Figura 0. 20 Línea base y línea meta en Prensa.....	99
Figura 0. 21 Línea base y línea meta en Prensa.....	100
Figura 0. 22 Curvas de producción vs. Tiempo de las líneas L1 - L3 producción de 9,000 toneladas de cemento sin equipos fuera de servicio	101
Figura 0. 23 Curvas de producción vs. Tiempo de las líneas L1 – L2 producción de 9,000 toneladas de cemento sin equipos fuera de servicio	102
Figura 0. 24 Curvas de producción vs. Tiempo de las líneas L1 – L2 producción de 9,000 toneladas de cemento sin equipos fuera de servicio	102
Figura 0. 25 Curva de producción vs. Tiempo de operatividad de equipo Eq11 producción de 9,000 toneladas de cemento sin equipos fuera de servicio	103
Figura 0. 26 Curva de producción vs. Tiempo de operatividad de equipo Eq21 producción de 9,000 toneladas de cemento sin equipos fuera de servicio	104
Figura 0. 27 Curva de producción vs. Tiempo de operatividad de equipo Eq22 producción de 9,000 toneladas de cemento sin equipos fuera de servicio	104
Figura 0. 28 Curva de producción vs. Tiempo de operatividad de equipo Eq23 producción de 9,000 toneladas de cemento sin equipos fuera de servicio	105
Figura 0. 29 Curva de producción vs. Tiempo de operatividad de equipo Eq31 producción de 9,000 toneladas de cemento sin equipos fuera de servicio	105
Figura 0. 30 Curva de producción vs. Tiempo de operatividad de equipo Eq32 producción de 9,000 toneladas de cemento sin equipos fuera de servicio	106
Figura 0. 31 Curva de producción vs. Tiempo de operatividad de equipo Eq33 producción de 9,000 toneladas de cemento sin equipos fuera de servicio	106
Figura 0. 32 Curva de producción vs. Tiempo de operatividad de equipo Eq00 producción de 9,000 toneladas de cemento sin equipos fuera de servicio	107

Figura 0. 33 Curvas de producción vs. Tiempo de las líneas L1 – L2 producción de 4,000 toneladas de cemento y Eq32 fuera de servicio.....	108
Figura 0. 34 Curvas de producción vs. Tiempo de operatividad de los equipos para el caso 4,000 toneladas y Eq32 fuera de servicio.	109
Figura 0. 35 Curvas de producción vs. Tiempo de las líneas L1 – L4 producción de 5,000 toneladas de cemento y Eq22 fuera de servicio.....	110
Figura 0. 36 Curvas de producción vs. Tiempo de operatividad de los equipos para el caso 5000 toneladas y Eq22 fuera de servicio	111

CAPITULO 1

1. INTRODUCCIÓN

Este capítulo trata sobre conceptos básicos de ingeniería eléctrica para poder tener un mejor entendimiento del proyecto que se realiza, consta de las siguientes subsecciones. La sección 1.1 trata sobre la problemática a solucionar, donde se justifica la elaboración del presente proyecto. La sección 1.2 trata sobre los objetivos a donde llegará el proyecto. La sección 1.3 trata sobre el alcance del proyecto donde se mencionan las metodologías a utilizar. La sección 1.4 trata sobre la eficiencia energética. La sección 1.5 trata sobre Sistemas de Gestión de la Energía indicando las etapas donde consta, el enfoque del ciclo PHVA. La sección 1.6 trata sobre motores eléctricos con sus conceptos respectivos, incluye eficiencia en motores eléctricos, pérdidas y factor de carga. La sección 1.7 trata sobre los métodos estadísticos utilizados en el proyecto como son regresión lineal y diagrama de Pareto. La sección 1.8 trata sobre las tarifas eléctricas donde indica el consumo para las industrias, los pliegos tarifarios y el factor de corrección para las industrias.

1.1. Justificativo

Con un aporte de 1800 millones de toneladas al año, el cemento se ha destacado como el material que más se produce a nivel global y es innegable su participación e importancia en el desarrollo de los países debido a las obras civiles e infraestructura.

Esta industria no es ajena a nuestro país. Según la revista Lideres Ecuador [14] el gran consumo de cemento está asociado a tres factores específicos: el crecimiento del sector de construcción, el cual se vio incentivado por el aumento sostenido de la economía local, la inversión pública en obras de infraestructura y la facilidad de acceder a créditos de vivienda, todos estos elementos se desarrollaron entre los años 2007 y 2012.

Existían 4 protagonistas en lo que a producción de cemento respecta y en grados de participación encabezaba Holcim Ecuador (62%), seguido por

Lafarge Cementos (23%), en tercer lugar, se encontraba Cementos Guapán (8%) y finalmente Cemento Chimborazo (7%). Estos datos permanecieron sin variaciones significativas durante algunos años hasta que los dos primeros productores a nivel nacional hicieron noticia la fusión de ambas compañías.

Independiente de quien se hable, estos actores del mercado cementero presentan anualmente ganancias que se contabilizan en decenas (en otros casos centenas) de millones de dólares, y una porción significativa de sus acciones económicas se centran en buscar maneras de disminuir sus costos y mantener su hegemonía en el mercado.

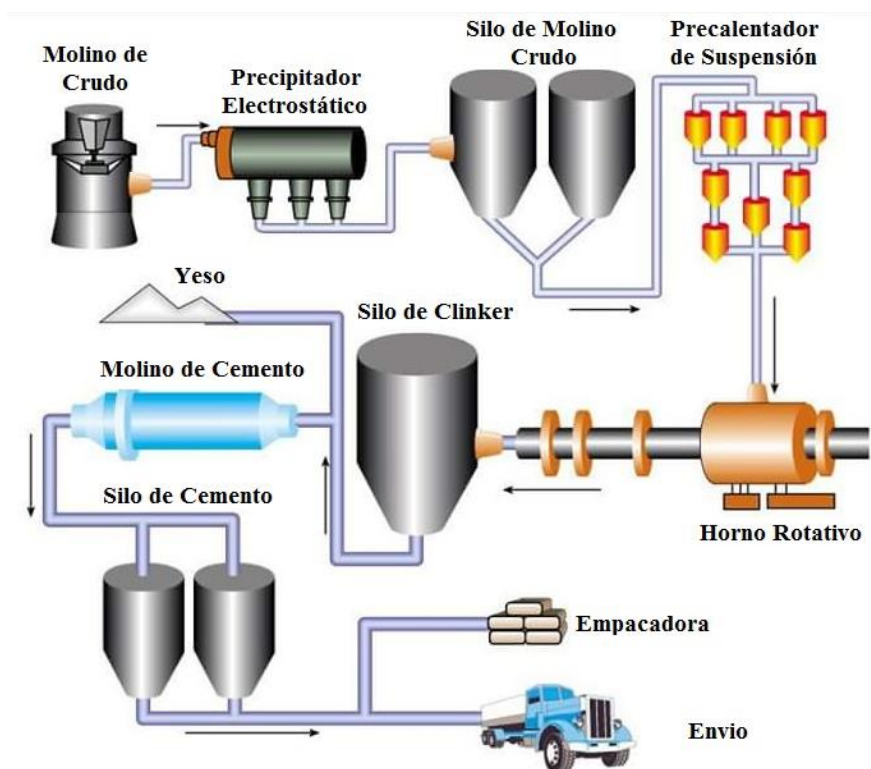


Figura 1.1 Proceso de producción de cemento

La Figura 1.1 muestra un diagrama de flujo esquemático del proceso de producción de cemento. Generalmente se agrupa en seis subprocesos principales, preparación de materias primas (trituración, apilamiento y recuperación de materias primas), procesamiento de harina cruda (molino

de materias primas, secado, molienda y homogeneización), clinkerización, molienda y almacenamiento de cemento, y embalaje [14].

El presente trabajo está enfocado en estudiar varios de los aspectos que conforman una de las industrias previamente mencionadas; diagnosticar problemáticas asociadas al consumo energético mediante el uso de herramientas estadísticas, informáticas y criterios de ingeniería, y finalmente, hallar soluciones que posibiliten el ahorro energético y el uso óptimo de los recursos que posee la empresa para amplificar su ganancia neta.

1.2. Objetivos

Los objetivos generales y específicos del proyecto realizado se presentan detallados a continuación.

1.2.1. Objetivo General

Generar un método de eficiencia energética del área de producción de una industria cementera mediante el uso de la norma ISO 50001 (SGE) para obtener un ahorro en consumo de energía eléctrica y térmica.

1.2.2. Objetivo Específico

- Definir una relación entre el material producido y la energía consumida por etapa dentro de la industria cementera.
- Determinar las variables por las cuales se generan pérdidas de energía en los motores para los distintos procesos de producción con potencial de mejora.
- Generar una disminución del consumo energético, teniendo en cuenta el pliego tarifario asociado a industrias.
- Elaboración de un programa basado en los requisitos de producción para controlar el consumo económico y así optimizar el proceso.

1.3. Alcance

Este proyecto está enfocado en la búsqueda de mejoras en el desempeño energético, incluyendo la eficiencia, uso y consumo de la energía para los procesos de producción de una industria cementera. El análisis se realizará en las áreas de producción de la empresa, siendo éstas parte significativa de la carga eléctrica dentro de la industria.

Se investigará, por tanto, las respectivas pérdidas de energía asociada al consumo eléctrico en cada área del proceso de producción. Teniendo como datos históricos la producción en cada proceso (facilitados por la industria), desde el ingreso de la materia prima hasta el almacenamiento del cemento y el consumo eléctrico asociado se plantea ejecutar una regresión lineal para generar una relación entre ambas variables. Posteriormente, se procederá a crear una segunda ecuación, tomando únicamente la relación de consumo vs producción debajo de la línea base energética.

Se planteará también implementar un modelo de Carga Mecánica-Potencia Consumida con los respectivos datos de cada motor representativo de media tensión, con el propósito de analizar la dinámica de trabajo de los mismos en una simulación y generar un estimador de la potencia consumida individual.

Estas dos metodologías explicadas se aplicarán en cada uno de los procesos que engloba el ciclo de producción, para tener un análisis individual que facilite la identificación de las etapas más ineficientes, hallar el motivo del alto consumo energético y aplicar las respectivas correcciones.

Será necesario también revisar los horarios de trabajo por etapa y consumo energético asociado, creando un orden de prioridades en los procesos para minimizar los picos de demanda y, de ser posible, implementar una política de consumo que limite los procesos en los horarios que generen mayor costo según el pliego tarifario para industrias.

1.4. Eficiencia Energética (EE)

Se puede definir la eficiencia energética como el aprovechamiento óptimo de los recursos que una entidad posee [1]. Este concepto lleva a las empresas a realizar acciones proactivas que envuelven a la maquinaria existente, horarios de trabajo, capacitaciones al personal laboral, entre otras prácticas que se aplican para lograr superar los niveles de producción previamente obtenidos por la empresa.

1.5. Sistema de Gestión Energética (SGE)

El SGE consiste en aplicar un conjunto de acciones que tienen como objetivo lograr un desempeño utilizando un nivel mínimo de consumo de los recursos a disposición, donde se planteen metas y expectativas, implementando metodologías de trabajo y supervisión del desempeño energético, lo cual tendrá que reflejarse en el incremento de los beneficios obtenidos [1]. Prestar atención a la energía consumida de forma metódica con el propósito de mantener las mejoras alcanzadas y mejorar perennemente el desempeño energético es lo que sugiere la gestión de energía.

Las metodologías implementadas normalmente son definidas en normas o modelos de gestión como la ISO 14001, ISO 9001, ISO 50001 [11], entre otras. Se abarcan los elementos del sistema de gestión de energía, las políticas más comunes que se proponen incluyen la adopción de medidas de ahorro industrial, inversión en ahorro energético y la facilitación de la viabilidad económica para alcanzar un potencial detectado.

La Norma ISO 50001 (Sistemas de Gestión de la Energía) define un conjunto de elementos interrelacionados mutuamente para establecer una política de control y seguimiento con objetivos energéticos concretos, basados en un ciclo de Planificar-Hacer-Verificar-Actuar (PHVA), representado gráficamente como el círculo de Deming en la Figura 1.2.

El propósito del sistema de gestión energética es lograr implementarlo, en base a los resultados que se obtienen de la mejora del desempeño energético y la reducción de costos, siendo estas las metas que busca alcanzar el SGE_n.

Aun cuando el círculo de Deming pueda tener cuatro etapas bien definidas: Planificar, hacer, verificar y actuar, dentro de las mismas es posible dar un enfoque que busque vincular todo el personal de la empresa o industria. Este ciclo inicia en la asignación de las responsabilidades de la dirección, el cual resulta ser la base del proceso, sin el cual es difícil asegurar una mejora en la eficacia.

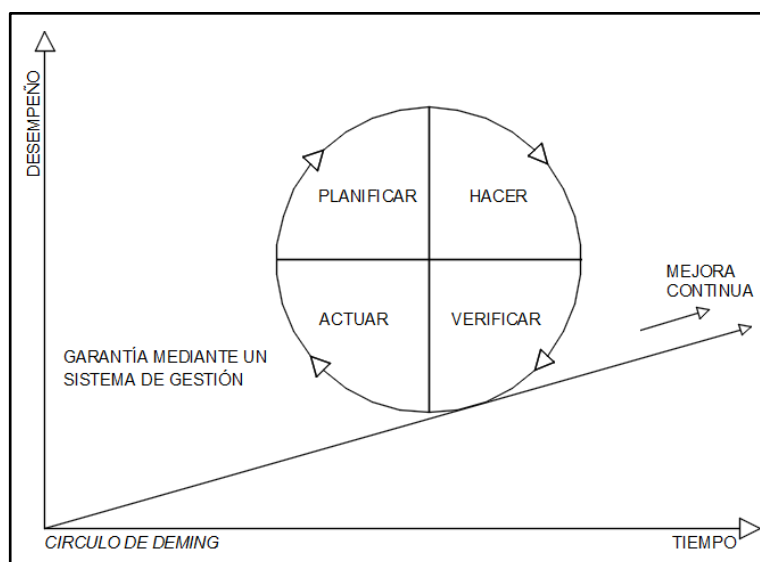


Figura 1.2 Sistema de gestión de energía. Círculo de Deming [4]

La Figura 1.2 muestra en el eje x el tiempo y en el eje y el desempeño. La recta muestra el proceso de mejora continua.

El ciclo se desarrolla en las etapas de política, planificación, implementación y operación, verificación y revisión por la dirección [4]. Estas actividades muestran que es necesaria una integración de la alta dirección para dar el apoyo para el sistema de gestión energética. Las operaciones diarias y el seguimiento del desempeño están agrupados pues son operaciones que se deben aplicar frecuentemente para mejorar el desempeño energético.

El enfoque metódico de gestión de la energía y sus beneficios para la implementación de un Sistema de Gestión de la Energía, son los siguientes: (i) ahorro en costos energéticos, (ii) priorización de las oportunidades de ahorro energético sin costo o de bajo costo que se pueden aplicar a las operaciones de todos los días, (iii) menor exposición a las variaciones en el precio de la energía, (iv) mayor seguridad en el suministro gracias a la menor dependencia de los combustibles importados, (v) mayor conciencia energética a nivel del personal y mayor participación, (vi) más conocimiento del uso y del consumo de la energía, y de las oportunidades de mejora, (vii) procesos de toma de decisiones basados en la información, (viii) menor incertidumbre gracias a una mejor comprensión del uso de la energía en el futuro.

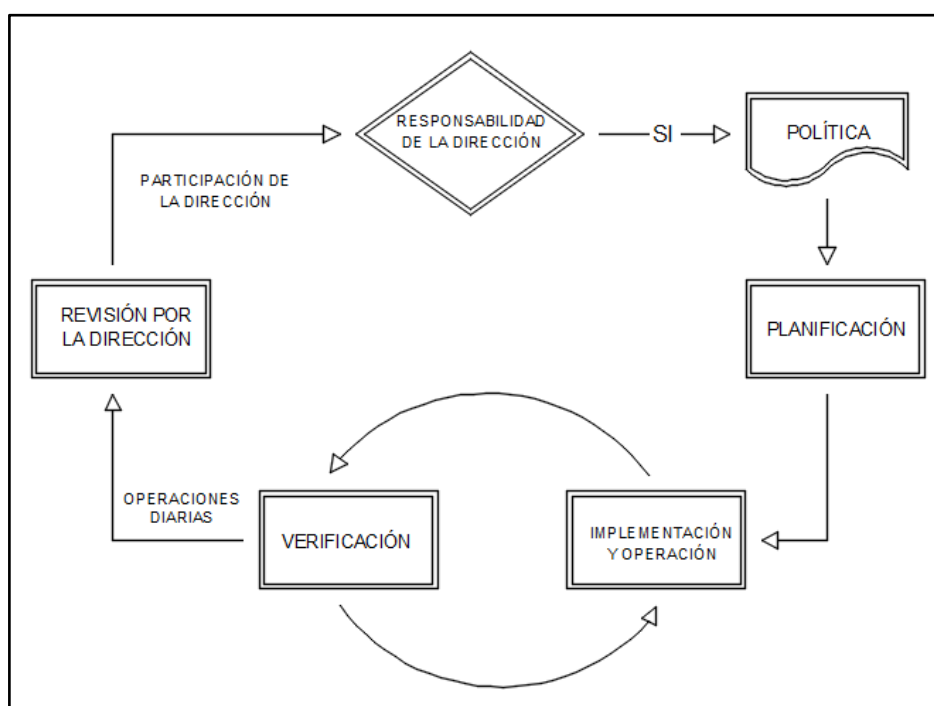


Figura 1.3 Enfoque del ciclo PHVA. [4]

La Figura 1.3 muestra como el ciclo se desarrolla en las etapas de política, planificación, implementación y operación, verificación y revisión por la dirección.

1.6. Motores Eléctricos

Los motores eléctricos son máquinas rotatorias que convierten la energía eléctrica en mecánica. Estos son los mayores consumidores de electricidad en la industria, ya que la mitad de la energía eléctrica usada y cerca de las dos terceras partes de la utilizada en la industria es consumida por motores eléctricos.

Constructivamente, el motor eléctrico consta de dos partes fundamentales: el estator y el rotor. Se puede definir al motor asíncrono como una máquina rotativa alimentada por corriente alterna, generando un fenómeno de inducción electromagnética del devanado inductor hacia el inducido, creando una torsión que se asocia al movimiento del rotor.

Estos motores pueden a su vez clasificarse debido a la construcción del devanado del rotor en dos: motor eléctrico tipo jaula de ardilla y de rotor bobinado. El primero tiene como característica las barras que se colocan en las ranuras del rotor y se cortocircuitan mediante anillos, tomando entonces la forma de una jaula de ardilla, mientras que el segundo tipo tiene bobinas de alambre que arrollan el rotor, lo que da la posibilidad de manipular sus terminales considerando los requerimientos.

El devanado del estator contiene tres bobinas desfasadas equitativamente y una cantidad par de polos magnéticos (p); cuando es alimentado por corriente alterna trifásica de una cierta frecuencia (f), se genera una onda de fuerza magneto-motriz que a su vez produce un campo giratorio con una velocidad (n_s) (Ver la ecuación 1.1).

$$n_s = \frac{60 * f}{p} \quad (1.1)$$

Esta velocidad del campo giratorio también es conocida como velocidad síncrona. Sin embargo, este valor constituye un límite teórico al cual le es imposible llegar al rotor bajo sus propios medios y por lo tanto, la velocidad a la cual llega es considerada asíncrona. Para expresar una relación entre velocidad síncrona y la velocidad real del rotor, se define como deslizamiento "s" (Ver la ecuación 1.2).

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (1.2)$$

Donde s es deslizamiento del rotor, n_s es velocidad del campo giratorio. El arranque directo de un motor es cuando el devanado del estator se alimenta directamente de la red eléctrica, permitiendo que el motor arranque con sus características nominales, lo que puede conllevar a un consumo inicial de una corriente muy alta. Por tanto se lo aplica en que se puedan considerar de baja potencia, pues es necesario aplicar un torque de valor significativo (asociado a una gran corriente de arranque) para vencer la inercia del rotor. Sin embargo, en grandes fábricas que tienen una gran potencia instalada y con alimentación en alta tensión puede llegarse a arranques directos con motores de hasta 100 Caballos de Fuerza.

El uso de convertidores estáticos de frecuencia es conocida como el método más eficiente para realizar el control de velocidad de los motores asíncronos. Los convertidores transforman la tensión de la red, de amplitud y frecuencia constantes, en una tensión de amplitud y frecuencia variables. Con la variación de la frecuencia de la tensión de alimentación, se varía también la velocidad del campo giratorio, y así mismo, la velocidad mecánica de rotación de la máquina.

Eficiencia en motores eléctricos

La eficiencia de un motor se define como la razón entre la potencia mecánica de salida y la potencia eléctrica de entrada de dicho motor, los valores mínimos de eficiencia que se debe cumplir en un motor eléctrico vienen dados por la eficiencia nominal, la cual se obtiene por los datos de placa respectivos. Se la puede calcular de varias formas. Ver las ecuaciones 1.3, 1.4, 1.5.

$$n = \frac{\text{Potencia de entrada}}{\text{Potencia de salida}} * 100 \quad (1.3)$$

$$n = \frac{\text{Potencia de entrada} - \text{Pérdidas}}{\text{Potencia de entrada}} * 100 \quad (1.4)$$

$$n = \frac{\text{Potencia de salida}}{\text{Potencia de salida} + \text{Pérdidas}} * 100 \quad (1.5)$$

Donde:

Potencia de entrada: es la potencia eléctrica que el motor toma de la línea.

Potencia de salida: es la potencia mecánica disponible en el eje del motor.

Las pérdidas en los motores eléctricos vienen dadas por las alteraciones del campo magnético en el estator y rotor por efectos de histéresis y corrientes.

$$\text{Factor de carga} = \frac{\text{Potencia real entregada}}{\text{Potencial de placa}} \quad (1.6)$$

El primer paso para la ejecución de un estudio de eficiencia orientado a motores es la examinación de la máquina operando a velocidad constante. Esto se realiza con el propósito de obtener la cantidad de energía consumida anualmente a un mismo valor de velocidad y nivel de carga en cada punto de operación.

Este análisis puede ser descompuesto en distintas fases como lo son el desarrollo de un ciclo de carga-servicio, determinación de una relación entre potencia de entrada y nivel de carga, cálculo del consumo anual energético (kWh) obtenido del producto de las horas de operación y la potencia finalizando con la suma de energía consumida en todos los niveles de carga con el objetivo de hallar el consumo energético anual a velocidad constante. Dicho lo anterior, se recalca la necesidad de poseer son el ciclo de carga-servicio, las curvas características y de sistema así también los puntos de caudal a velocidad constante.

Siguiendo la metodología previa, para el caso de velocidad variable se obtiene una nueva potencia eléctrica para cada punto de operación. El producto entre ambas magnitudes y la suma de estos valores representará el consumo anual de energía en operación a velocidad variable.

Para delinear el perfil de consumo para cada máquina es necesario disponer de datos sobre la potencia de entrada o en su defecto, variables de fluido en

conjunto con los periodos de funcionamiento por año. Los datos de presión, caudal y potencia de entrada de la bomba son proporcionados por las curvas características de las bombas. Llegando a ese punto, es posible la determinación del resto de las variables.

1.7. Métodos Determinísticos

Regresión lineal

La regresión lineal es el procedimiento que se aplica para obtener la ecuación de la recta para un conjunto de datos propuestos que genera una función lo mejor estimada posible. Para esto se utiliza una sumatoria cuadrática de la diferencia del valor estimado de la recta y el valor estocástico de la variable de interés, para finalmente ser diferenciada e igualada a cero. Esto asegura que las desviaciones de todos los puntos se han reducido al mínimo posible y que el modelo lineal obtenido es el que mejor describe las variables. Es conocido como el método de mínimos cuadrados.

En un análisis estadístico en el que se especifican los parámetros de estudio y se genera un modelo que explique la dinámica entre las variables que intervienen. El propósito es crear una ecuación que sustituya la naturaleza estocástica de dichas variables y prediga un valor que sigue un modelo determinista. [6]

Como lo explica Mendenhall [7] una recta de mejor ajuste está basada en una muestra finita de observaciones bi-variadas tomadas de una población más grande de mediciones. Esta recta puede describir de manera semejante la relación que existe entre las variables aleatorias, bajo el supuesto que la variable de interés “Y” está linealmente asociada a la variable independiente “X”, creando los parámetros a (cruce por cero de la recta) y b (pendiente de la misma) (Ver la ecuación 1.7).

$$Y = b * X + a \quad (1.7)$$

Diagrama de Pareto

El diagrama de Pareto es una herramienta que permite localizar el problema principal y ayuda a localizar la causa más importante de éste. Este diagrama es asociado al principio de Pareto, conocido como la “Ley 80 – 20”, la cual indica que el 80% de los problemas están dados por el 20% de las causas. [7].

Esta idea se centra en localizar los defectos, problemas o fallas significativas para fijar sobre estas los esfuerzos para ejercer una solución. La curva permite organizar los datos de tal forma que se genere un orden descendente. Entonces asigna un orden de prioridades, afirmando que en todo el grupo de elementos o factores que contribuyen a un mismo efecto, solo una cantidad pequeña son los responsables del mayor de los problemas.

1.8. Tarifas Eléctricas

El pliego tarifario se basa en los principios de solidaridad, equidad, cobertura de costos, eficiencia energética, responsabilidad social y ambiental.

Son dedicadas a la prestación del servicio público de energía eléctrica encargada por los Distribuidores en su zona de concesión.

La facturación respectiva se realiza por la sumatoria de los rubros facturados por consumo de energía, demanda de potencia, pérdidas en transformadores, comercialización y penalización por bajo factor de potencia [10].

1.8.1. Consumidor Industrial

Los consumidores industriales son las personas naturales o jurídicas, públicas o privadas, que hacen uso de la energía eléctrica para fabricar o transformar productos por medio de los procesos industriales.

Estos son generalmente de alta y media tensión en zonas industriales y baja tensión en zona administrativa, siendo alta tensión los puntos de voltaje superior a 40 kV, media tensión entre 600 V y 40kV y baja tensión voltajes menores a 600 V.

Tal como describe en Pliego Tarifario para Empresas Eléctricas del Servicio Público de Energía Eléctrica Arconel, “dicho consumidor deberá pagar: (i) un cargo por comercialización en Dólares/consumidor, independiente del consumo energético, (ii) un cargo por demanda en Dólares/Kw, por cada kw de demanda facturable, como mínimo de pago, sin derecho a consumo, multiplicado por un factor de corrección, (iii) un cargo por energía expresado en Dólares/Kw, en función de la energía consumida en el periodo de lunes a viernes de 8h00 hasta 18h00, (iv) un cargo por energía expresado en Dólares/Kw, en función de la energía consumida en el periodo de lunes a viernes de 18h00 hasta las 22h00, (v) un cargo por energía expresado en Dólares/Kw, en función de la energía consumida en el periodo de lunes a viernes de 22h00 hasta las 8h00, teniendo en cuenta la energía de sábados, domingos y feriados en el periodo de 22h00 a 18h00, (vi) un cargo por energía expresado en Dólares/Kw, en función de la energía consumida en el periodo sábados, domingos y feriados en el periodo de 18h00 hasta las 22h00” [10].

CAPITULO 2

2. METODOLOGÍA

Este capítulo trata sobre la metodología a desarrollar para la resolución del problema de eficiencia energética en una industria cementera, consta de las siguientes subsecciones. La sección 2.1 trata sobre la metodología de eficiencia energética implementada en base a la Norma ISO 50001, identificando las oportunidades de mejora. La sección 2.2 trata sobre la metodología de reducción de consumo energético en base al pliego tarifario, donde se describe un programa elaborado bajo la plantilla de Matlab para el cálculo del menor consumo de energía diario de la industria cementera con respecto a la producción demandada. La sección 2.3 trata sobre la metodología usada para realizar análisis en motores de media tensión con respecto a la carga que controla, en esta sección se usarán variables de estado para detectar problemas internos de cuatro motores principales en la industria en cuestión y así corregir o prevenir los problemas.

2.1. Diseño de Gestión Energética en Base a la Norma ISO 50001:2012

Esta sección trata sobre el diseño utilizado en la Norma ISO 50001 para el sistema de gestión de la energía (Capítulo 1, Sección 6) y consta de las siguientes subsecciones: La sección 2.1.1 trata sobre los requisitos de dicha norma. La sección 2.1.2 trata sobre la realización de un diagnóstico inicial de la estructura de la empresa con respecto a consumo de energía eléctrica. La sección 2.1.3 trata sobre cómo se realiza la revisión energética de la industria con sus respectivos consumos de electricidad, la identificación de los usos significativos de la energía, los equipos de mayor consumo energético y las identificaciones de las oportunidades de ahorro energético. La sección 2.1.4 trata sobre la metodología de ahorro energético por medio de la elaboración de una línea base energética. La sección 2.1.6 trata sobre la identificación de los indicadores de desempeño eléctrico y la metodología usada para encontrar el indicador meta.

2.1.1. Estructura de la Norma NTE INEN – ISO 5001:2012

La implementación del sistema de gestión de la energía tiene como meta la mejora del desempeño energético en donde, el uso de la energía, la eficiencia energética, el consumo energético, la intensidad energética, entre otros son incluidos. Nos centraremos en los requisitos del sistema de gestión que se muestran en la Tabla 1 [11].

Responsabilidad de la dirección	4.1 Requisitos Generales
	4.2 Responsabilidad de la dirección
	4.2.1 Alta dirección
	4.2.2 Representante de la dirección
	4.3 Política energética
Planear	4.4 Planificación energética
	4.4.1 Generalidades
	4.4.2 Requisitos legales y otros requisitos
	4.4.3 Revisión energética
	4.4.3 (a) Fuentes, uso y consumo de energía
	4.4.3 (b) Usos significativos
	4.4.3 (c) Priorizar oportunidades de mejora
	4.4.4 Línea de base energética
	4.4.5 Indicadores de desempeño energético
	4.4.6 Objetivos energéticos, metas energéticas y planes de acción para la gestión de la energía
Hacer	4.5 Implementación y operación
	4.5.1 Generalidades
	4.5.2 Competencia, formación y toma de conciencia
	4.5.3 Comunicación
	4.5.4 Documentación
	4.5.4.1 Requisitos de la documentación
	4.5.4.2 Control de los documentos
	4.5.5 Control operacional

	4.5.6 Diseño
	4.5.7 Adquisición de servicios de energía, productos, equipos y energía
Verificar	4.6 Verificación
	4.6.1 Seguimiento, medición y análisis
	4.6.2 Evaluación del cumplimiento de los requisitos legales y otros requisitos
	4.6.3 Auditoría interna del sistema de gestión de la energía
	4.6.4 No conformidades, corrección, acción correctiva y acción preventiva
	4.6.5 Control de los registros
Actuar	4.7 Revisión por la dirección
	4.7.1 Generalidades
	4.7.2 Información de entrada para la revisión por la dirección
	4.7.3 Resultados de la revisión por la dirección

Tabla 1. Requisitos del SGEN [11]

La numeración de los requisitos que se muestran en la Tabla 1 se mantiene con respecto a la Norma utilizada para una mayor facilidad de uso [11].

2.1.2. Resultado del análisis inicial de diagnóstico

Se realizó el estudio de todas las etapas del análisis inicial de diagnóstico, y a través de los diagramas resultantes de todas las fases del cumplimiento de los requisitos de la norma, se concluye que la empresa cumple en su totalidad con un 1% de los requisitos solicitados por la norma ISO 50001:2012 para su adecuada implementación, un 25% de cumplimiento parcial y un 74% de no cumplimiento dentro de la organización. Con estos referentes se puede tener en claro el manejo de la energía actualmente en la empresa y mediante este análisis se puede dar ejecución a la implementación del SGEN, en el cual se desea obtener el mayor cumplimiento de los requisitos establecidos por dicha norma.

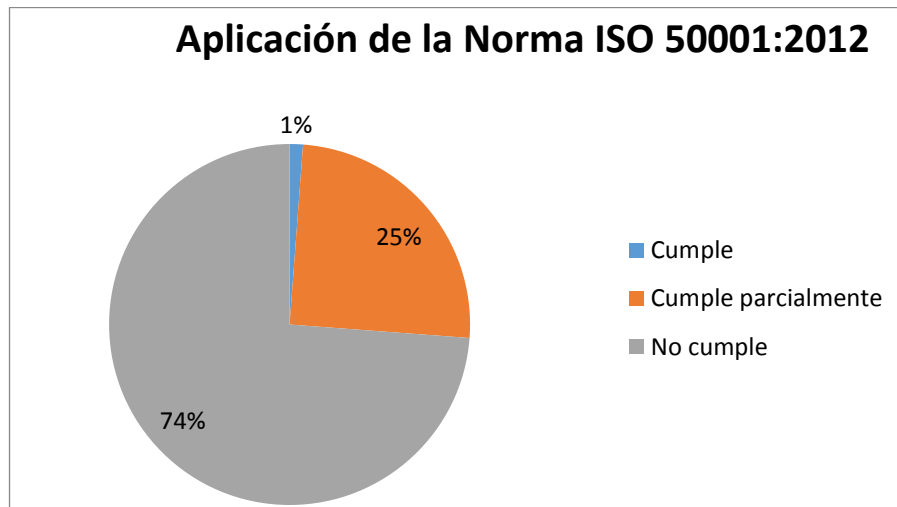


Figura 2.1 Cumplimiento de la empresa en general

En la Figura 2.1 se muestra el resultado del diagnóstico en el cumplimiento general del análisis. Se observan los porcentajes de cumplimiento (color azul), de cumplimiento parcial (color rojo) y de no cumplimiento (color verde).

En la Figura 2.2 se muestra el diagrama de Kiviat para el diagnóstico inicial de la empresa con respecto a cada etapa siendo la planificación energética la que cumple en un mayor porcentaje.

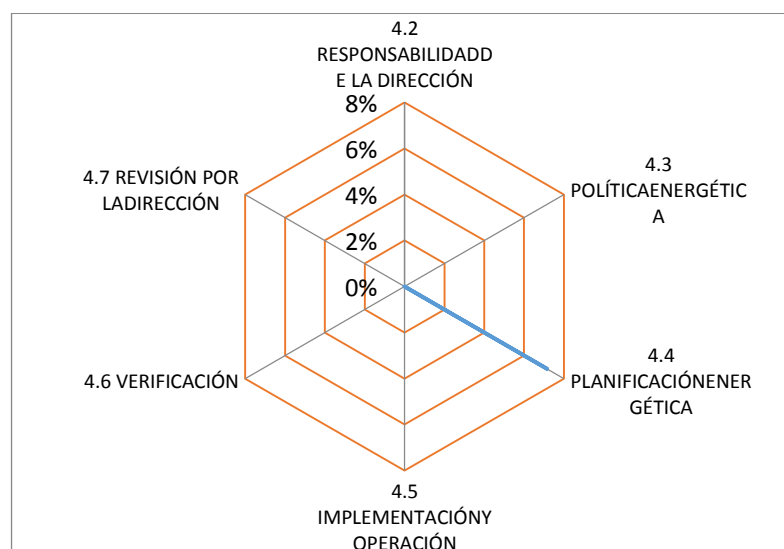


Figura 2.2 Diagrama de Kiviat del análisis inicial de diagnóstico

La Figura 2.2 indica todas las particiones consideradas para el análisis que son cada uno de los requisitos de la norma ISO 50001, se observa que el mayor porcentaje de cumplimiento se encuentra en el requisito 4.4 de planificación energética donde la línea (azul) indica 7%.

2.1.3. Revisión Energética

Se realizó la recolección de los datos necesarios para realizar un análisis de los mismos y poder tener una caracterización efectiva de la situación energética de la organización. Estos datos son de uso y consumo de energía, mediante los cuales se identificaron los usos significativos de la energía (USE) y también las oportunidades de ahorro para mejorar el desempeño energético de la industria.

Se identificaron las fuentes de energía que se utilizan dentro de la industria, las cuales sirven para poder ejecutar los diferentes procesos de producción dentro de la empresa. A esto se denomina análisis de los usos y consumos de energía (UCE).

Para esta etapa se recolectó la información de años pasados, así como se han ido almacenado datos en el transcurso de la ejecución de este proyecto, los cuales se han considerados como datos actuales. El análisis de los datos históricos de las diferentes fuentes de energía corresponde al periodo Enero 2016- Septiembre 2017.

Consumo de electricidad

La energía eléctrica que se utiliza en la industria cementera se encuentra en los equipos pertenecientes a los procesos de producción cementera

Año	2016	2017
Meses	Consumo (kWh)	Consumo (kWh)
Enero	21'491,676	20'923,373
Febrero	15'511,097	18'625,114

Marzo	16'458,112	20'923,800
Abril	15'486,731	19'902,330
Mayo	19'263,602	18'845,381
Junio	21'653,820	21'451,385
Julio	19'435,427	21'805,754
Agosto	23'748,802	23'107,604
Septiembre	24'513,963	26'639,660
Octubre	24'962,040	25'438,939
Noviembre	20'686,030	
Diciembre	23'250,907	

Tabla 2. Consumo de Electricidad – Periodo 2016-2017

En la Tabla 2 se da a conocer el consumo que ha tenido la industria en los últimos años, por lo que se puede obtener con mayor exactitud el promedio de consumo de energía eléctrica.

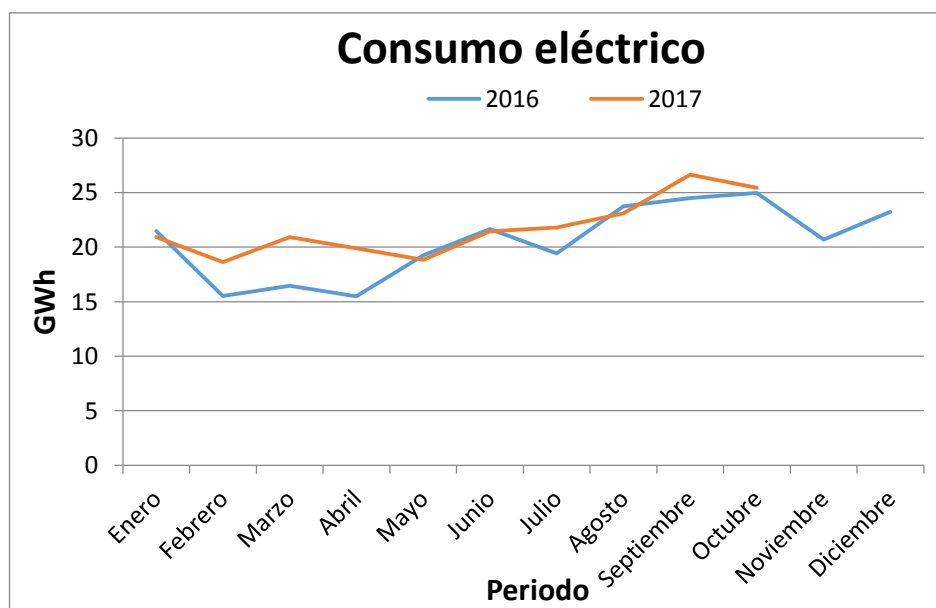


Figura 2.3 Datos de control del consumo de electricidad

En la Figura 2.3 se presentan las tendencias del consumo de energía eléctrica del año 2016 (línea azul) y el consumo de energía eléctrica para el año 2017 (línea roja).

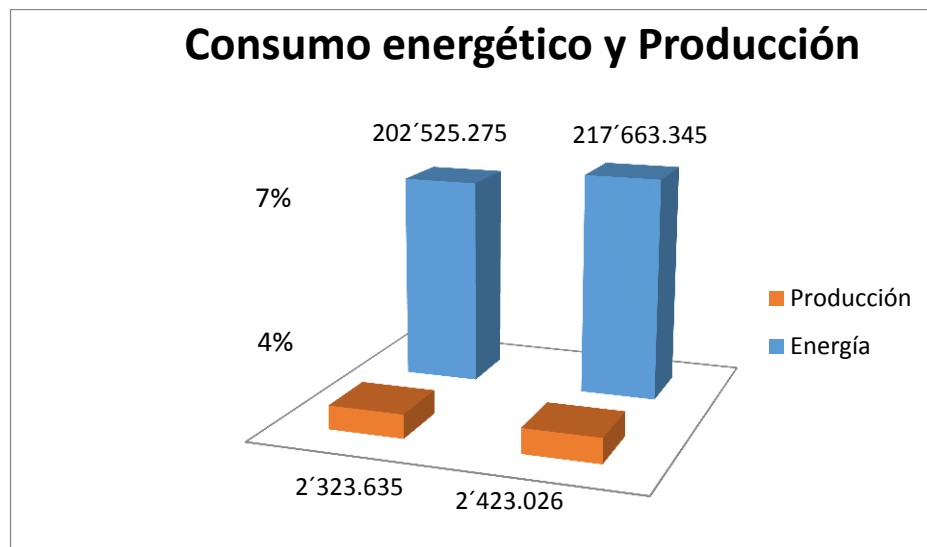


Figura 2.4 Comparación del aumento de energía y producción

En la Figura 2.4 se realiza la comparación del aumento del consumo eléctrico (bloques azules) y la producción (bloques rojos) en un período de dos años. Por medio de estos datos históricos recolectados se puede observar que en los años analizados la producción aumentó un 4% mientras que la energía aumentó un 7%.

Identificación de los usos significativos de energía (USE)

Se identificaron en términos de la norma ISO 50001:2012 los usos de energía que ocasiona un consumo sustancial o que a su vez son un gran potencial para la mejora del desempeño energético de la industria, para así saber cuáles son los equipos y máquinas que tienen mayor consumo dentro de la empresa a los cuales se los denominan USE.

Los procesos de producción de cemento en general, son los que tienen mayor consumo energético ya que están ligados estrechamente con el consumo de energía.

En esta etapa es necesario realizar una caracterización de los equipos de mayor consumo en relación a la energía eléctrica y a la

energía térmica, ya que el sistema podría obtener sustanciales mejoras.

Al finalizar esta etapa de análisis se obtendrán los equipos de mayor uso significativo de energía, y en base a estos se realizarán las respectivas mejoras y ahorros energéticos para la industria.

A continuación, se realizarán tres procedimientos para encontrar los USE y se mencionará más detalladamente al principal consumidor de la energía en la industria.

Caracterización en función de la energía eléctrica consumida.

Para esta caracterización se toma en cuenta los equipos y máquinas con una criticidad mayor y los de mayor consumo en la industria que se relacionan con la energía eléctrica. Para esto se realiza un seguimiento de todos los procesos de producción durante 21 meses, analizando los valores diarios, y definir cuáles son las áreas de mayor consumo de energía eléctrica de la industria.

Equipo	Descripción
Eq11	Equipo 1 de Molienda de material de alimentación
Eq13	Equipo 2 de Molienda de material de alimentación
Eq21	Equipo 1 de Clinkerización (Horno rotatorio)
Eq22	Equipo 2 de Clinkerización (Horno rotatorio)
Eq23	Equipo 3 de Clinkerización (Horno rotatorio)
Eq00	Equipo de prensado de Clinker
Eq31	Equipo 1 de Molienda de cemento
Eq32	Equipo 2 de Molienda de cemento
Eq33	Equipo 3 de Molienda de cemento

Tabla 3. Descripción de Equipo principal de la planta

La Tabla 3 detalla el nombre de cada equipo usado para los análisis de consumo energético con su respectiva descripción.

Una vez que se tienen los consumos de energía eléctrica por áreas, se los ordena de forma descendente como se muestra en la Tabla 4, que posteriormente ayudará a graficar el diagrama de Pareto correspondiente al consumo mensual de energía eléctrica de todas las áreas, en el cual se identifican el 20% de las áreas que consumen aproximadamente el 80% del total de energía eléctrica de la industria.

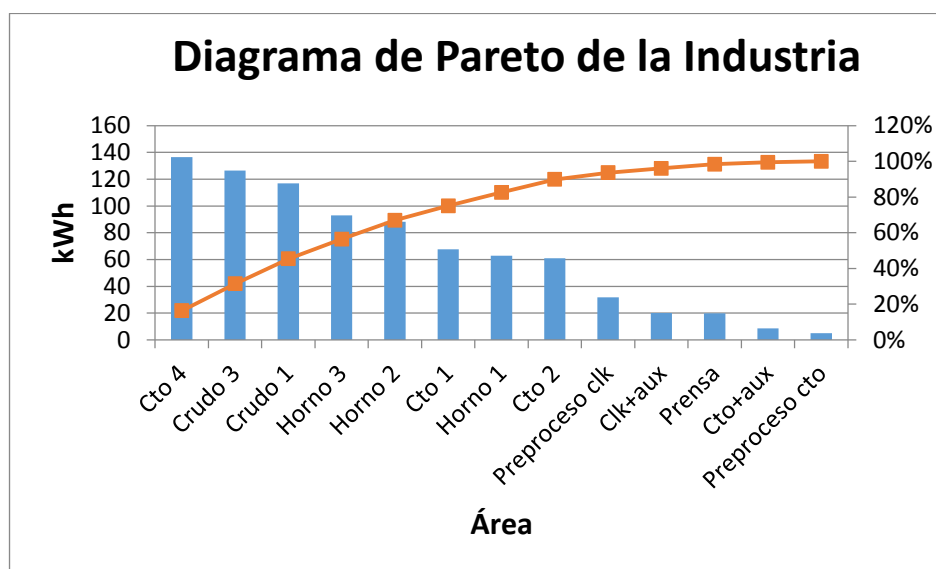


Figura 2.5 Diagrama de Pareto de los consumos de energía de las áreas de producción.

En la Figura 2.5 las barras azules representan el consumo de energía eléctrica de cada área del proceso de producción y la línea en color rojo representa la distribución acumulada. Para poder obtener el consumo del 80% de energía eléctrica de la industria se debe enfocar entre las áreas de producción inicial, Clinkerización y producción final, las cuales son áreas significativas de producción.

Luego se proceden a realizar las respectivas tablas de consumos energéticos de estas, con las cuales se obtendrán los diagramas de Pareto y así los equipos y máquinas de mayor consumo de energía eléctrica por área analizada.

Consumos de potencia eléctrica de las máquinas y equipos del área

Con los equipos de mayor consumo en el área de producción se procede a realizar el diagrama de Pareto para seleccionar los equipos de usos significativos de la energía y realizar su análisis.

	Consumo Mensual	Consumo Acumulado	Porcentaje individual	Porcentaje acumulado
	kWh	kWh	%	%
Eq33	136,588	136,588	16%	16%
Eq13	126,464	263,053	15%	31%
Eq11	117,000	380,052	14%	45%
Eq23	92,877	472,930	11%	56%
Eq22	88,248	561,178	11%	67%
Eq31	67,593	628,771	8%	75%
Eq21	62,932	691,702	8%	83%
Eq32	61,012	752,715	7%	90%
Pre proceso 1	31,657	784,371	4%	94%
Auxiliares 1	20,173	804,544	2%	96%
Eq00	19,742	824,286	2%	98%
Auxiliares 2	8,645	832,931	1%	99%
Pre proceso 2	4,903	837,834	1%	100%

Tabla 4. Consumo mensual de energía eléctrica por áreas.

En la Tabla 4 se muestran los consumos mensuales de energía eléctrica por áreas de producción de la empresa, se muestran de forma descendente.

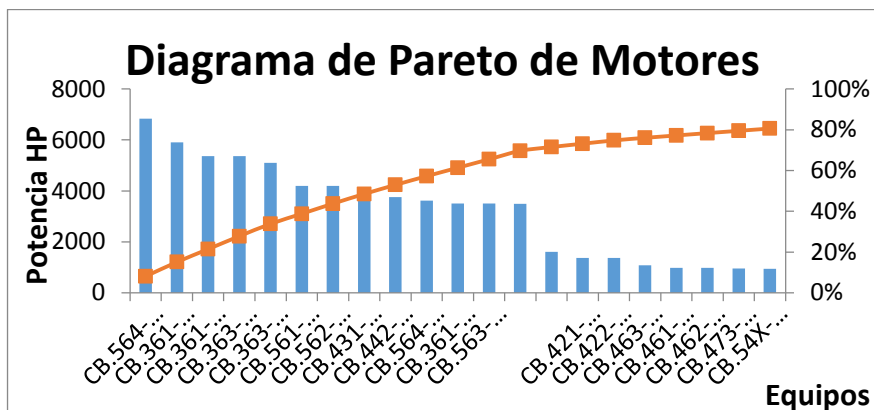


Figura 2.6 Diagrama de Pareto de los consumos mensuales de energía eléctrica de los motores de las áreas.

En la Figura 2.6 podemos observar el diagrama de Pareto realizado para todos los motores, mostrando que el 80% del consumo se encuentra en los primeros 29 motores pertenecientes a las diferentes áreas.

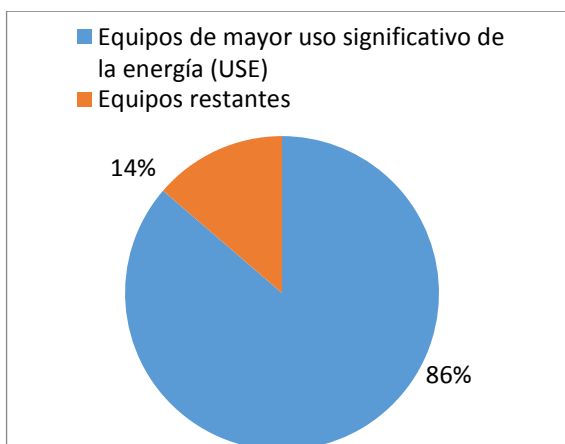


Figura 2.7 Porcentaje de consumo eléctrico [kWh] de los equipos de USE

En la Figura 2.7 podemos observar que los 29 equipos de USE consumen alrededor del 86% de energía eléctrica del área de producción de la empresa y los 126 restantes representan sólo el 14% del consumo.

De los 29 equipos de USE se priorizará el estudio a un tipo de motor por cada área y tipo, sean estos motores de molinos, hornos,

ventiladores de tiro y de filtro, y el motor de la prensa, haciendo una totalidad de diez motores.

Identificación de las oportunidades de ahorro energético

Se desea conocer las diferentes fuentes de la empresa donde se puedan identificar oportunidades o proyectos de ahorro energético, para lo cual se pueden considerar las diferentes máquinas y equipos, procesos de producción o áreas de organización.

Equipo	Tipo de arranque	Voltaje (v)	Potencia (hp)	Corriente (a)	Potencia (kw)	Ubicación
CB.564-AP1	VARIADOR	4,160	6,839.1	839	5,100	Motor molino cemento 4
CB.363-AP1	DIRECTO	4,160	5,364	674.7	4,000	Motor molino crudo 3
CB.363-VE1	VARIADOR	4,160	5,095.8	624.9	3,800	Ventilador tiro crudo 3
CB.564-VE1	VARIADOR	4,000	3,620.7	469	2,700	Ventilador filtro cemento 4
CB.443-VE1	VARIADOR	4,000	3,486.6	447	2,600	Ventilador tiro horno 3
CB.422-VE2	VARIADOR	4,160	1,367.82	192	1,020	Ventilador filtro horno 2
CB.463-AP1		690	1,072.8	817	800	Motor principal horno 3
CB.54X-PX1.FIJO	DIRECTO	4,000	939	124	700	Motor Prensa rodillo fijo
CB.492-VEA		480	844.83	966	630	Ventilador filtro sheuch enfriadora Horno 2
CB.561-	DIRECTO	4,000	470	64	350	Ventilador separador

VE9						molino cemento 1
-----	--	--	--	--	--	------------------

Tabla 5. Datos de placa de motores

En la Tabla 5 se muestran los datos de placa correspondientes a los diez motores a analizar, con sus respectivas corrientes, voltaje, potencia eléctrica.

En este caso las oportunidades de ahorro energético más relevantes y que mayor importancia tienen en la organización son las que se encontraron mediante el estudio de los USE.

Mediante los estudios realizados previamente para encontrar los equipos de mayor consumo de la empresa se tienen equipos referentes al sistema eléctrico, de los cuales se puede partir para realizar el estudio de oportunidades energéticas.

2.1.4. Línea de base energética

La línea de base energética de la industria es la que presenta el comportamiento que tiene en la actualidad la empresa y es la que actúa como referencia al momento de implementar el SGEN y las distintas oportunidades de mejora, con lo cual se pueden cuantificar los impactos que esto traerá al desempeño energético de la industria.

Como ya se ha mencionado la empresa no cuenta con un SGEN establecido, por tal motivo la línea base de esta industria tendrá su inicio en función de los kWh consumidos en relación a sus toneladas de producción, con lo cual se ha realizado el análisis del año 2016 y 2017 como referencia para la creación de esta línea base.

Se implementará una línea de base energética para cada área y sistema que están relacionadas a producción, las áreas mencionadas son molienda de crudo, Clinkerización y molienda de cemento.

Metodología del análisis de ahorro energético en la Planta

La relación de los kWh consumidos en relación a las toneladas producidas se presenta en una gráfica de Energía Consumida vs.

Producción de Cemento para un análisis de enero del 2016 a septiembre del 2017. De los datos graficados se obtiene, por medio de regresión lineal (Capítulo 1, sección 8), una recta que siga dichos datos obteniéndose una ecuación lineal (Ver la ecuación 2.4).

$$E = m * P + E_{nap} \quad (2.4)$$

Dónde:

E= Consumo de energía en ese periodo

P= Producción en ese periodo

m= Razón de cambio medio del consumo energético respecto a la producción

E_{nap}= Energía no asociada a la producción.

Entonces, la ecuación de la línea base se obtiene con un factor de correlación de R^2 , el cual está dentro de los parámetros de aceptabilidad para un posterior análisis de los indicadores de desempeño energético.

Se define la energía no asociada a la producción como E_{nap}, la razón de cambio es P y se obtiene un error a partir de los datos obtenidos.

Se procede a obtener la línea meta alcanzable, la cual se realiza con los puntos que se encuentra debajo de la línea base ya obtenida, que representan un ahorro por una mayor producción con un menor consumo eléctrico.

La ecuación de la línea meta y el factor de correlación se obtiene de la misma manera que la línea base.

Para obtener el potencial de ahorro se resta el consumo de E_{nap} de la línea base con el consumo de E_{nap} de la línea meta, la diferencia de estas dos ecuaciones representa al ahorro energético.

$$\text{Potencial de ahorro} = E_{nap} (\text{Línea base}) - E_{nap}(\text{Línea Meta}) \quad (2.5)$$

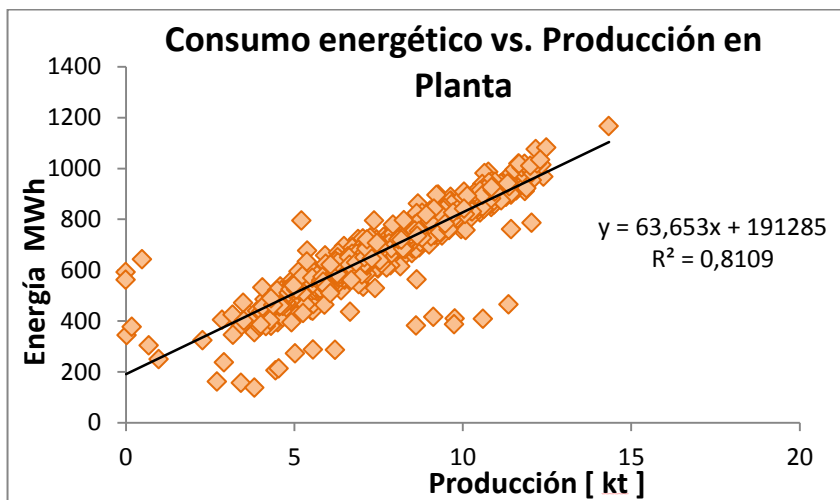


Figura 2.8 Consumo eléctrico vs. Producción

La Figura 2.8 muestra la relación de los kWh consumidos en relación a las toneladas producidas para un análisis de enero del 2016 a septiembre del 2017.

Entonces, la ecuación de la línea base es $E = 63,653 \cdot P + 191\,285$ con un factor de correlación de 0,88109 el cual está dentro de los parámetros de aceptabilidad para un posterior análisis de los indicadores de desempeño energético.

Se puede observar que la energía no asociada a la producción (Enap) de la línea base es de 191 285 [kWh], la razón de cambio es de 63,653 [kWh/t] y se obtiene +/- 2,17 [kWh] de error.

Se procede a obtener la línea meta alcanzable, la cual se realiza con los puntos que se encuentra debajo de la línea base ya obtenida (Ver Figura 2.9).

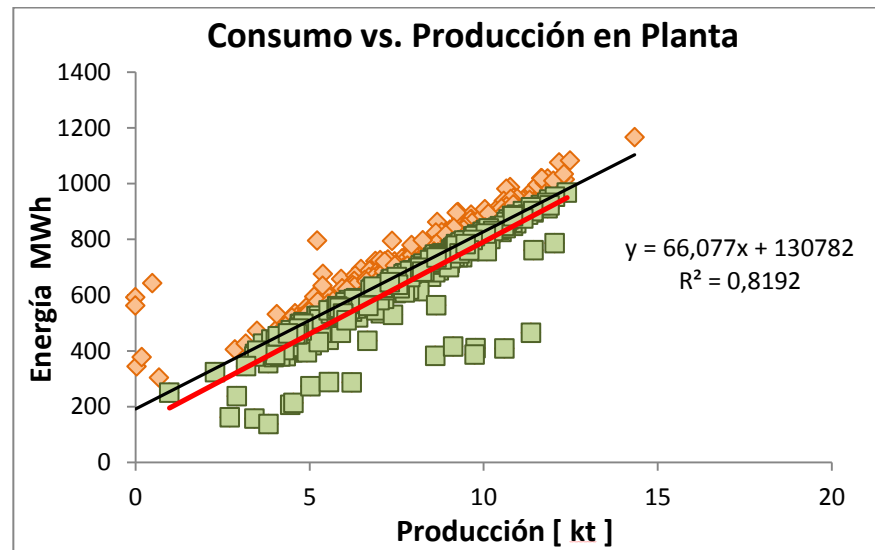


Figura 2.9 Línea base y línea meta en Planta

La Figura 2.9 muestra en consumo eléctrico y la producción con respecto a la línea meta, es decir, con el uso únicamente de los valores pertenecientes al ahorro energético.

La ecuación de la línea meta es de $E_m = 66,077 \cdot P + 130\,782$ con un factor de correlación de 0,8192.

La Enap de la línea meta es de 130 782 [kWh], la razón de cambio es de 66,077 [kWh/t] y se obtiene +/- 2,34 [kWh] de error.

Para obtener el potencial de ahorro se resta el consumo de Enap de la línea base con el consumo de Enap de la línea meta.

$$\text{Potencial de ahorro} = 191\,285 - 130\,782[\text{kWh}]$$

$$\text{Potencial de ahorro} = 60,503 [\text{kWh}]$$

En este inicio de la implementación del SGEEn se partirá con esta línea base, la cual con la obtención de la línea meta se puede observar que existe una posibilidad de ahorro de 60,503 kWh.

Se procederá a realizar el mismo método de análisis de ahorro energético para cada área de producción donde existe una oportunidad de ahorro energético.

Cabe recalcar que el ahorro energético global de la planta incluye otras áreas externas a la producción, pero el análisis respectivo se obtendrá directamente de los sistemas de molindas de Crudo, Clinkerización y molindas de cemento.

Para todas las áreas del proceso de producción se realizó el cálculo anteriormente detallado, la sumatoria de la cantidad de energía e índice de desempeño que se puede ahorrar según los datos encontrados anteriormente son colocados de acuerdo al registro de consumo energético que se tiene en la planta.

2.1.5. Indicadores de desempeño eléctrico (IDEn)

Se han tomado indicadores como del sistema de gestión de la empresa (kWh/t (Clinker) y kWh/t (cemento)) ver Tabla 6. El más importante y considerado para tener un análisis inicial es el consumo eléctrico ligado a la producción final, con el cual se realizará un posterior análisis y será ejecutado por el SGEEn de la industria después de realizar las auditorías internas de energía y dar a conocer las necesidades de cambio, anomalías, correcciones y no conformidades que el sistema puede presentar.

Indicador	Descripción	Unidad
Consumo eléctrico de producción	Relación que existe entre el consumo eléctrico y la producción de Clinker	kWh/t (clk)
	Relación que existe entre el consumo eléctrico y la producción de Cemento	kWh/t (cto)
Energía eléctrica consumida	Cantidad de energía eléctrica consumida por unidad de tiempo	kWh/año

Tabla 6. IDEn de la empresa

En la Tabla 6 se muestran los indicadores del sistema de gestión de la empresa (kWh/t (Clinker) y kWh/t (cemento)).

Como se mencionó anteriormente se procede analizar el consumo eléctrico ligado a la producción del periodo 2016 y 2017 (hasta septiembre), con el mismo que se determinó la línea base para la industria y con el cual se obtiene la gráfica del índice de consumo energético de la empresa. Para esto se utiliza la ecuación de la línea base la cual sirve para establecer la ecuación del índice de consumo energético (Ic), dividiendo la ecuación de la línea base para la respectiva producción. Ver la ecuación 2.6.

$$Ic = m + \left(\frac{Enap}{p} \right) \quad (2.6)$$

De la misma manera se procede para tener el índice de consumo energético de la línea meta y la línea de consumo real.

Periodo 2016	Ic real [kWh/t]	Ic base [kWh/t]	Ic meta [kWh/t]
Enero	104.4	92.5	95.3
Febrero	108.6	102.5	96.3
Marzo	89.1	95.8	78.9
Abril	82.0	94.0	72.4
Mayo	83.7	89.4	75.5
Junio	85.7	86.4	78.5
Julio	82.8	88.9	74.8
Agosto	83.5	84.5	76.9
Septiembre	81.9	82.8	75.9
Octubre	83.2	83.4	76.9
Noviembre	86.4	87.6	78.8

Diciembre	83.4	84.9	76.7
-----------	------	------	------

Tabla 7. Calculo de índices de consumo energético en planta – Año 2016

En la Tabla 7 se encuentra el índice de desempeño real, base y meta calculado para la planta para el año 2016.

Periodo 2017	Ic real [kWh/t]	Ic base [kWh/t]	Ic meta [kWh/t]
Enero	89.4	89.0	81.4
Febrero	91.6	90.0	83.2
Marzo	97.1	91.2	88.4
Abril	92.1	90.2	83.7
Mayo	92.0	92.6	82.9
Junio	87.2	87.0	79.8
Julio	89.3	87.9	81.6
Agosto	91.2	87.0	83.8

Tabla 8. Calculo de índices de consumo energético en planta – Año 2017

En la Tabla 8 se encuentra el índice de desempeño real, base y meta calculado para la planta para el año 2017.

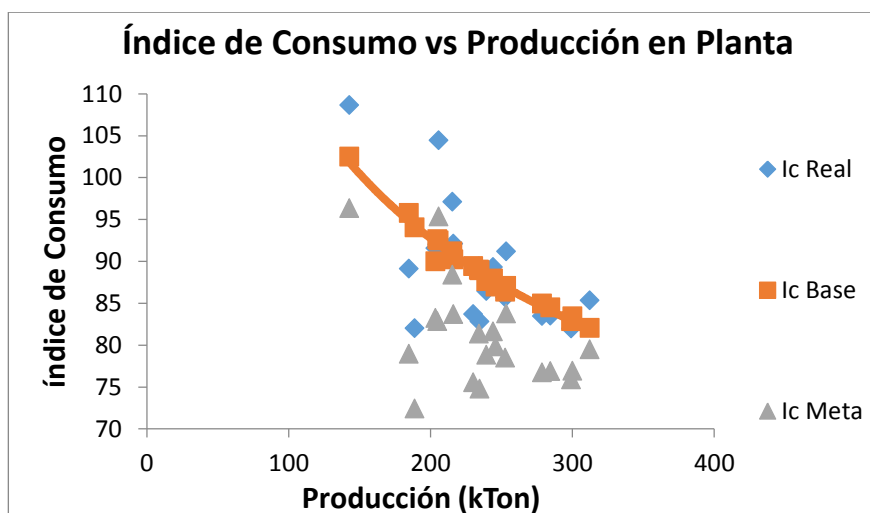


Figura 2.10 Indicador de consumo eléctrico de producción en Planta

En la Figura 2.10 se puede observar las tendencias de los índices de desempeño analizados en la Planta y se puede concluir que el índice real está sobre la meta de manera significativa.

Los puntos que se encuentran debajo de la línea de tendencia son los pertenecientes a los meses donde se ha obtenido una mayor producción con un menor gasto de energía eléctrica, por lo cual ha habido una mayor eficiencia de energía eléctrica en relación a los procesos de producción. También existen unos puntos que se alejan del Ic base y del Ic meta, lo cual quiere decir que en estos meses se ha producido una ineficiencia en relación al consumo de energía eléctrica con los procesos de producción. Ha existido un consumo considerable de energía por sobre lo normal, con lo cual se puede concluir que se tienen que realizar revisiones a las máquinas y equipos eléctricos debido a que no están trabajando como deberían, realizar estudios para saber los factores que están causando este tipo de variaciones, y finalmente tener en cuenta que probablemente los equipos están sobredimensionados.

Este estudio se realiza para tener una referencia de cómo está funcionando actualmente este indicador dentro de la industria, el cual es considerado más indispensable debido a la estrecha relación entre consumo eléctrico y producción.

	Eq 11	Eq 13	Eq 21	Eq 22	Eq 23	Eq 31	Eq 32	Eq 33	Eq 00	Planta
2016- 2017	43%	83%	33%	23%	25%	10%	24%	9%	9%	24%
Últimos tres meses	16%	66%	77%	25%	34%	20%	10%	3%	5%	16%

Tabla 9. Porcentaje de cumplimiento de metas en las áreas de producción

En la Tabla 9 se presenta el porcentaje de cumplimiento de las metas propuestas en la empresa por las áreas de producción, se muestran

en los años de análisis y para los últimos meses del año 2017 con el fin de observar los cambios.

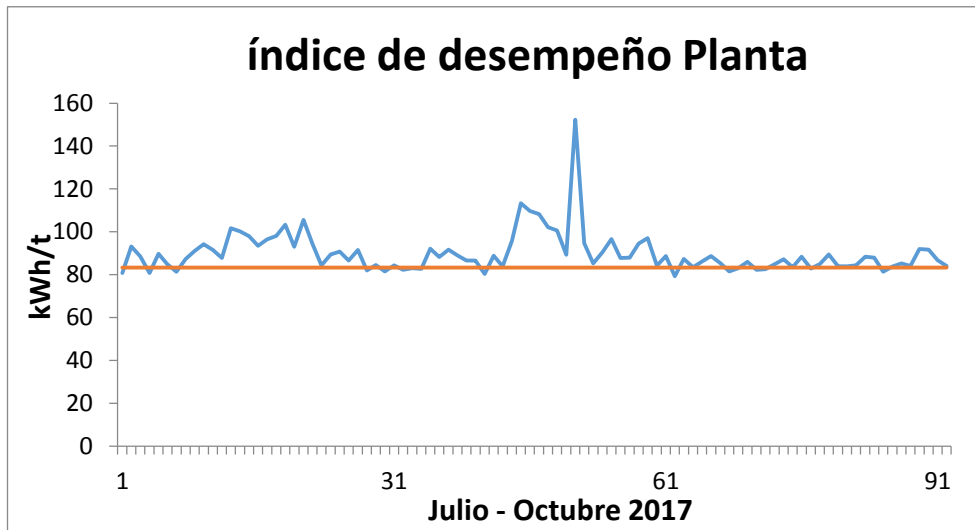


Figura 2.11 Porcentaje de cumplimiento de metas en la Planta

La Figura 2.11 indica la tendencia del índice de desempeño en la planta en los últimos tres meses de análisis (julio, agosto y septiembre del 2017) donde se puede constatar que el cumplimiento con la meta propuesta sólo ha sido del 16%.

2.2. Metodología reducción de consumo energético en base al pliego tarifario

El ahorro en costos por consumo de energía se obtiene a partir del uso eficiente de los equipos principales de la industria y con su respectivo

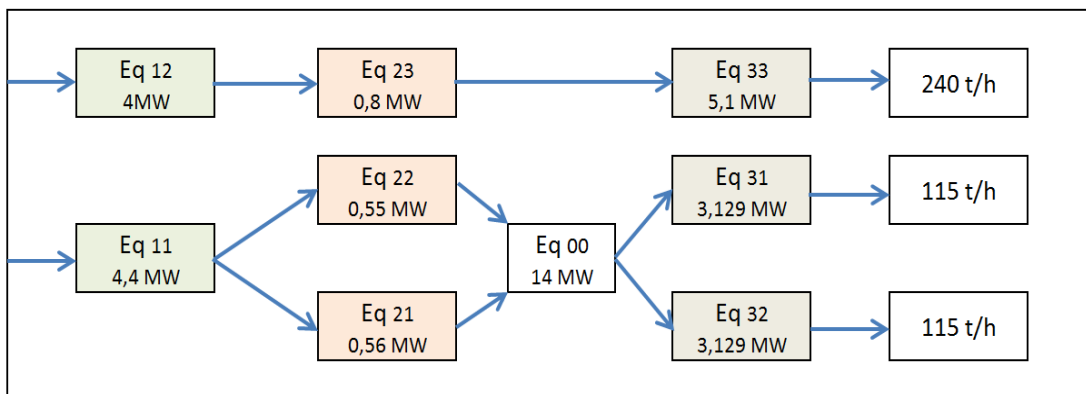


Figura 2.12 Diagrama del proceso en la industria.

consumo de potencia en kW.

La Figura 2.12 muestra todas las combinaciones posibles que tiene, en particular, esta industria cementera para producir las toneladas diarias requeridas. Cada equipo tiene su potencia eléctrica respectiva y las máximas toneladas / horas que se puede tener.

	L1	L2	L3	L4	L1-L2	L1-L3	L1-L4
Eq 11		x	x	x	x	x	x
Eq 12	x				x	x	x
Eq 21				x			x
Eq 22		x	x		x	x	
Eq 23	x				x	x	x
Eq 00		x	x	x	x	x	x
Eq 31		x*	x	x*	x*	x	x*
Eq 32		x*	x	x*	x*	x	x*
Eq 33	x				x	x	x
Toneladas(t)	5 760	2 760	5 520	2 760	8 520	11 280	8 520

Tabla 10. Líneas de producción posibles

* Puede ser usado cualquiera de los dos equipos ya que tienen las mismas características.

Se tienen cuatro formas de poder realizar la producción, donde la línea de producción 1 (L1) es independiente de las otras líneas, mientras que las líneas de producción restantes son dependientes entre ellas; obteniendo así 7 formas de llegar al producto final. Ver

	L1	L2	L3	L4	L1-L2	L1-L3	L1-L4
Eq 11		x	x	x	x	x	x
Eq 12	x				x	x	x
Eq 21				x			x
Eq 22		x	x		x	x	
Eq 23	x				x	x	x
Eq 00		x	x	x	x	x	x
Eq 31		x*	x	x*	x*	x	x*
Eq 32		x*	x	x*	x*	x	x*
Eq 33	x				x	x	x

Toneladas(t)	5 760	2 760	5 520	2 760	8 520	11 280	8 520
---------------------	-------	-------	-------	-------	-------	--------	-------

Tabla 10.

2.2.1. Cálculo del consumo de energía eléctrica

El consumo de la energía eléctrica se calcula dependiendo de la potencia utilizada en el tiempo. Ver ecuación 2.7.

$$\text{Energía [kWh]} = \text{Potencia [kW]} * \text{tiempo [h]} \quad (2.7)$$

Los costos de la energía se calculan dependiendo del horario en que es utilizada la energía.

Basados en el pliego tarifario y en el consumo de energía se espera cubrir la demanda esperada diariamente con los recursos de menor precio teniendo en cuenta el cumplimiento de las condiciones del sistema.

El pliego tarifario plantea diferentes precios a diferentes horas de acuerdo a la cantidad a demandar como se describió anteriormente (Capítulo 1, sección 9).

	L-V	S,D,F	
08h00 - 18h00	0,0755	0,0446	USD/kWh
18h00 - 22h00	0,0865	0,0755	USD/kWh
22h00 - 08h00	0,0446	0,0446	USD/kWh

Tabla 11. Cargos tarifarios para industrias de CNEL Guayaquil Enero – Diciembre 2018.

En la Tabla 11 se muestran los cargos tarifarios para industrias de la empresa CNEL Guayaquil.

El gráfico de pliego tarifario para los días sábados, domingos y feriados se muestran en el Anexo #2.

Se busca el punto óptimo de operación de los sistemas de la industria, para así minimizar el costo del consumo de la energía eléctrica.

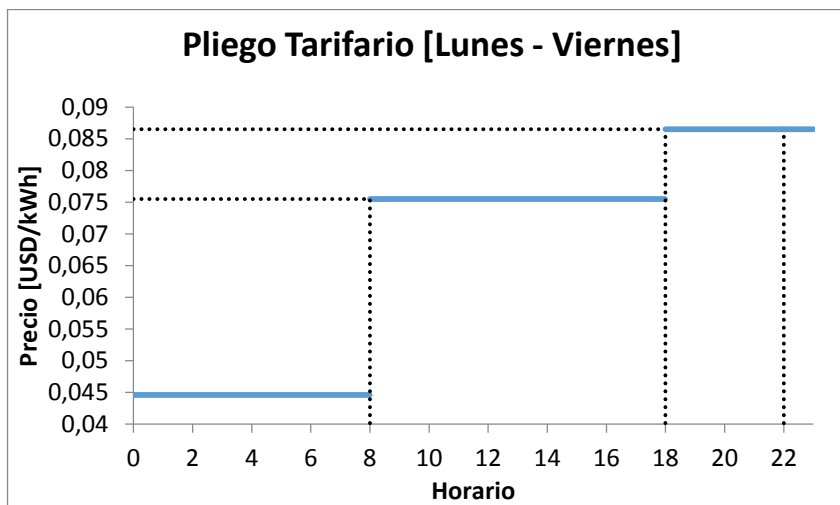


Figura 2.13 Precios horarios de la energía eléctrica de lunes a viernes

En la Figura 2.13 se muestra una gráfica con los precios de la energía eléctrica de lunes a viernes.

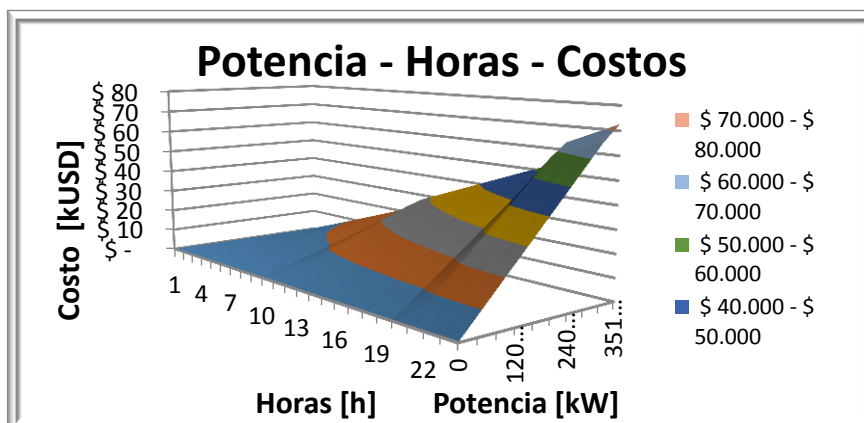


Figura 2.14 Costos de tarifas eléctricas a partir del consumo de energía eléctrica realizado en cada hora de un día.

El detalle del cálculo de los costos de la Figura 2.14 se muestra en el Anexo #3.

En la Figura 2.14 se muestra un diagrama en tres dimensiones donde se refleja la potencia eléctrica a través de un día dando como resultado la energía consumida y sus respectivos costos basados en la Tabla 11 donde se detalla el costo de las tarifas eléctricas dependiendo la hora del uso.

2.2.2. Programa para el cálculo del menor consumo de energía eléctrica

Se diseñó un programa que realiza la distribución de las líneas de producción, colocando en primer lugar las más eficientes y que tengan un menor consumo de energía eléctrica con los horarios más óptimos donde el precio de la energía sea bajo.

Se tiene en cuenta que los equipos tienen su tiempo de arranque y parada considerados en el programa.

Se deben ingresar las toneladas que se deseen de manera diaria y si existen equipos que estén fuera del sistema (dañados o en mantenimiento). Con "1" si está funcionando y "0" si están fuera del sistema. Como se muestra en la Tabla 12.

INGRESO DE EQUIPOS FUERA O DENTRO DEL SISTEMA								
Eq 11	Eq 12	Eq 21	Eq 22	Eq 23	Eq 00	Eq 31	Eq 32	Eq 33
0	1	0	0	1	1	1	1	0

Producción requerida (toneladas)	4000
----------------------------------	------

Tabla 12. Modelo de ingreso para utilización del programa.

Los resultados del programa muestran la energía que se consumirá, el menor precio del consumo, las toneladas totales que se producen y las toneladas que se almacenarán.

Cuando se llega a la meta de producción que se solicita se indican cuáles son las máquinas que salen del sistema y en el horario respectivo, por medio de una tabla dinámica donde indica que equipo está funcionando y en la hora respectiva.

El programa priorizará siempre la línea más eficiente que es la L1. Si llegan a salir uno de los equipos, el programa busca esa línea y la saca del sistema realizando el cálculo respectivo con las líneas

restantes, teniendo en cuenta la capacidad máxima que tiene cada una de ellas.

El programa calcula las toneladas con sus respectivos precios de consumo eléctrico de acuerdo a la hora que estará encendido y escoge el menor precio y lo muestra.

El propósito es realizar la producción en el horario donde la tarifa sea la más económica y con un mejor consumo de energía eléctrica, para así asegurarse que existe una producción óptima.

Equipo	Eq 11	Eq 12	Eq 21	Eq 22	Eq 23	Eq 00	Eq 31	Eq 32	Eq 33
22:00	IN	IN	OUT	IN	IN	IN	IN	IN	IN
23:00	IN	IN	OUT	IN	IN	IN	IN	IN	IN
00:00	IN	IN	OUT	IN	IN	IN	IN	IN	IN
01:00	IN	IN	OUT	IN	IN	IN	IN	IN	IN
02:00	OUT	IN	OUT	OUT	IN	OUT	OUT	OUT	IN
03:00	OUT	IN	OUT	OUT	IN	OUT	OUT	OUT	IN
04:00	OUT	IN	OUT	OUT	IN	OUT	OUT	OUT	IN
05:00	OUT	IN	OUT	OUT	IN	OUT	OUT	OUT	IN
06:00	OUT	IN	OUT	OUT	IN	OUT	OUT	OUT	IN
07:00	OUT	IN	OUT	OUT	IN	OUT	OUT	OUT	IN
08:00	OUT	OUT	OUT	OUT	OUT	OUT	OUT	OUT	OUT
09:00	OUT	OUT	OUT	OUT	OUT	OUT	OUT	OUT	OUT
10:00	OUT	OUT	OUT	OUT	OUT	OUT	OUT	OUT	OUT
11:00	OUT	OUT	OUT	OUT	OUT	OUT	OUT	OUT	OUT
12:00	OUT	OUT	OUT	OUT	OUT	OUT	OUT	OUT	OUT
13:00	OUT	OUT	OUT	OUT	OUT	OUT	OUT	OUT	OUT
14:00	OUT	OUT	OUT	OUT	OUT	OUT	OUT	OUT	OUT
15:00	OUT	OUT	OUT	OUT	OUT	OUT	OUT	OUT	OUT
16:00	OUT	OUT	OUT	OUT	OUT	OUT	OUT	OUT	OUT
17:00	OUT	OUT	OUT	OUT	OUT	OUT	OUT	OUT	OUT
18:00	OUT	OUT	OUT	OUT	OUT	OUT	OUT	OUT	OUT
19:00	OUT	OUT	OUT	OUT	OUT	OUT	OUT	OUT	OUT
20:00	OUT	OUT	OUT	OUT	OUT	OUT	OUT	OUT	OUT
21:00	OUT	OUT	OUT	OUT	OUT	OUT	OUT	OUT	OUT

Tabla 13. Resultados del programa para producir 4000 toneladas.

En la Tabla 13 se muestra un ejemplo cuando se solicitan 4000 toneladas de producción como resultado ingresa la línea 1 y la línea 2, teniendo encendidos los equipos de la línea 2 por 4 horas y la

línea 1 (la más eficiente) por 10 horas, operando en el horario de precio más bajo de las tarifas.

2.3. Análisis de motores mediante variables de estado

El análisis que se propone plantea una relación entre el consumo energético de la máquina de inducción y la producción asociada al torque desarrollado. Para ello, hizo uso de la plataforma Simulink - Matlab para desarrollar un sistema modelado con diagrama de bloques que simule el comportamiento estático de la máquina de inducción.

Se utilizaron datos cronológicos de variables, como: (i) la energía absorbida por unidad de tiempo, (ii) la producción o carga asociada en el mismo intervalo, (iii) velocidad en el eje del motor, (iv) corriente medida en los terminales de entrada y finalmente (v) torque medido en él.

Dicha información, en conjunto a los respectivos datos de placa, fueron facilitados por la empresa cementera.

2.3.1. Metodología aplicada en el estudio propuesto

Para el respectivo proceso se realizará un trabajo dual, en el cual se tratará los datos históricos con un método estadístico para identificar variables de alto grado de interés. Se utiliza el modelo simplificado del motor asíncrono para obtener analíticamente los valores necesarios para la comparación, puesto que las pérdidas en el núcleo (ramal shunt del modelo) no dependen de la variación de carga, no serán puestas en consideración para el estudio. (Capítulo 1, sección 7).

Una de las variables principales será la energía consumida por el motor, la cual puede ser definida como integral de la Potencia Eléctrica en el tiempo (Ver ecuación 2.9).

$$E_c = \int P_i(t) * dt \quad (2.9)$$

Donde:

Ec: Energía eléctrica consumida en un intervalo de tiempo.

Pe: Potencia eléctrica absorbida por el motor.

Recurriendo al modelo simplificado del motor asíncrono, es posible definir las siguientes tres ecuaciones.

$$P_i = \frac{3 * V_i^2}{\left(r_1 + \frac{r'_2}{s}\right)^2 + X_{cc}^2} * \left(r_1 + \frac{r'_2}{s}\right) \quad (2.10)$$

Definición de Potencia consumida del Motor de Inducción. Ver ecuación 2.10.

$$T_e = \frac{3 * r'_2}{s * \omega_s} * \frac{V_i^2}{\left(r_1 + \frac{r'_2}{s}\right)^2 + X_{cc}^2} \quad (2.11)$$

Definición de Torque desarrollado en Motor de Inducción. Ver ecuación (2.11).

$$I = \frac{V_i}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{r'_2}{s}\right)^2 + X_{cc}^2}} \quad (2.12)$$

Definición de Corriente Eléctrica desarrollada en Motor de Inducción. Ver ecuación 2.12.

Donde las variables usadas son:

r_1 : Resistencia del estator de la máquina.

r_2 : Resistencia del rotor de la máquina referido al estator.

X_{cc} : Reactancia de estator en conjunto a la del rotor referida al estator.

V_i : Tensión línea a neutro de la red que alimenta al motor

ω_s : Velocidad angular del campo giratorio, proporcionada por la frecuencia de la red.

s : Deslizamiento entre velocidad del campo giratorio y velocidad angular del rotor.

Para el respectivo enlace entre carga y máquina, ha de ser considerada la ecuación de balance de torques (ver ecuación 2.13).

$$T_e - T_l = J \frac{d\omega_r}{dt} \quad (2.13)$$

Donde las variables usadas son:

T_e : Torque eléctrico desarrollado por el motor.

T_l : Torque resistente asociado a la carga.

J : Momento de Inercia de las masas del sistema en cuestión.

ω_r : Velocidad angular del rotor.

2.3.2. Aplicación de la metodología para variables de estados

Teniendo en cuenta que el manejo de mayor volumen de producción está asociado a la una mayor potencia desarrollada en el eje, el modelo que se propone tiene como variable de entrada el torque de carga, cuya variación provocará alteraciones en las corrientes de línea y la potencia de entrada de la máquina analizada.

La variable que se enlazará para tener un punto común entre los datos calculados y los datos históricos será la velocidad en el rotor, debido a que el único elemento que se considera variable en las expresiones 2.10, 2.11 y 2.12, es el deslizamiento, el cual es función de la velocidad del rotor.

Para la elección del valor de velocidad que se utilizará para tomarlo como eje de estudio, se realiza un reordenamiento de datos (de menor a mayor) en los valores presentes en datos históricos, obteniendo, para el primer motor de análisis, una gran cantidad de valores de velocidad se aloja en la vecindad de las 900 revoluciones por minuto, tal como se puede ver en Figura 2.15.

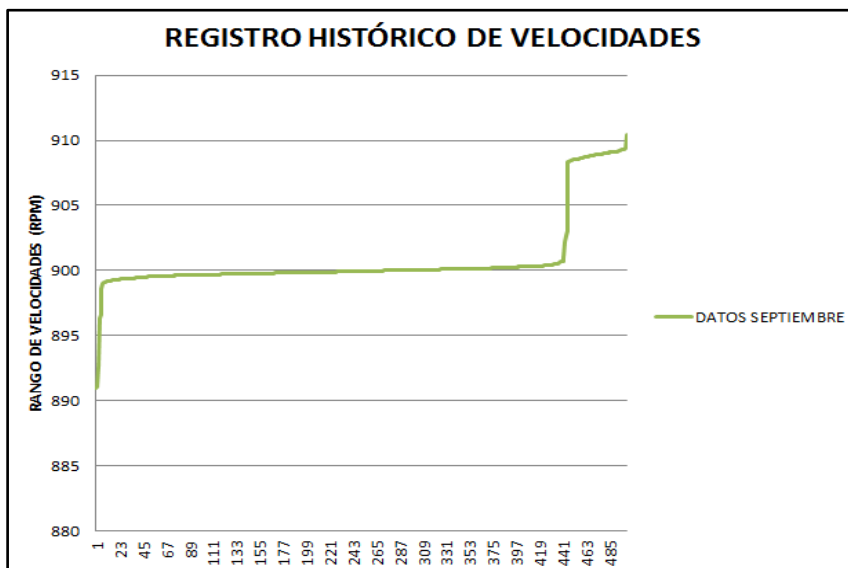


Figura 2.15 Registro Histórico de Velocidades en Rotor.

En la Figura 2.15 es posible identificar la dinámica de la tendencia de agrupación de datos, sin embargo, en la Tabla 14 se muestra, entre otras cosas, el valor de la moda.

	MIN	MAX	PROM	MODA
Veloc. Rotor	890.93	910.44	900.92	899.69
Deslizamiento	10.91%	8.96%	9.91%	10.03%

Tabla 14. Presentación de datos mínimos, máximos, promedio y moda sobre valores en Vector de Velocidad de Rotor.

En la Tabla 14 se muestran los datos de velocidad de rotor y de deslizamiento mínimos, máximos, promedio y moda.

Las variaciones calculadas en el modelo analítico serán utilizadas para compararse con los datos análogos obtenidos de un histórico de funcionamiento. Con esto se podrá determinar, por horarios, en que puntos se crean mayores corrientes de línea de las necesarias para realizar un trabajo en particular, la diferencia de potencia consumida por el motor y la eficiencia teórica que debería desarrollar el motor para el punto analizado.

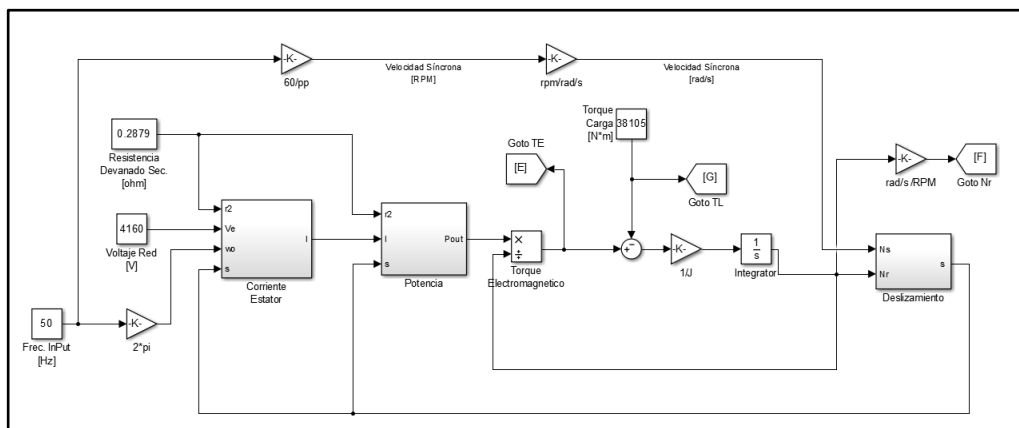


Figura 2.16 Bloque de Variables, Variaciones de Torque, Variaciones de Velocidad.

En la Figura 2.16 se indican los bloques de variables que conforman el lazo de variación de carga y variación de velocidad en el rotor. Este diagrama contiene 3 subsistemas, dentro de ellos es posible observar las variables aplicadas en diagrama de bloques para obtener la señal especificada en cada salida.

El objetivo es poder analizar las situaciones que ocurren internamente en el motor e inferir los problemas asociados mediante la comparación del modelo obtenido con los datos cronológicos que se poseen. Será entonces posible utilizar el modelo presentado en la Figura 2.16, con el cual se pueda analizar los datos anómalos que sucedan en la vida útil de la máquina analizada.

2.4. Metodología para recuperación de energía en un horno rotatorio

En esta sección se pretende realizar una metodología para recuperar la energía de uno de los tres hornos rotatorios que tiene la Planta Cementera de nuestro caso de estudio. La razón para escoger el horno número 2, en vez del uno y el tres es porque dicho horno genera las mayores pérdidas de energía en la Planta y sería conveniente compensar esas pérdidas utilizando este método. El horno rotatorio está revestido de material refractario con un diámetro de 4.35 m. Tienen un ángulo de inclinación de 2° y su velocidad de rotación se encuentra dentro del rango de 4 a 4.5 rpm. Los precalentadores

son del tipo ciclón y son usados para precalentar la materia prima antes de que ingrese al horno. La temperatura de ingreso es de 850°C para la formación del Clinker y la temperatura de salida en de aproximadamente 1,500°C, el material pasa por la enfriadora y sale a una temperatura de 220°C.

2.4.1. Auditoría de energía y recuperación de calor en hornos

La auditoría de la energía se realiza mediante el estudio del balance termodinámico de energía en el sistema del horno rotatorio, analizando las entradas y salidas de los calores residuales.

Balance de energía

Se realizó el análisis termodinámico del sistema de horno rotatorio, considerando condiciones de trabajo estable, las entradas de aire falso insignificantes y descuidando los cambios de temperatura ambiente.

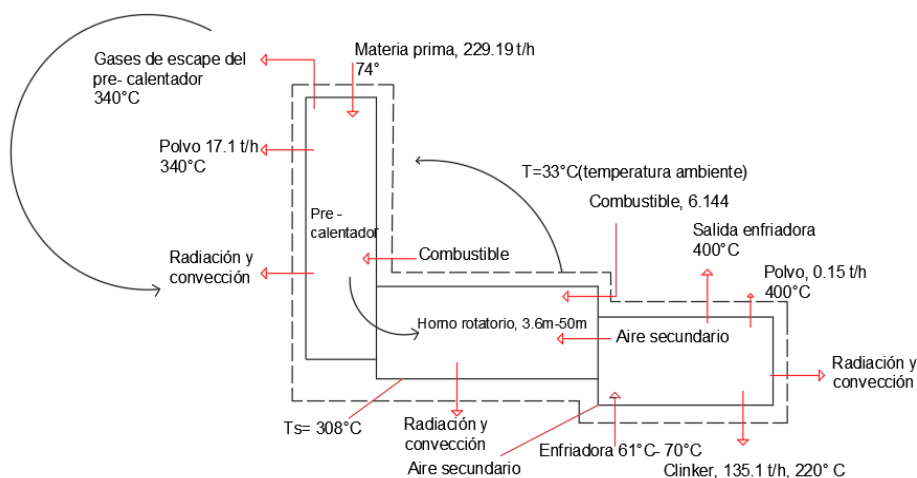


Figura 2.17 Calores residuales del sistema del horno rotatorio.

En la Figura 2.17 se muestra el sistema de calor y componentes del sistema de horno. Así como las entradas y salidas del sistema de horno, donde en el precalentador ingresa la materia prima y los combustibles; al tiempo que salen los gases y el calor por radiación y convección. En el horno ingresa la materia prima que sale del

precalentador y los combustibles; y salen el Clinker y el calor por radiación y convección. En la siguiente fase del proceso, en la enfriadora ingresan aire fresco y el Clinker que salen del horno; mientras se producen gases calientes, el Clinker enfriado y el calor por radiación y convección.

Los datos para realizar el balance térmico del horno rotatorio fueron registrados en enero del 2018. Para una mejor comprensión de las propiedades físicas y ecuaciones de capacidad calorífica y calor específico, el lector puede dirigirse al Handbook de Peray [12].

Nuestro análisis usa la ecuación 2.13 de capacidad calorífica y calor específico que se presenta a continuación:

$$Q = m * C * \Delta T \quad (2.13)$$

Donde:

Q: Calor específico [kJ/Kg-clinker]

m: masa del material [kg/kg-clinker]

C: Poder calorífico [kJ/Kg°C]

T: Variación de la temperatura del material [°C]

La Tabla 15 muestra los resultados del balance de energía realizados en el precalentador, horno y enfriadora con respecto a los calores entrantes.

Calor entrante	Resultando [kJ/Kg-clinker]	Equivalencia
Combustión del combustible	2,937	96%
Calor sensible del combustible	4.5	0.15%
Calor de materia prima	81.5	2.67%
Calor de aire primario	7.3	0.24%
Calor de aire de enfriadora	28	0.92%

Total de calor de entrada	3,058.3	100%
----------------------------------	----------------	-------------

Tabla 15. Balance energético de los calores de entrada en el horno

La Tabla 15 se muestran los resultados del balance de energía realizados en el precalentador, horno y enfriadora con respecto a los calores entrantes.

Calor entrante	Resultando [kJ/Kg-clinker]	Equivalencia
Formación de Clinker	1,75	57.2%
Escape de gases de horno	620.6	20.3%
Humedad de los materiales	30.3	0.99%
Aire caliente enfriadora	396	12.9%
Pérdidas de calor del polvo	40.8	1.33%
Calor descarga de Clinker	169	5.53%
Radiación y convección de superficie de horno	121.3	4%
Radiación y convección de superficie del precalentador	227	7.42%
Calor de la superficie de enfriadora	26.6	0.87%
Ducto aire terciario	21.4	0.7%
Combustión incompleta	10.5	0.34%
Pérdidas del sistema	355.2	11.6%
Total de calor de salida	3,058.3	100%

Tabla 16. Balance energético de los calores de salida en el horno.

La Tabla 16 muestra los resultados del balance de energía realizados en el precalentador, horno y enfriadora con respecto a los calores salientes.

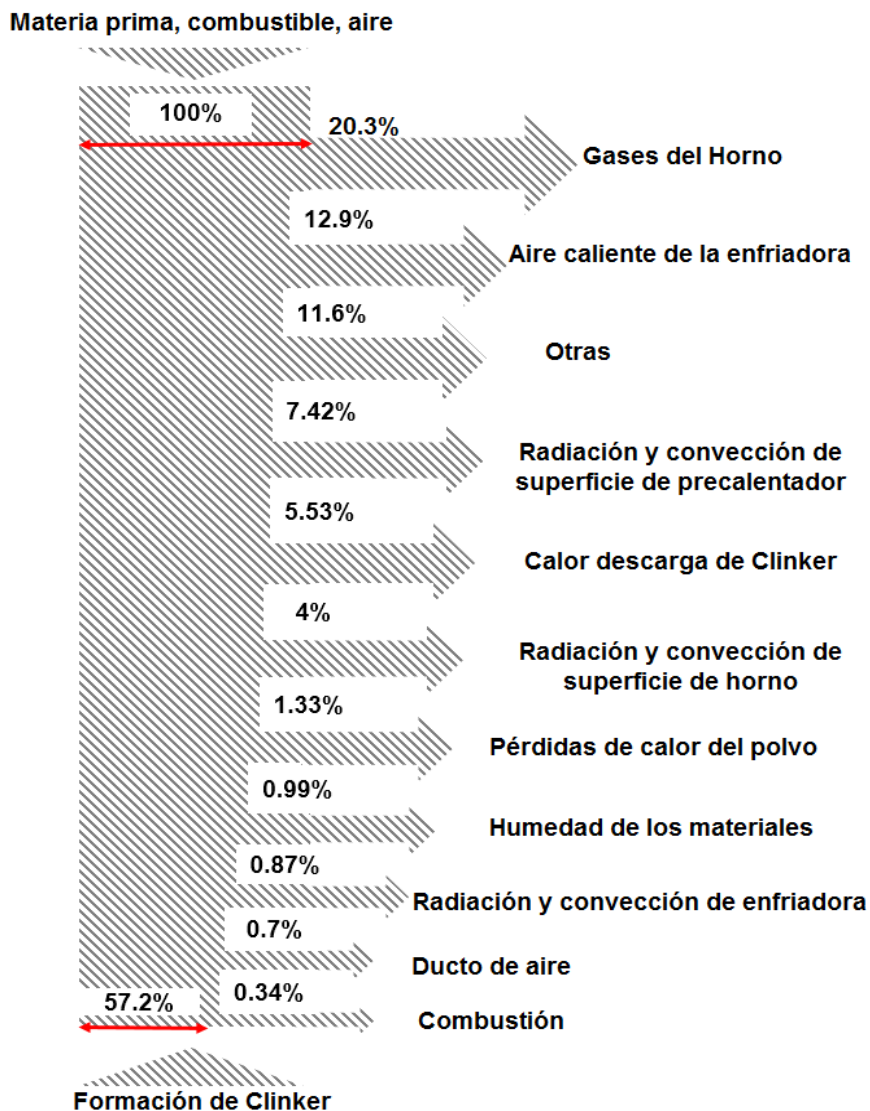


Figura 2.18 Diagrama Sankey - Balance de energía

En la Figura 2.18 se muestra un diagrama de Sankey con respecto al balance de energía que se realizó en el sistema de horno rotatorio con respecto a la materia prima que ingresa y al producto final y las pérdidas de calor que se produjeron en el proceso.

2.4.2. Recuperación de calor en el sistema de horno

La eficiencia del sistema se define por la ecuación 2.14 a continuación:

$$n = \frac{Q_{\text{formación de clinker}}}{Q_{\text{total de entrada}}} \quad (2.14)$$

Donde se utilizan los datos de calor del Clinker de la Tabla 16 y el calor total de entrada de la Tabla 15.

$$n = \frac{1,750.0}{3,058.3} = 0.572$$

Como resultado nos da una eficiencia del sistema de 57.2% que puede considerarse relativamente bajo con respecto a cementeras a nivel mundial. La eficiencia del horno puede aumentar realizando la recuperación de pérdidas de calor como son, entre otras: (i) Gases que salen del horno (20.3%). (ii) Radiación de las superficies del horno (4%). (iii) Gases calientes salientes de la enfriadora (12.9%) [13].

CAPITULO 3

3. RESULTADOS

El capítulo dos indica las metodologías para encontrar las pérdidas de energía y donde se encuentran las oportunidades de ahorro energético, en este capítulo se muestran los resultados de cada análisis energético realizado como se presenta en el capítulo dos. El capítulo consta de las siguientes secciones. La sección 3.1 trata sobre encontrar las posibles oportunidades de mejora para el ahorro energético por medio de un análisis estadístico. La sección 3.2 trata sobre los resultados de la elaboración de un programa para la optimización de consumo de energía eléctrica, dependiendo de la producción de cemento requerida, basada en el pliego tarifario. La sección 3.3 trata sobre encontrar las pérdidas eléctricas y mecánicas de los motores de mayor consumo de la planta cementera. La sección 3.4 trata sobre los resultados de las alternativas de ahorro energético por medio de la recuperación de calor residual saliente del sistema del horno rotatorio dos de la planta.

3.1. Oportunidades de mejora para ahorro energético

En la Tabla 17 se muestra el cálculo del ahorro de la energía (ver capítulo 2, sección 1) que equivale a la sumatoria de la energía en la molienda de Crudo total, Clinkerización, molienda de cemento total y prensa, que fue donde posibles oportunidades de ahorro de energía dan como resultado de 24,026.7 [kWh], representando 3.5% del consumo total en la planta y un ahorro en costo de \$ 72,080.1 dólares mensuales.

El cálculo detallado del ahorro energético en cada área se encuentra detallado en el Anexo #4.

Equipo	Línea base de consumo			Línea meta de consumo			Ahorro		Porcentaje de ahorro con respecto al ahorro total		Porcentaje de ahorro con respecto al consumo total	
	Razón de cambio	Factor de correlación	Error	Razón de cambio	Factor de correlación	Error			%	%	%	%
	[kWh/t]		[+/- kWh]	[kWh/t]		[+/- kWh]	kWh	kWh				
Eq ₁₁	20.92	0.93	2.35	19.12	0.92	1.88	2,015	3,021	8.39	12.57	0.29	0.44
Eq ₁₃	17.02	0.90	2.42	15.11	0.87	4.05	1,006		4.19		0.15	
Eq ₂₁	23.78	0.78	2.28	17.65	0.84	1.24	1,005	13,002	4.18	54.12	0.15	1.89
Eq ₂₂	25.81	0.94	1.68	26.45	0.99	0.69	6,599		27.46		0.96	
Eq ₂₃	19.56	0.93	2.20	18.93	0.94	6.24	5,398		22.47		0.79	
Eq ₃₁	29.77	0.94	2.90	29.47	0.99	8.42	3,56	8,004	14.82	33.31	0.52	1.17
Eq ₃₂	35.51	0.99	1.80	32.58	1.00	10.06	1,23		5.12		0.18	
Eq ₃₃	34.29	0.95	2.51	32.53	0.96	9.34	1,668		6.94		0.24	
Eq ₀₀	7.42	0.80	4.17	7.13	0.82	7.34	1,547		6.44		0.23	

Tabla 17. Datos condensados del cálculo del ahorro energético

En la Tabla 17 se muestran los resultados de las ecuaciones de la línea base y línea meta en cada una de las áreas de producción de cemento, se detallan los errores máximos y los factores de correlación.

Objetivos, metas y planes de acción energéticos

Para la realización de los objetivos, metas y planes de acción se tienen en cuenta las áreas principales consideradas como vulnerables a partir del estudio para encontrar los USE.

Para comenzar con el sistema de gestión energética se escogen tres objetivos, los cuales será detallados a continuación.

Objetivo 1	Reducir el consumo de energía eléctrica en la industria mediante el uso eficiente de las instalaciones, equipos e incentivando al personal a comprometerse con el ahorro de la energía.
Meta 1	Obtener una reducción del consumo de energía eléctrica en todos los sistemas del área de producción de la planta, teniendo una totalidad de 3,5% de ahorro energético.
Meta 2	Obtener una reducción del consumo de energía eléctrica en los motores pertenecientes a todos los sistemas del área de producción de la planta.
Meta 3	Obtener una reducción del consumo de energía eléctrica revisando el cumplimiento de la planificación energética.

Tabla 18. Plan de acción #1 para la industria.

El objetivo número 1 presentado en la Tabla 18 se encuentra dividido en tres etapas con un porcentaje de ahorro total de 3,5% en las áreas de producción, lo que equivale a 24,026.7 [kWh].

Objetivo 2	Desarrollar programas de capacitación en la industria mediante procesos de recopilación, comunicación, análisis y reporte de resultados, los cuales están relacionados a los temas más relevantes sobre sistemas de gestión energética.
Descripción de las actividades	
Meta 1	Impartir capacitación de eficiencia energética a la totalidad de los trabajadores y operarios.

Tabla 19. Plan de acción #2 para la industria.

El objetivo 2 que se muestra en la Tabla 19 tiene como meta brindar capacitaciones a todo el personal de la empresa donde el gerente de producción tendría el papel de implementación como responsable del cumplimiento del SGEEn, tratando en lo posible de recordar al personal la mayoría de cosas aprendidas de una forma metodológica.

Se inicia dando una introducción básica de la norma ISO 50001 y todos los parámetros encontrados en este tiempo de ejecución del proyecto.

Objetivo 3	Implementar la Norma ISO 50001 Sistemas de Gestión de Energía.
Descripción de las actividades	
Meta 1	Basándose en los requisitos de la Norma ISO 50001, realizar un estudio de diagnóstico.
Meta 2	Realizar una planificación para la implementación de dicha Norma, teniendo en cuenta la creación de los documentos necesarios siendo estos aprobados por la empresa.
Meta 3	Implementar la Norma en la empresa y obtener un diagnóstico final.

Tabla 20. Plan de acción #3 para la industria.

El objetivo 3 se muestra en la Tabla 20 que implica la implementación de la Norma ISO 50001 para obtener una eficiencia en el Sistema de Gestión de Energía.

Causas de las pérdidas de energía

Bajo factor de carga

No toda la energía que recibe un motor de la línea se convierte en energía mecánica, en el proceso de conversión se presentan pérdidas por lo que la eficiencia no será del 100%. Se consume, y por tanto se paga, inútilmente la energía utilizada para hacer funcionar al motor.

Motor	Mínimo	Máximo
Motor de enfriadora	15%	43%
Motor de Horno	20%	79%
Motor de filtro de horno 1	20%	38%
Motor de filtro de horno 2	36%	54%
Motor de ventilador de molino	23%	83%
Motor de molino de cemento	47%	79%
Motor de ventilador de molino de cemento	62%	83%

Tabla 21. Factor de carga para motores principales

En la Tabla 21 se muestra el análisis realizado para siete motores principales de la industria, y se puede observar que cada motor tienen factor de carga mínimo y máximo, los cuales se concluye que son bajos tomando de referencia que el factor de carga de los motores deben ser mayor al 70% [9].

Entradas de aire falso

Estas entradas suceden por problemas de filtración de aire ambiente en los equipos producto del mal estado de conductos y/o sellos. Este aire adicional se denomina “aire falso” que trae como consecuencia un control errado del proceso, una caída adicional de presión y temperatura de los gases y un aumento en la potencia eléctrica de los ventiladores de tiro que normalmente llevan el material al siguiente proceso.

Operación de equipos en vacío

Se da cuando los equipos están encendidos sin estar teniendo una carga o realizando una producción. El problema básicamente se da por la falta de coordinación de los controladores de dichos equipos, teniendo como consecuencia un consumo eléctrico y una producción de cero toneladas.

Daño en los equipos

La falta de mantenimiento se debe a la escasez de recursos, personal, repuestos entre otros elementos; haciendo que los mantenimientos se pospongan o se dé solo cuando el equipo deje de funcionar.

Fugas de material

Las fugas de material en las bandas se deben controlar, ya que pueden dañar los rodillos haciendo que la banda se detenga, y por ende los equipos siguientes, ocasionando una parada en equipos principales.

Granulometría del material

Cuando la granulometría del material está fuera de las especificaciones de la empresa, siendo muchas veces más grande, puede ocasionar un problema en la operación de los equipos, por ejemplo, en las trituradoras puede dañar los

martillos haciendo una deformidad y logrando que el material pase sin ser triturado en su totalidad.

3.2. Metodología de optimización de energía eléctrica en base al pliego tarifario

Para realizar una optimización de consumo de energía eléctrica (capítulo 2, Sección 2) se elaboró un programa en la plataforma de Matlab. En el mismo se ingresa la producción que se requiere para un día y los equipos que se encuentren fuera de servicio para ese día; a partir de ello se generan los resultados de hora y duración de operación de cada equipo, utilizando el pliego tarifario para industrias.

Para ejemplo práctico se muestra el resultado para 9,000 toneladas de producción y ningún equipo fuera de servicio.



Figura 3.1 Curva de producción vs. Tiempo para 9000 toneladas de producción.

En la Figura 3.1 se haya la primera gráfica que da el programa, producción (toneladas) vs. Tiempo (horas). La línea azul indica la tendencia del tiempo de operatividad con respecto a la producción que genera.

Se calculan la energía consumida y el costo para todas las combinaciones de líneas del sistema de producción de la planta (ver Tabla 22), las gráficas de

producción vs. Tiempo de la totalidad de los equipos se encuentran en el Anexo #5, de donde el sistema escoge las líneas que tengan un menor consumo energético. Para este caso de la combinación más económica que satisface la demanda de producción es la línea L1 y L3, cuyos gráficos de producción vs. Tiempo se muestran en la Figura 3.2.

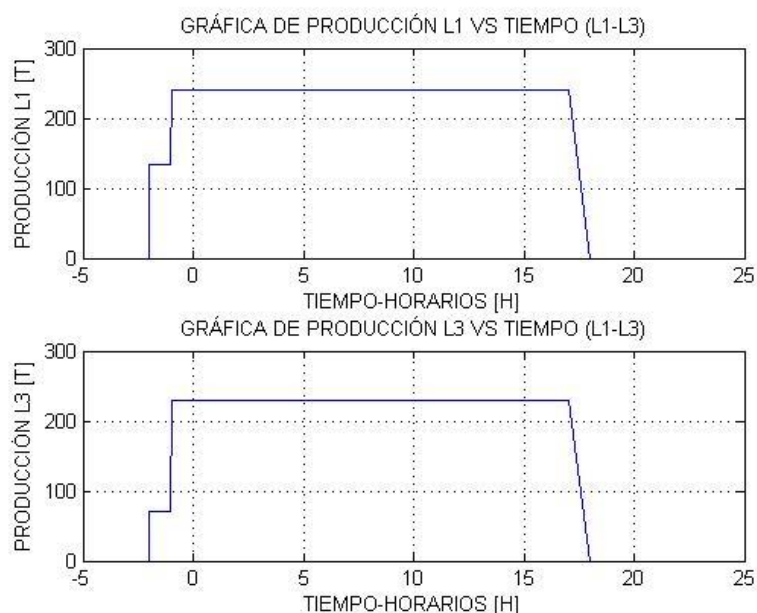


Figura 3.2 Curvas de producción vs. Tiempo de las líneas L1 - L3

En la Figura 3.2 se muestra la tendencia de producción (línea azul) a través de las horas de operatividad de los equipos pertenecientes a esas líneas.

La cantidad de toneladas producidas será de 9,134.3 por lo que serán almacenadas 134.3 toneladas; dando un consumo de energía de 578.63 MWh y un costo económico de 44.07 KUSD. Los resultados se muestran en el Anexo #5.



Figura 3.3 Curva de producción vs. Tiempo de operatividad de equipo C3.

En la Figura 3.3 se muestran los tiempos de operatividad para el equipo C3, las horas en que está trabajando y las horas que tiene fuera de servicio.

Para el resto de equipos las curvas de tiempo de operatividad se encuentran en el Anexo #5.

Combinación de líneas	Energía [MWh]	Costo [KUSD]	Ahorro energía
L1 - L2	592.61	45.63	3.5%
L1 - L3	578.63	44.07	-
L1 - L4	591.72	45.56	3.5%

Tabla 22. Ahorro de consumo de energía eléctrica para producción de 9,000 toneladas de cemento.

En la Tabla 22 se muestran los consumos de energía eléctrica y los costos asociados a cada una de las combinaciones posibles en el sistema de producción de la planta cementera, mostrando que la combinación eficiente son las líneas L1– L3, que tiene un consumo energético de 578.63 [MWh] con un

costo de 44.07 [MUSD]. Se puede tener un ahorro de energía del 3.5% y por ende un ahorro de costos del 4%.

En el Anexo #6 se muestran los cálculos y las gráficas respectivas para una producción de 4,000 toneladas de cemento y el equipo Eq32 fuera de servicio, por lo que no se puede trabajar con la línea L4, donde la combinación eficiente son las líneas L1 – L2, teniendo un ahorro energético de 29%.

En el Anexo #7 se muestran los cálculos y las gráficas respectivas para una producción de 5,000 toneladas de cemento y el equipo Eq22 fuera de servicio, por lo que no se puede trabajar con la línea L2, donde la combinación eficiente son las líneas L1 – L4 con un ahorro energético de 24%.

3.3. Metodología de variables de estado para pérdidas en motores

Análisis basado en simulación con datos de cada motor

Siguiendo la metodología para el análisis de pérdidas en los motores por medio de variables de estado (Capítulo 2, Sección 3) se evalúan los parámetros eléctricos en el Anexo #8, pertenecientes a cuatro motores principales de la planta cementera, que son: 564-AP1, 564-VE1, 473-VT1 y 463-AP1.

MOTOR	P-IN [Kw]	P-OUT [Kw]	P-LOSS [Kw]
564-AP1	4,624.9	3,962.2	662.7
564-VE1	2,198.5	2,089.4	109.1
473-VT1	22.002	20.189	1.813
463-AP1	614.75	571.9	42.85

Tabla 23. Valores de Potencia consumida, aplicada y pérdidas en motores

En la Tabla 23 se presentan los valores de potencia activa consumida y potencia desarrollada en el eje para cada máquina estudiada.

La ecuación 3.1 asociada a pérdidas se presenta a continuación:

$$P_{\text{LOSS}} = P_{\text{in}} - P_{\text{out}} \quad (3.1)$$

Dónde:

P_{LOSS} : Pérdidas de la máquina en [kW].

P_{in} : Potencia activa consumida por la máquina [kW].

P_{out} : Potencia imprimida en el eje del motor [kW].

Se logró calcular las pérdidas de los motores, realizando la simulación en el punto de operación de velocidad en rotor especificado. Cabe aclarar que el modelo propuesto no considera condiciones dañinas en la entrada del sistema (Calidad de energía, Desbalance de fases) ni en la salida del mismo (Problemáticas asociadas a fricción o acople mecánico), por lo tanto, las pérdidas eléctricas presentadas en la Tabla 23 hacen referencia a los fenómenos eléctricos internos del motor.

De este análisis se puede ver qué es el primer motor el cual presenta una mayor cantidad de pérdidas eléctricas absolutas y porcentuales entre las cuatro máquinas.

Para ejemplificar, se usó el modelo para evaluar la respuesta de la potencia consumida a un incremento del 5% en el torque de operación actual para cada uno de los motores con valor inicial.

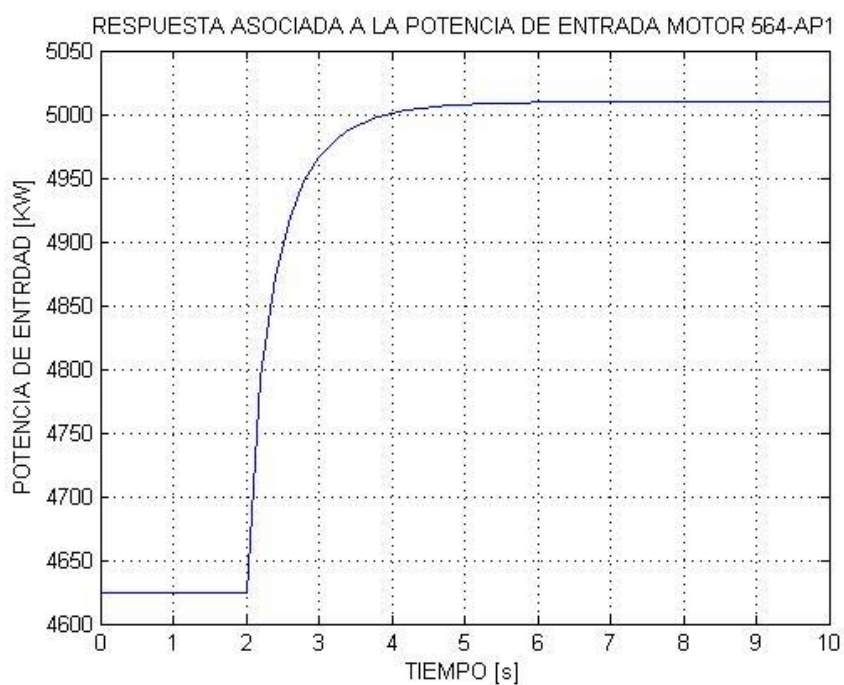


Figura 3.4 Respuesta de Potencia Consumida, incremento de Torque de Carga, motor 564-AP1

En la Figura 3.4, se muestra como la variación de torque lleva al motor a consumir una potencia cercana a los 5000 KW (valor nominal) para compensar la diferencia de torques.

Las respuestas gráficas obtenidas de los motores 564-VE1, 473-VT1 y 463-AP1, pueden ser encontradas en el Anexo #8.

Análisis comparativo entre variables simuladas y valores históricos

Se realizó un análisis comparativo entre las velocidades y corrientes, simuladas y medidas, a partir de una misma potencia de entrada como dato eje.

Potencia de entrada [KW]	Velocidades medidas [rad/s]	Velocidad calculada [rad/s]	Porcentaje de error - velocidades
4,002.038	943.195	96.724	-2.49%
	942.252		-2.58%
	942.171		-2.59%
	942.130		-2.60%
	942.599		-2.55%
4,134.381	942.483	96.279	-2.11%
	943.236		-2.03%
	942.859		-2.07%
	942.344		-2.12%
	942.680		-2.09%
	942.489		-2.11%
	941.699		-2.19%
4,153.459	941.634	96.213	-2.13%
	942.235		-2.07%
	941.683		-2.13%
	951.724		-1.08%
	942.491		-2.04%
	942.168		-2.07%
	942.652		-2.02%
4,315.969	942.544	95.609	-1.42%
	942.832		-1.39%
	952.231		-0.40%
	951.637		-0.47%
	952.180		-0.41%
	942.188		-1.45%

Tabla 24. Comparativa de Velocidades, Potencia como eje, motor 564-AP1

En la Tabla 24 se presentan cuatro diferentes valores de potencia consumida por los motores, así como los distintos valores de las variables medidas de interés, y se comparan con el valor simulado respectivo.

En este caso, todos los errores calculados muestran un valor negativo y que oscila en 2%. Se puede inferir entonces un perceptible problema en el rodamiento o de acople a la carga, que genera una menor velocidad esperada.

Potencia de entrada [kW]	Corrientes medidas [rad/s]	Corriente calculada [rad/s]	Porcentaje de error - corrientes
4,002.038	7.011.581	638.153	9.87%
	7.164.909		12.28%
	7.045.681		10.41%
	7.064.800		10.71%
	7.072.280		10.82%
4,134.381	6.899.551	665.728	3.64%
	6.929.326		4.09%
	6.933.130		4.14%
	6.908.883		3.78%
	6.883.955		3.40%
	6.792.643		2.03%
	6.757.552		1.51%
4,153.459	6.946.499	669.739	3.72%
	6.991.927		4.40%
	6.677.257		-0.30%
	6.824.233		1.89%
	6.846.368		2.22%
	6.863.317		2.48%
	6.818.728		1.81%
4,315.969	6.410.641	705.510	-9.13%
	6.565.082		-6.95%
	6.668.048		-5.49%
	6.728.660		-4.63%
	6.786.046		-3.81%
	6.762.883		-4.14%

Tabla 25. Comparativa de Amperaje, Potencia como eje, motor 564-AP1

Los datos presentados en la Tabla 25 muestran un decremento en el error de corriente a medida que la potencia consumida va incrementando desde 4002.038 kW hasta los 4315.969 kW propuestos. Este comportamiento parte del hecho de la existencia de la corriente de magnetización del motor, cuya magnitud se ve opacada mientras más corriente sea utilizada para imprimir una mayor potencia de salida.

Potencia de entrada [kW]	Velocidades medidas [rad/s]	Velocidad calculada [rad/s]	Porcentaje de error - velocidades
2100.563	90.000	91.287	-1.41%
	90.075		-1.33%
	89.725		-1.71%
	90.509		-0.85%
	89.710		-1.73%
2118.056	90.199	91.25	-1.15%
	89.687		-1.71%
	90.830		-0.46%
	90.396		-0.94%
	90.334		-1.00%
	89.775		-1.62%
	90.678		-0.63%
2138.557	90.247	91.207	-1.05%
	90.955		-0.28%
	90.911		-0.32%
	91.172		-0.04%
	91.029		-0.20%
	90.594		-0.67%
	90.722		-0.53%
2198.493	91.464	91.077	0.42%
	91.509		0.47%
	90.960		-0.13%

	90.831		-0.27%
	91.033		-0.05%
	90.974		-0.11%

Tabla 26. Comparativa de Velocidades, Potencia como eje, motor 564-VE1.

Por otro lado, el motor del ventilador 564-VE1 presentó porcentajes de error en la velocidad aún menores (en magnitud) que su predecesor. Estos datos pueden ser revisados en la Tabla 26.

La velocidad del rotor continuó siendo ligeramente menor a la simulada, sin embargo, la cantidad de errores que oscilan el 0% demuestran un mejor estado de los elementos mecánicos asociados a la salida de la máquina. Debido a que no se cuenta con historial sobre la corriente, el análisis a este motor tendrá únicamente un enfoque mecánico.

Potencia de entrada [kW]	Velocidades medidas [rad/s]	Velocidad calculada [rad/s]	Porcentaje de error - velocidades
1859.183	226.461	234.7334	-3.52%
	228.840		-2.51%
	226.585		-3.47%
	227.231		-3.20%
	227.571		-3.05%
1880.999	227.822	234.575	-2.88%
	228.172		-2.73%
	227.948		-2.83%
	227.921		-2.84%
	227.631		-2.96%
	227.912		-2.84%
	227.121		-3.18%
2068.000	237.460	233.132	1.86%

	238.510		2.31%
	239.589		2.77%
	237.448		1.85%
	237.133		1.72%
	238.076		2.12%
	236.900		1.62%
2200.180	245.169	232.009	5.67%
	243.771		5.07%
	241.386		4.04%
	238.518		2.81%
	238.071		2.61%
	238.313		2.72%

Tabla 27. Comparativa de Velocidades, Potencia como eje, motor 473-VT1.

En la Tabla 27 se observa el análisis del motor del ventilador 473-VT1, presenta errores de velocidad que van desde el 3% negativo hasta 5% positivo, a medida que incrementa la potencia absorbida.

Es necesario resaltar que el motor 473-VT1 es uno de los equipos cuya operación está en constante perturbación debido al variador de frecuencia utilizado, pues se emplea un control de Voltaje/frecuencia que reduce considerablemente la velocidad del rotor con respecto a su nominal a 60Hz y así mismo, la potencia consumida esperada a tensión nominal.

Potencia de entrada [kW]	Corrientes medidas [AMP]	Corriente calculada [AMP]	Porcentaje de error - corrientes
1859.183	64.302	56.770	13.27%
	63.822		12.42%
	64.308		13.28%
	64.217		13.12%
	64.197		13.08%

1880.999	64.325	57.528	11.82%
	64.295		11.76%
	64.645		12.37%
	64.418		11.98%
	64.417		11.97%
	64.423		11.99%
	64.437		12.01%
2068.000	66.137	64.240	2.95%
	66.110		2.91%
	65.910		2.60%
	66.227		3.09%
	66.298		3.20%
	66.098		2.89%
	66.172		3.01%
2200.180	67.193	69.210	-2.91%
	67.415		-2.59%
	67.752		-2.11%
	68.227		-1.42%
	68.347		-1.25%
	68.267		-1.36%

Tabla 28. Comparativa de Amperaje, Potencia como eje, motor 473-VT1.

La Tabla 28 muestra la comparativa de corriente y se hallaron errores de hasta un 13% mayor a la simulada en los bloques de menor consumo eléctrico. Esto bien podría ser causado por el motivo previamente descrito, donde parte de la corriente medida está siendo destinada para la magnetización de la máquina, sin embargo, debido a su alto valor de error porcentual, se podría indicar que existe pérdidas significativas de magnetización a valores bajos de potencia de salida.

Potencia de entrada [kW]	Velocidades medidas [rad/s]	Velocidad calculada [rad/s]	Porcentaje de error - velocidades
515.309	101.711	102.836	-1.09%
	101.761		-1.05%
	99.154		-3.58%
	91.329		-11.19%
	86.410		-15.97%
550.309	101.695	102.475	-0.76%
	101.743		-0.71%
	101.746		-0.71%
	101.708		-0.75%
	101.940		-0.52%
	101.660		-0.79%
	101.754		-0.70%
588.104	101.681	102.053	-0.36%
	101.746		-0.30%
	91.366		-10.47%
	101.733		-0.31%
	83.903		-17.78%
	101.743		-0.30%
	101.688		-0.36%
614.522	101.750	101.732	0.02%
	101.728		0.00%
	108.939		7.08%
	101.786		0.05%
	101.726		-0.01%
	101.681		-0.05%

Tabla 29. Comparativa de Velocidad, Potencia como eje, motor 463-AP1.

En la Tabla 29 se muestra el motor 463-AP1 que presentó mayormente errores de velocidad muy cercanos a cero. Sin embargo, también se obtuvo una cantidad reducida de valores aberrantes, que en contraste con los demás, se procedió a no tomar en cuenta.

Potencia de entrada [kW]	Corrientes medidas [A]	Corriente calculada [A]	Porcentaje de error - corrientes
515.309	519.659	499.750	3.98%
	520.048		4.06%
	520.185		4.09%
	519.377		3.93%
	519.842		4.02%
550.309	557.584	538.888	3.47%
	553.661		2.74%
	555.475		3.08%
	559.001		3.73%
	554.303		2.86%
	554.253		2.85%
	556.668		3.30%
588.104	593.976	582.997	1.88%
	592.684		1.66%
	593.315		1.77%
	593.235		1.76%
	593.869		1.86%
	593.895		1.87%
	592.981		1.71%
614.522	618.677	615.346	0.54%
	621.595		1.02%
	620.621		0.86%
	618.336		0.49%

	619.518		0.68%
	620.349		0.81%

Tabla 30. Comparativa de Amperaje, Potencia como eje, motor 463-AP1.

En la Tabla 30 se muestran errores de corriente significativamente bajos, donde como máximo se encuentran valores alrededor de 4% a potencias bajas de salida mientras que el error va tendiendo a cero a medida que la potencia se va aproximando a la nominal, concluyendo un excelente estado del motor 463-AP1.

3.4. Análisis del uso de calor residual recuperar para generar energía

A continuación se muestran tres posibles alternativas para recuperar energía por medio de la recirculación de calor del sistema de Horno en la empresa (Ver Capítulo2, Sección 4).

3.4.1. Uso de generador de vapor de recuperación de calor residual [13]

Se puede recuperar el calor desperdiciado al medio ambiente y utilizarlo para generar energía eléctrica (capítulo 2, sección 4).

La pérdida de calor más significativa es la de los gases salientes del horno el aire fresco de la chimenea sale con una temperatura de 400°C. Esta corriente de gases calientes deben ser dirigidas a un generador de vapor para la recuperación de calor y se usaría para alimentar la turbina de vapor para la generación de la energía.

Se considerará que la eficiencia del generador de vapor es de 85%, la presión de entrada de la turbina es de 8 bar y la temperatura de saturación en un caso límite es de 170°C. De acuerdo con las temperaturas finales de ambas corrientes de aire, las entalpías finales han sido calculadas mediante la siguiente ecuación:

$$Q_{Disponible} = [m_{eg}(h_{eg1} - h_{eg2}) + m_{air}(h_{air1} - h_{air2})] * m_{clk} \quad (3.2)$$

Donde:

m_{eg}: Masa de los gases salientes del horno [kg/kg-clk].

h_{eg1}: Poder calorífico por diferencia de temperatura de los gases salientes del horno iniciales [kJ/kg].

h_{eg2}: Poder calorífico por diferencia de temperatura de los gases salientes del horno finales [kJ/kg].

m_{air}: Masa de los gases salientes de la enfriadora [kg/kg-clk].

h_{air1}: Poder calorífico por diferencia de temperatura de los gases salientes de la enfriadora iniciales [kJ/kg].

h_{air2}: Poder calorífico por diferencia de temperatura de los gases salientes de la enfriadora finales [kJ/kg].

m_{clk}: Masa del Clinker saliente del horno [kg/s].

$$Q_{Disponible} = [1.67 * (371.72 - 175) + 1.0052 * (391.76 - 173)] * 37.53$$

$$Q_{Disponibilidad} = 20,582.20 \text{ kW}$$

$$Q_{WHSRG} = 0.85 * 20,582.20 = 17.5 \text{ MW}$$

La energía que podrá ser transferida al generador de vapor mediante recuperación de calor residual es de 17.5 MW.

3.4.2. Recuperación de calor en la superficie del horno

El calor en la superficie del horno que puede ser recuperado es por pérdidas de radiación y convección (4%). Se analizó el uso de una cubierta secundaria para la superficie del horno que pueda reducir esta pérdida de calor como se muestra en la Figura 3.5 (Ver capítulo 2, sección 4).

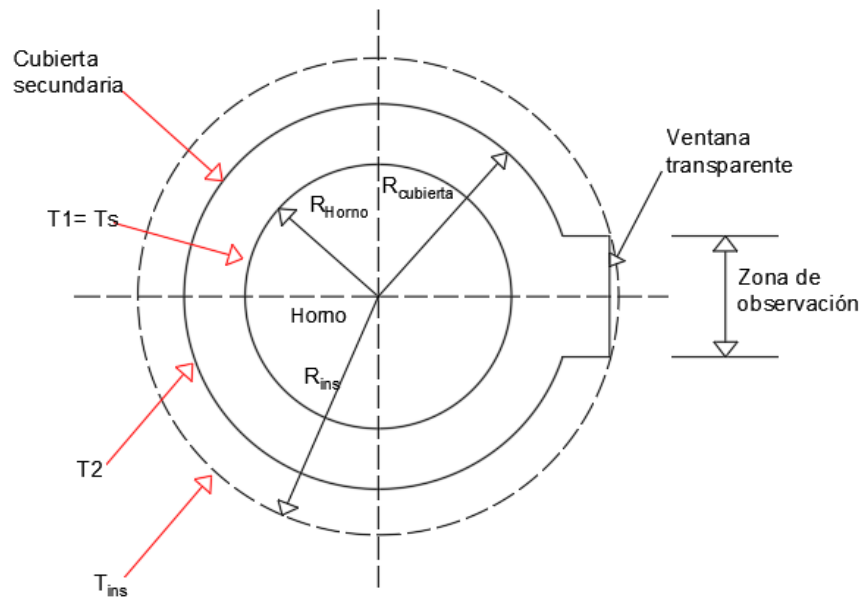


Figura 3.5 Superficies de un horno rotatorio

La Figura 3.5 muestra las capas del horno con sus medidas, el radio del horno (R_{Horno}), el radio de la cubierta principal (R_{Cu}) y el radio de la cubierta a ser instalada (R_{ins}).

Para el horno se tiene, $R_{horno} = 2.175\text{m}$ y el radio de la cubierta principal $R_{cubierta} = 3.277\text{m}$. La distancia de estas dos superficies es de 1.102m . La temperatura secundaria es $T_2 = 563\text{K}$.

La transferencia de calor por radiación es utilizada usando la ecuación 2.16.

$$Q_r = \frac{A_{horno} * \sigma * (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} - \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2} \left(\frac{R_{Horno}}{R_{Cu}}\right)} \quad (3.3)$$

Dónde: $\sigma = 5.67 * 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$, $T_1 = T_s = 581\text{K}$, $\varepsilon_1 = 0.78$ y $\varepsilon_2 = 0.35$.

$$Q_r = 142 \text{ kW}$$

Para el aislamiento de la conductividad térmica se toma $k_{\text{Horno}} = 0.05$ W/mK. La resistencia de aislamiento se calcula con la ecuación 2.17, siendo L_{Horno} la longitud del horno.

$$R_{\text{Aislamiento}} = \frac{\ln\left(\frac{R_{\text{ins}}}{R_{\text{Cu}}}\right)}{2 * k_{\text{Horno}} * \pi * L_{\text{Horno}}} \quad (3.4)$$

Asumiendo la diferencia de temperatura para la cubierta a ser instalada de $\Delta T = 250^\circ\text{C}$. La ecuación 2.18 relaciona la diferencia de temperatura, la energía de radiación y la resistencia de aislamiento.

$$\Delta T = Q_r * \frac{\ln\left(\frac{R_{\text{ins}}}{R_{\text{Cu}}}\right)}{2 * k_{\text{Horno}} * \pi * L_{\text{Horno}}} \quad (3.5)$$

$$R_{\text{ins}} = 3,403 \text{ m}$$

Por lo tanto, el ahorro de energía debido a la cubierta secundaria sería:

$$\left(84.06 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} - \text{clk}}\right) * \left(37.53 \frac{\text{kg} - \text{clk}}{\text{s}}\right) - 142 \text{ kW} = 3,012.77 \text{ kW}$$

Se puede concluir que la segunda cubierta en la superficie del horno ahorraría una energía de aproximadamente 3MW.

Recuperación de gases calientes de la enfriadora

El calor de los gases de la enfriadora representa un 12.9% de pérdidas de energía, con una temperatura que sale al ambiente de 173.3°C según los datos medidos. Por lo tanto se analiza la reutilización de este calor para el proceso de molienda de cemento (Ver capítulo 2, sección 4). Con la ecuación 2.13 se calcula la energía que sale de la enfriadora.

$$Q = 858,312 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} * 153.3^\circ\text{C} * 1.333 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3\text{C}} = 175.85 \text{ MJ/h}$$

La energía que se puede obtener de la salida de los gases de la enfriadora es de 175.85 MJ/h, lo que equivale a 48.85 KW.

El proceso de molienda de cemento necesita un flujo de gases calientes de 186.65 m³/s a una temperatura de 112°C, lo cual es dado por un generador de gases que funciona por medio del combustible diésel, consumiendo una energía de:

$$Q = 671,940 \frac{m^3}{h} * 92^\circ C * 1.333 \frac{kJ}{m^3 \circ C} = 82.89 MJ/h$$

La energía que utiliza el generador de gases es de 82.89MJ/h lo que representa 22.9KW.

Este análisis indica que se puede reemplazar el uso del generador de gases por la utilización de los gases calientes que salen de la enfriadora del horno. Con lo que se podrían ahorrar 2 millones de Galones de diésel y 26,200 tCO₂ de emisiones al ambiente.

En resumen, este capítulo número tres de resultados, los elementos significativos de nuestro estudio son:

Ahorro de energía eléctrica de 24MWh diariamente en la planta cementera, por medio de las posibles soluciones propuestas por medio de un análisis estadístico realizado (Ver Capítulo 3, sección 1).

Programa de optimización de consumo de energía eléctrica en base al pliego tarifario de la empresa distribuidora.

Análisis de los posibles parámetros de las pérdidas eléctricas y mecánicas en motores de gran capacidad de la empresa.

Auditoría de energía térmica para una posible solución de ahorro energético por medio de la recuperación de energía calorífica residual saliente del sistema de un horno rotatorio de la planta cementera.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Por medio los métodos de eficiencia energética bajo la norma ISO 50001 se realizó una revisión energética donde se encontraron los ahorros de energía en cada uno de los equipos principales, obteniendo un ahorro de aproximadamente $720\text{MWh}/t_{\text{cemento}}$ mensuales, lo que representa un ahorro de 4,000 toneladas de CO_2 .

Unas posibles soluciones, para obtener un ahorro energético, son las siguientes: (i) Realizar mediciones de calidad de la energía en motores de mayor consumo para obtener potencia, voltaje, corriente y factor de potencia y así poder realizar el cálculo de la energía consumida real y poder tomar acciones correctivas. (ii) Cambiar el material utilizado para recubrir las entradas de los equipos principales, usar un material no rígido que sea capaz de absorber las vibraciones de los molinos, calibrar las trituradoras de materias primas para que no estén demasiado sensibles y que a los molinos le lleguen el material con la granulometría correcta y pueda formar un “colchón” para que las ruedas no toquen la mesa y no produzcan las vibraciones frecuentes y fuertes en los molinos y a su vez no generen entradas de aire falso. (iii) Cuando la tendencia de la carga en los equipos sea menor al rango de operación normal, deben apagarse después de un tiempo establecido, dependiendo de cada equipo, sea de forma automática o local y así evitar la operación de equipos en vacío. Para poder aplicarse dicha solución se deberá realizar un levantamiento de información de los equipos automatizados y completar dicha metodología para los equipos que no tengan un lazo de control. (iv) Evitar derrames y fugas que provoquen acumulaciones de los materiales que provocan fricción en las partes móviles de los equipos provocando desgastes y atascamientos. Para lograr esto es necesario realizar inspecciones diarias en todas las áreas propensas a dichas fugas de material y atender el reporte de dichos problemas como prioridad. (v) Para evitar que la granulometría del material este fuera de las especificaciones de la empresa se puede realizar calibraciones y mantenimientos semanales de los martillos de las trituradoras para que

no ocasionen daños en las balanzas de material y en los molinos, y así que no tengan que utilizar más energía para reducir el tamaño de dicho material. Por lo tanto es importante realizar toma de muestras en todos los puntos de inspección para percatarse que las calibraciones han sido las correctas.

El programa de optimización del consumo de energía eléctrica es útil al momento de realizar los procesos de producción, ya que indica cuando los equipos deben parar y cuando seguir produciendo, enfocándose en el ahorro económico enmarcándose en los horarios del pliego tarifario, tomando en cuenta la energía que se consume para el arranque y parada de cada equipo, así como elegir cuales son los equipos que tienen menor consumo energético.

Cuando no existen equipos fuera de servicio el programa escoge la combinación de líneas más eficientes del sistema, las cuales pueden obtener ahorros de energía eléctrica de hasta el 4%, que representan 578.63 [MWh], por lo que se podría ahorrar 1,55 [KUSD] del costo total de consumo de energía eléctrica.

El análisis comparativo reflejó una situación peculiar en la maquinaria de mayor capacidad, teniendo en cuenta una eficiencia en operación normal del 85%, se infiere un problema sus devanados por la cantidad de potencia disipada en los mismos, y se recomienda la revisión de los elementos mecánicos asociados al eje y al acoplamiento con la carga debido la caída de velocidad.

El uso de los variadores de frecuencia en la operación continua de los ventiladores dificulta el análisis y determinación de causa problemas debido a la variación de voltaje y frecuencia de alimentación, sin embargo, se sugiere una revisión más profunda de los devanados del motor motor 473-VT1, pues fue el que presentó más variaciones bruscas en el análisis de corrientes y velocidades.

Se realiza un análisis de auditoría energética por medio de un balance térmico aplicado directamente a un horno rotatorio, y de acuerdo con los resultados el sistema tiene una eficiencia de 57.2%. Se encontraron las principales pérdidas de calor, que se encuentran en los gases que salen del horno 20.3%, en la superficie del horno por

radiación y convección 4%, y en los gases salientes de la enfriadora 12.9%. Se propone un sistema convencional de generación de energía por una turbina de vapor que de acuerdo a los cálculos se puede recuperar 17.5 MW. Para la superficie del horno se propone un sistema de cubierta secundaria que llevaría a un ahorro de 3 MW, y para la recuperación de calor residual llevado a un molino se puede obtener un ahorro de dos millones de galones de diésel y aproximadamente 26,000 toneladas de CO₂ de emisiones al ambiente.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] ACOLTZI, Higinio y PÉREZ R, Hugo. Gestión de Energía ISO 50001. Octubre 2011. P.157-161.
- [2] AENOR. Gestión Energética. [En línea] AENOR. [Citado el 13 de Febrero de 2015.] <http://www.aenorecuador.com/gestion-energetica.aspx>.
- [3] BASF. 2011. Eficiencia Energética. The Chemical Company, 2011.
- [4] CISNEROS G., Jennyffer. 2014. Guía para la aplicación de Sistemas de Gestión Energética orientado a la Energía Eléctrica, basado en la Norma ISO 50001. Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. Quito-Ecuador. 2014.
- [5] BORROTO NORDELO, Aníbal y DÍAZ BONIFAZ, Rodrigo. Recomendaciones metodológicas para la implementación de sistemas de gestión de la energía según la norma ISO50001. Cienfuegos: Universo Sur. 2013. ISBN 978-959-257-360-4.
- [6] Luis Fernando Mantilla Peñalba, Juan Antonio Cardona Pardo, “Gestión Energética de los motores eléctricos: mejora de la eficiencia de los accionamientos con el uso de variadores de velocidad”, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética E.T.S.I.I. y T., Universidad de Cantabria.
- [7] Mendenhall, Beaver, Beaver, “Introducción a la Probabilística y Estadística”, Décima tercera edición, CENGAGE Learning.
- [8] Antonio José Sáez Castillo, “Apuntes de Estadística para Ingenieros” Versión 1.3, Departamento de Estadística e Investigación Operativa, Universidad de Jaén.
- [9] Instituto ecuatoriano de normalización, “Eficiencia energética en motores eléctricos estacionarios. Requisitos.” Primera Edición, Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2 498:2009.
- [10] Servicio Público de Energía Eléctrica, “Pliego Tarifario para las Empresas Eléctricas.” Resolución Nro. ARCONEL- 005/18 (Enero - Diciembre 2018), Agencia de Regulación y Control de Electricidad – ARCONEL.

- [11] Instituto ecuatoriano de normalización, "Sistemas de Gestión de la Energía. Requisitos con Orientación para su uso" Primera edición, Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN-ISO 50001:2012.
- [12] Peray KE. Cement manufacturer's handbook. New York, NY: Chemical Publishing Co., Inc.; 1979.
- [13] Energy Conversion & Management, "Energy auditing and recovery for dry type cement rotary kiln systems", Department of mechanical engineering, University of Sakarya, Esentepe Campus.

ANEXO # 1

Requisitos generales de Norma ISO 50001

- Organigrama de la empresa.
- Mapa de instalaciones
- Diagramas de flujo de procesos
- Datos del uso de energía
- Datos del uso de equipos de energía

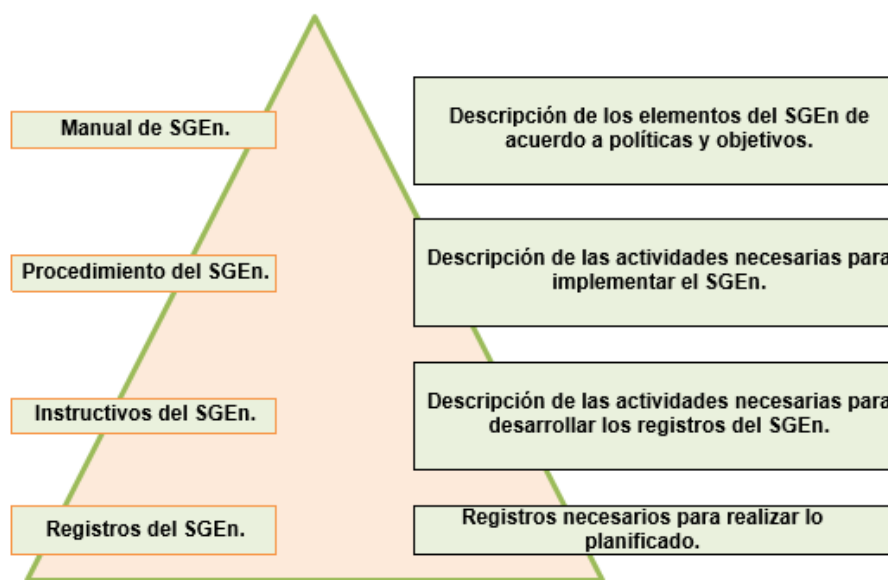


Figura 0. 1 Documentación a desarrollar. Fuente: Norma ISO 50001:2012

Planificación Energética

Los pasos básicos o recomendados para una correcta planificación energética se muestran en la Figura 0. 2. Cabe mencionar que estos pueden modificarse de acuerdo a la empresa a intervenir.

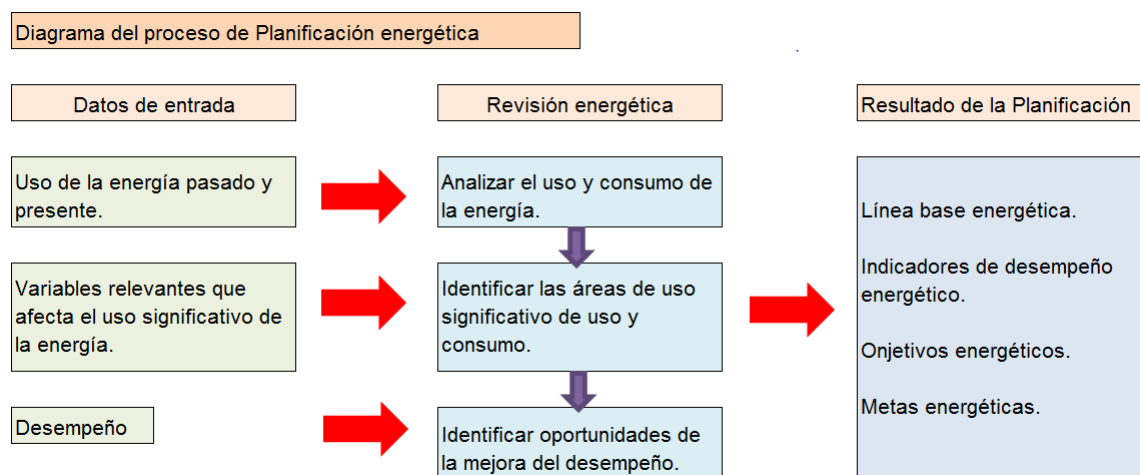


Figura 0. 2 Diagrama del proceso de planificación energética. Fuente. Norma NTE INEN- ISO50001

ANEXO # 2

Gráfica de pliego tarifario para sábado, domingo y feriado

El gráfico de pliego tarifario para los días sábados, domingos y feriados se muestran en la Figura 0. 3.

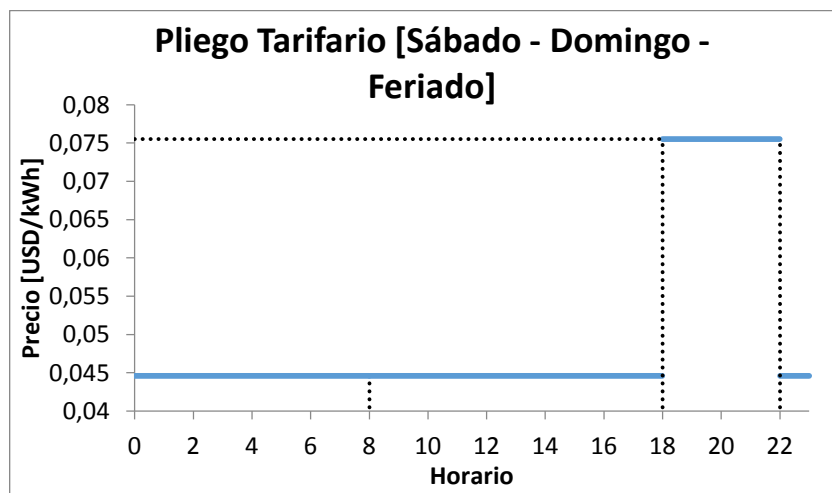


Figura 0. 3 Precios horarios de la energía eléctrica de lunes a viernes

	-	3.792	7.584	11.376	15.168	18.960	22.752	26.544	30.336	33.282
11	\$ -	\$ 4.108	\$ 8.216	\$ 12.324	\$ 16.432	\$ 20.540	\$ 24.648	\$ 28.756	\$ 32.864	\$ 36.056
12	\$ -	\$ 4.424	\$ 8.848	\$ 13.272	\$ 17.696	\$ 22.120	\$ 26.544	\$ 30.968	\$ 35.392	\$ 38.829
13	\$ -	\$ 4.740	\$ 9.480	\$ 14.220	\$ 18.960	\$ 23.700	\$ 28.440	\$ 33.180	\$ 37.920	\$ 41.603
14	\$ -	\$ 5.056	\$ 10.112	\$ 15.168	\$ 20.224	\$ 25.280	\$ 30.336	\$ 35.392	\$ 40.448	\$ 44.377
15	\$ -	\$ 5.372	\$ 10.744	\$ 16.116	\$ 21.488	\$ 26.860	\$ 32.232	\$ 37.604	\$ 42.976	\$ 47.150
16	\$ -	\$ 5.688	\$ 11.376	\$ 17.064	\$ 22.752	\$ 28.440	\$ 34.128	\$ 39.816	\$ 45.504	\$ 49.924
17	\$ -	\$ 6.004	\$ 12.008	\$ 18.012	\$ 24.016	\$ 30.020	\$ 36.024	\$ 42.028	\$ 48.032	\$ 52.697
18	\$ -	\$ 7.200	\$ 14.400	\$ 21.600	\$ 28.800	\$ 36.000	\$ 43.200	\$ 50.400	\$ 57.600	\$ 63.194
19	\$ -	\$ 7.560	\$ 15.120	\$ 22.680	\$ 30.240	\$ 37.800	\$ 45.360	\$ 52.920	\$ 60.480	\$ 66.354
20	\$ -	\$ 7.920	\$ 15.840	\$ 23.760	\$ 31.680	\$ 39.600	\$ 47.520	\$ 55.440	\$ 63.360	\$ 69.514
21	\$ -	\$ 8.280	\$ 16.560	\$ 24.840	\$ 33.120	\$ 41.400	\$ 49.680	\$ 57.960	\$ 66.240	\$ 72.674

Tabla 31. Cálculo de los costos de la energía eléctrica durante un día para distintos niveles de consumo.

ANEXO # 4

Análisis de ahorro de energía eléctrica

Sistema de molienda de Crudo 1

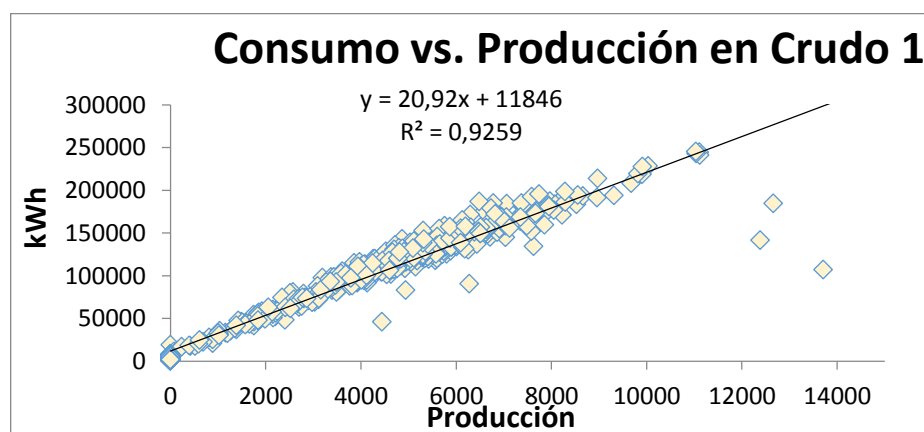


Figura 0. 4 Línea base de Molienda de Crudo 1

La ecuación de la línea base es $E = 20.92 \cdot P + 11,846$ con un factor de correlación de 0.9259, el cual está dentro de los parámetros de aceptabilidad para un posterior análisis de los indicadores de desempeño energético.

Se puede observar que la energía no asociada a la producción (E_{nap}) de la línea base es de 11,846 [kWh], la razón de cambio es de 20.92 [kWh/t], de lo que se obtiene +/- 2.35 [kWh] de error. Se procede a obtener la línea meta alcanzable, la cual se realiza con los puntos que se encuentran debajo de la línea base ya obtenida.

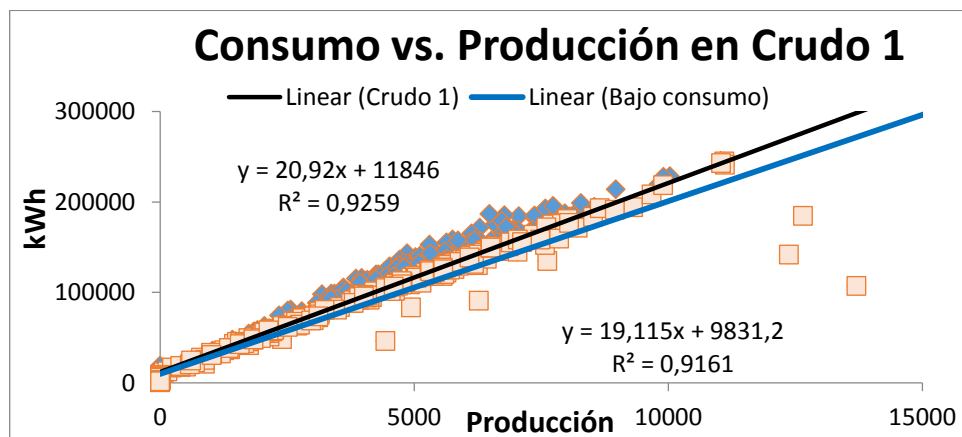


Figura 0. 5 Línea base y línea meta en Molienda de Crudo 1

La ecuación de la línea meta es de $E_m = 19.115 \cdot P + 9,831.2$ con un factor de correlación de 0.9161.

La Enap de la línea meta es de 9,831.2 [kWh], la razón de cambio es de 19.115 [kWh/t], obteniéndose +/- 1.88 [kWh] de error.

Para obtener el potencial de ahorro se resta el consumo de Enap de la línea base con el consumo de Enap de la línea meta, tomando como referencia los consumos de muestra establecidos previamente.

$$\text{Potencial de ahorro} = 11,846 - 9,831.2 \left[\frac{kWh}{t} \right]$$

$$\text{Potencial de ahorro} = 2,014.8 \left[\frac{kWh}{t} \right]$$

En este inicio de la implementación del SGEEn se partirá con esta línea base, la cual con la obtención de la línea meta que propone una posibilidad de ahorro energético alrededor de 8.4%, que representan 2,014.8 kWh, asociándose a un factor de 0.48 kWh/t producidas de cemento.

Sistema de molienda de Crudo 3

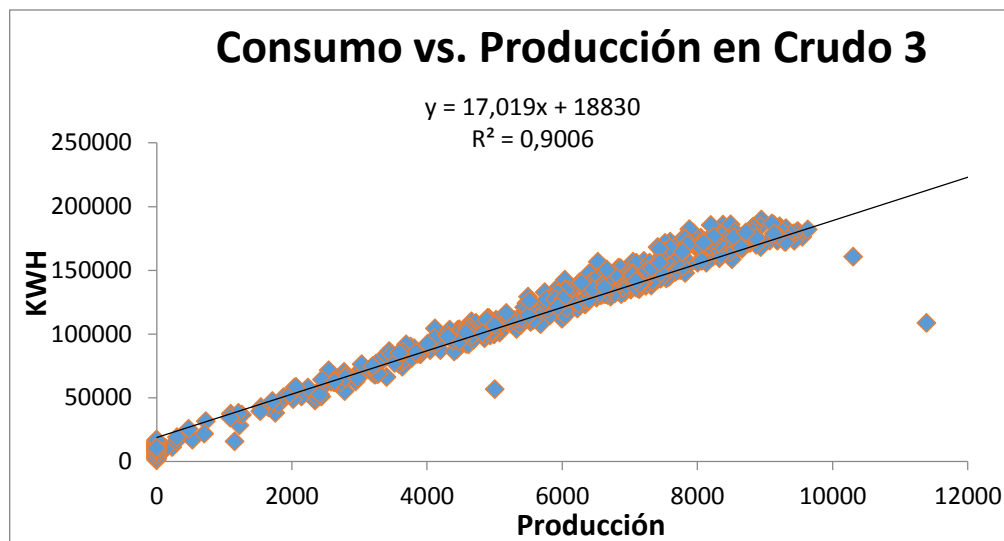


Figura 0. 6 Línea base de Molienda de Crudo 3

La ecuación de la línea base es $E = 17.019 \cdot P + 18,830$ con un factor de correlación de 0.9006, el cual está dentro de los parámetros de aceptabilidad para un posterior análisis de los indicadores de desempeño energético.

Se puede observar que la energía no asociada a la producción (E_{nap}) de la línea base es de 18.830 [kWh], la razón de cambio es de 17.019 [kWh/t] y se obtiene +/- 2.42 [kWh] de error.

Se procede a obtener la línea meta alcanzable, la cual se realiza con los puntos que se encuentran debajo de la línea base ya obtenida.

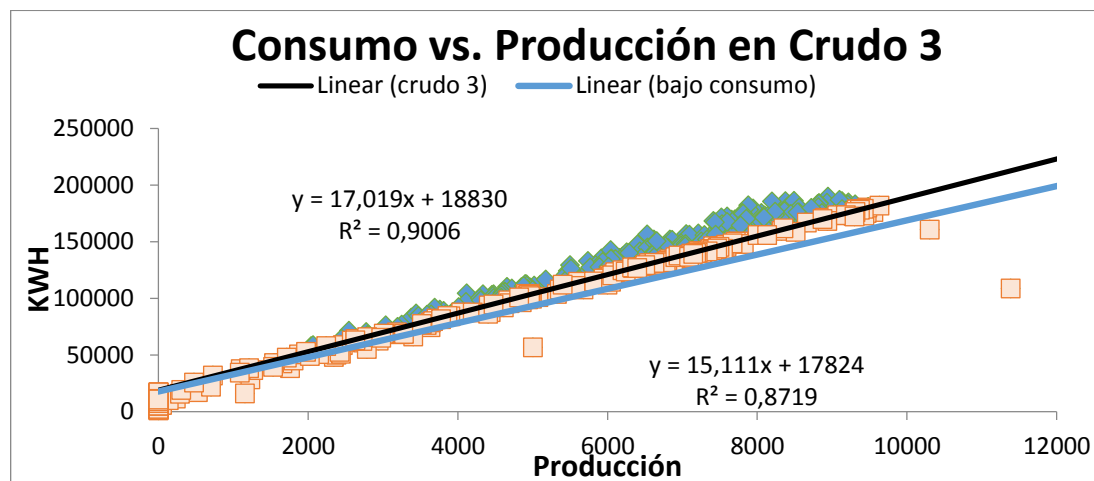


Figura 0. 7 Línea base y línea meta en Molienda de Crudo 3

La ecuación de la línea meta es de $E_m = 15.111 \cdot P + 17,824$ con un factor de correlación de 0.8719.

La Enap de la línea meta es de 17,824 [kWh], la razón de cambio es de 15.111 [kWh/t] y se obtiene +/- 4.05 [kWh] de error.

Para obtener el potencial de ahorro se resta el consumo de Enap de la línea base con el consumo de Enap de la línea meta.

$$\text{Potencial de ahorro} = 18,830 - 17,824 \left[\frac{\text{kWh}}{t} \right]$$

$$\text{Potencial de ahorro} = 1,006 \left[\frac{\text{kWh}}{t} \right]$$

En este inicio de la implementación del SGEEn se partirá con esta línea base, la cual con la obtención de la línea meta se puede observar que existe una posibilidad de un ahorro energético de alrededor de 4.2% que representan 1.006 kWh, lo cual resulta 0.20 kWh/t producidas de cemento.

Sistema de Clinkerización Horno 1

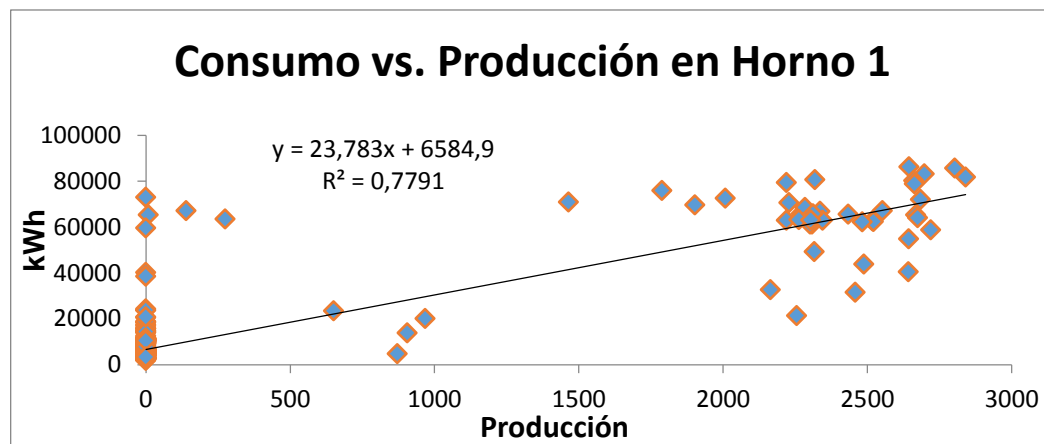


Figura 0. 8 Línea base de Horno 1

La ecuación de la línea base es $E = 23.783 \cdot P + 6,584.9$ con un factor de correlación de 0.7791, el cual está dentro de los parámetros de aceptabilidad para un posterior análisis de los indicadores de desempeño energético.

Se puede observar que la energía no asociada a la producción (E_{nap}) de la línea base es de 6,584.9 [kWh], la razón de cambio es de 23.783 [kWh/t], con un +/- 2.28 [kWh] de error.

Se procede a obtener la línea meta alcanzable, la cual se realiza con los puntos que se encuentran debajo de la línea base ya obtenida.

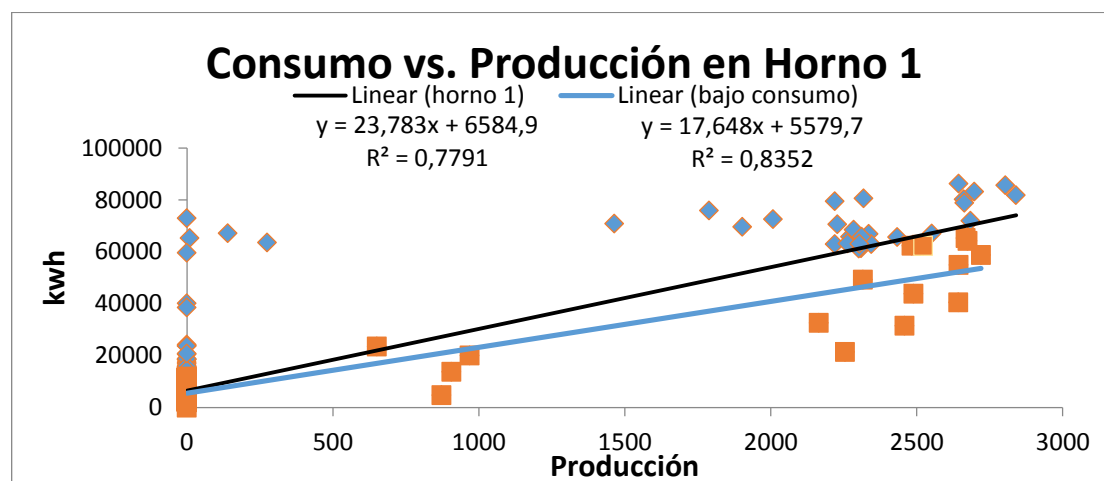


Figura 0. 9 Línea base y línea meta en Horno 1

La ecuación de la línea meta es de $E_m = 17.648 \cdot P + 5.579.7$ con un factor de correlación de 0.8352.

La Enap de la línea meta es de 5,579.7 [kWh], la razón de cambio es de 17.648 [kWh/t] y se obtiene +/- 1.24 [kWh] de error.

Para obtener el potencial de ahorro se resta el consumo de Enap de la línea base con el consumo de Enap de la línea meta.

$$\text{Potencial de ahorro} = 6,584.9 - 5,579.7 \left[\frac{kWh}{t} \right]$$

$$\text{Potencial de ahorro} = 1,005.2 \left[\frac{kWh}{t} \right]$$

En este inicio de la implementación del SGE n se partirá con esta línea base, la cual con la obtención de la línea meta se puede observar que existe una posibilidad de reducción energética de alrededor de 4.2%, que representa un ahorro de 1,005.2 kWh y en índice de desempeño de ahorro 0.27 kWh/t producidas de cemento.

Sistema de Clinkerización Horno 2

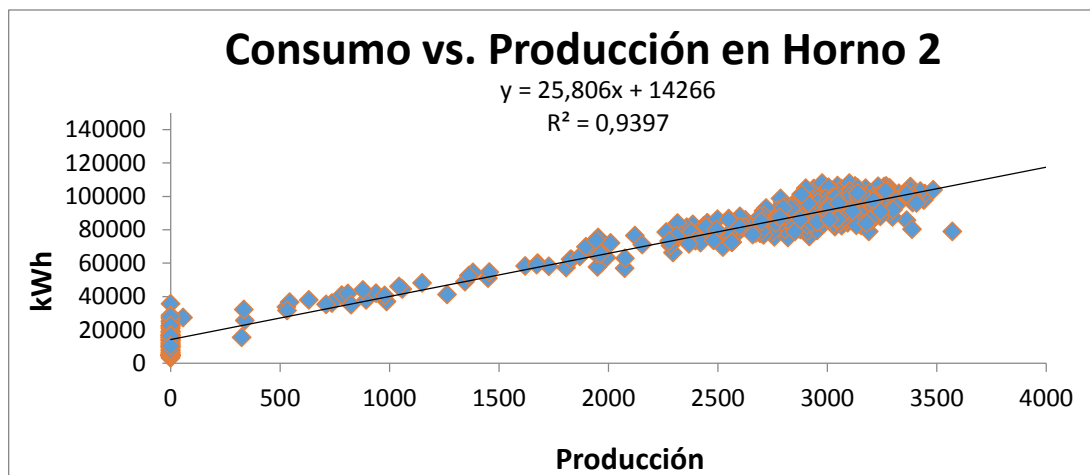


Figura 0. 10 Línea base de Horno 2

La ecuación de la línea base es $E = 25.806 \cdot P + 14,266$ con un factor de correlación de 0.9397, el cual está dentro de los parámetros de aceptabilidad para un posterior análisis de los indicadores de desempeño energético.

Se puede observar que la energía no asociada a la producción (E_{nap}) de la línea base es de 14,266 [kWh], la razón de cambio es de 25.806 [kWh/t], resultando en +/- 1.68 [kWh] de error.

Se procede a obtener la línea meta alcanzable, la cual se realiza con los puntos que se encuentran debajo de la línea base ya obtenida.

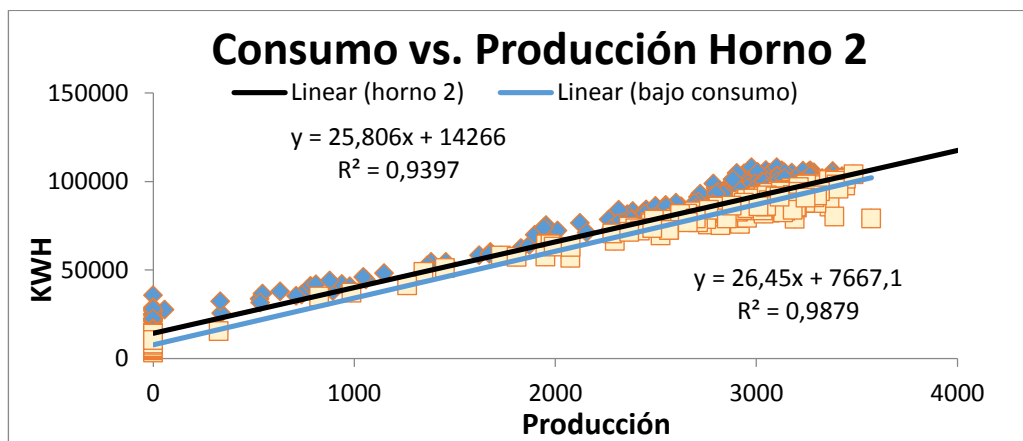


Figura 0. 11 Línea base y línea meta en Horno 2

La ecuación de la línea meta es de $E_m = 26.45 \cdot P + 7,667.1$ con un factor de correlación de 0.9879.

La Enap de la línea meta es de 7,667.1 [kWh], y la razón de cambio es de 26.45 [kWh/t] y se obtiene +/- 0.69 [kWh] de error.

Para obtener el potencial de ahorro se resta el consumo de Enap de la línea base con el consumo de Enap de la línea meta.

$$\text{Potencial de ahorro} = 14.266 - 7,667.1 \left[\frac{\text{kWh}}{t} \right]$$

$$\text{Potencial de ahorro} = 6,598.9 \left[\frac{\text{kWh}}{t} \right]$$

En este inicio de la implementación del SGEEn se partirá con esta línea base, la cual con la obtención de la línea meta se puede observar que existe una posibilidad de reducción energética de alrededor de 27.5%, que representa un ahorro de 6,598.9 kWh y en índice de desempeño un ahorro de 1.69 kWh/t producidas de cemento.

Sistema de Clinkerización Horno 3

La ecuación de la línea base es $E = 19.558 \cdot P + 17,274$ con un factor de correlación de 0.9288, el cual está dentro de los parámetros de aceptabilidad para un posterior análisis de los indicadores de desempeño energético.

Se puede observar que la energía no asociada a la producción (Enap) de la línea base es de 17,274 [kWh], la razón de cambio es de 19.558 [kWh/t] y se obtiene +/- 2.2 [kWh] de error.

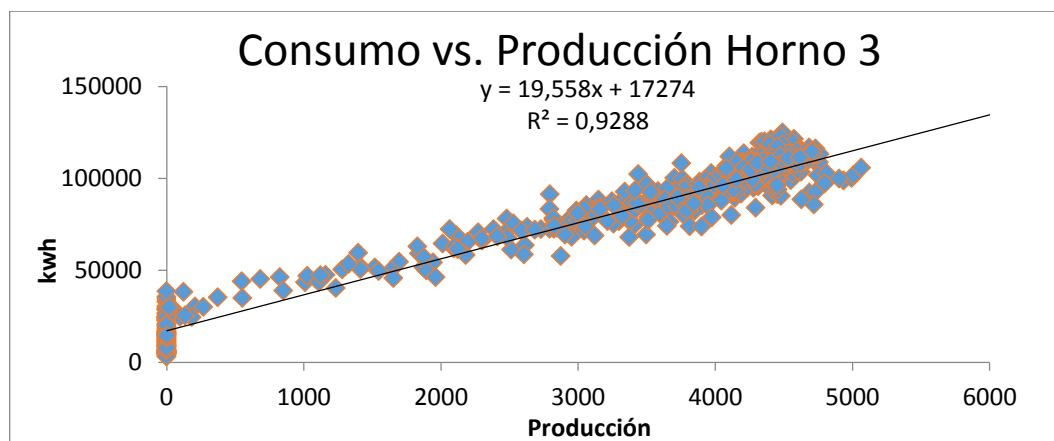


Figura 0. 12 Línea base de Horno 3

Se procede a obtener la línea meta alcanzable, la cual se realiza con los puntos que se encuentra debajo de la línea base ya obtenida.

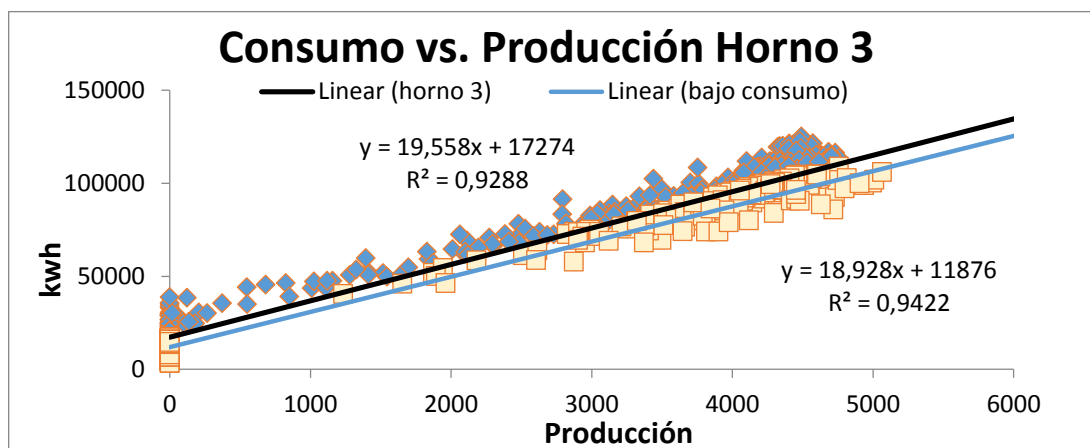


Figura 0. 13 Línea base y línea meta en Horno 3

La ecuación de la línea meta es de $E_m = 18.928 \cdot P + 11,876$ con un factor de correlación de 0.9422.

La Enap de la línea meta es de 11,876 [kWh], la razón de cambio es de 18.928 [kWh/t] y se obtiene +/- 6.24 [kWh] de error.

Para obtener el potencial de ahorro se resta el consumo de Enap de la línea base con el consumo de Enap de la línea meta.

$$\text{Potencial de ahorro} = 17.274 - 11,876 \left[\frac{\text{kWh}}{t} \right]$$

$$\text{Potencial de ahorro} = 5,398 \left[\frac{\text{kWh}}{t} \right]$$

En este inicio de la implementación del SGEEn se partirá con esta línea base, la cual con la obtención de la línea meta se puede observar que existe una posibilidad de reducción energética de alrededor de 22.5%, que representa un ahorro de 5,398 kWh y en índice de desempeño un ahorro de 1.078 kWh/t producidas de cemento.

Sistema de molienda de Cemento 1

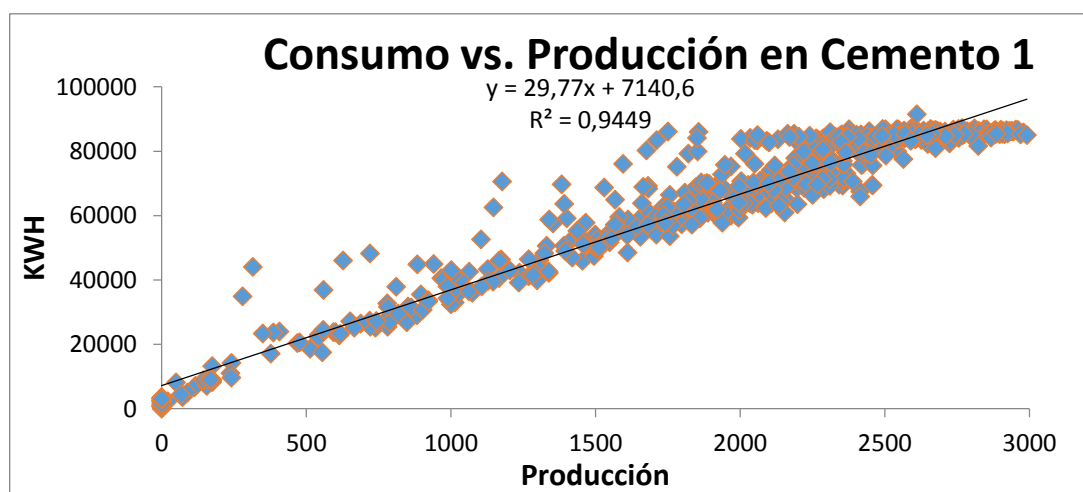


Figura 0. 14 Línea base de Molienda de Cemento 1

La ecuación de la línea base es $E = 29.77 \cdot P + 7,140.6$ con un factor de correlación de 0.9449, el cual está dentro de los parámetros de aceptabilidad para un posterior análisis de los indicadores de desempeño energético.

Se puede observar que la energía no asociada a la producción (E_{nap}) de la línea base es de 7,140.6 [kWh], la razón de cambio es de 29.77 [kWh/t] y el error de +/- 2.90 [kWh].

Se procede a obtener la línea meta alcanzable, la cual se realiza con los puntos que se encuentran debajo de la línea base ya obtenida.

La ecuación de la línea meta es de $E_m = 29.474 \cdot P + 3,580.8$ con un factor de correlación de 0.9935.

La E_{nap} de la línea meta es de 3,580.8 [kWh], la razón de cambio es de 29.474 [kWh/t] y se obtiene +/- 8.42 [kWh] de error.

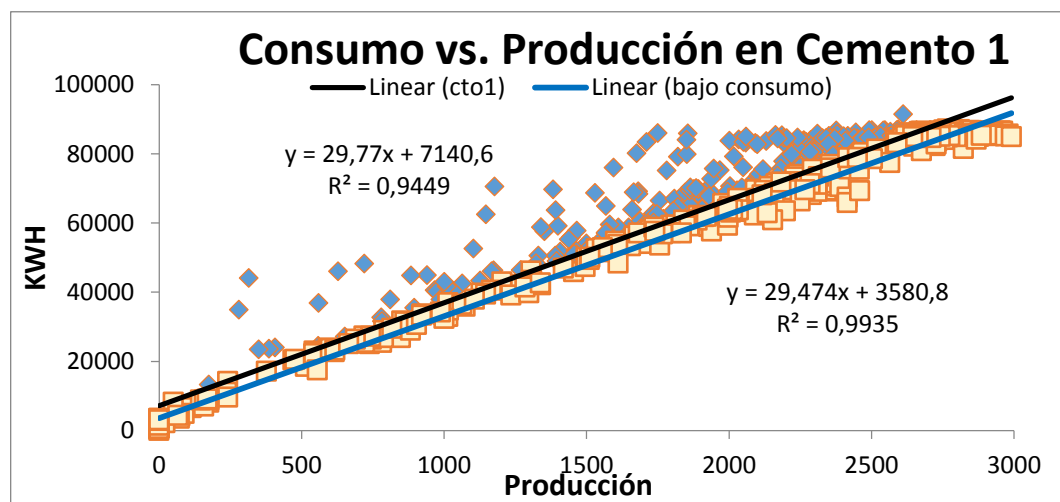


Figura 0. 15 Línea base y línea meta en Molienda de Cemento 1

Para obtener el potencial de ahorro se resta el consumo de E_{nap} de la línea base con el consumo de E_{nap} de la línea meta.

$$\text{Potencial de ahorro} = 7,140.6 - 3,580.8 \left[\frac{\text{kWh}}{\text{t}} \right]$$

$$\text{Potencial de ahorro} = 3,559.8 \left[\frac{\text{kWh}}{\text{t}} \right]$$

En este inicio de la implementación del SGE_n se partirá con esta línea base, la cual con la obtención de la línea meta se puede observar que existe una posibilidad de

reducción energética de alrededor de 14.82%, que representa un ahorro de 3,559.8 kWh.

Sistema de molienda de Cemento 2

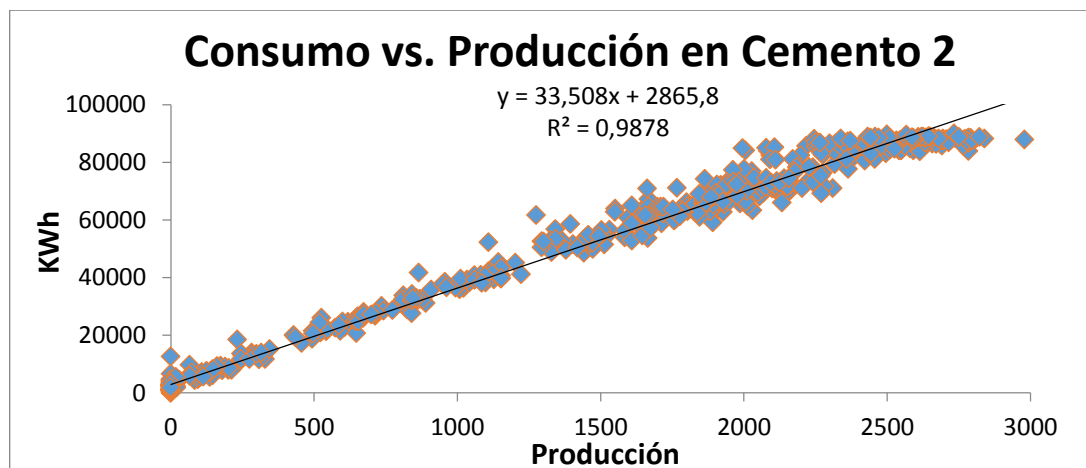


Figura 0. 16 Línea base de Molienda de Cemento 2

La ecuación de la línea base es $E = 35.508 \cdot P + 2,865.8$ con un factor de correlación de 0.9878, el cual está dentro de los parámetros de aceptabilidad para un posterior análisis de los indicadores de desempeño energético.

Se puede observar que la energía no asociada a la producción (E_{nap}) de la línea base es de 2,865.8 [kWh], la razón de cambio es de 35.508 [kWh/t] y se obtiene +/- 1.80 [kWh] de error.

Se procede a obtener la línea meta alcanzable, la cual se realiza con los puntos que se encuentran debajo de la línea base ya obtenida.

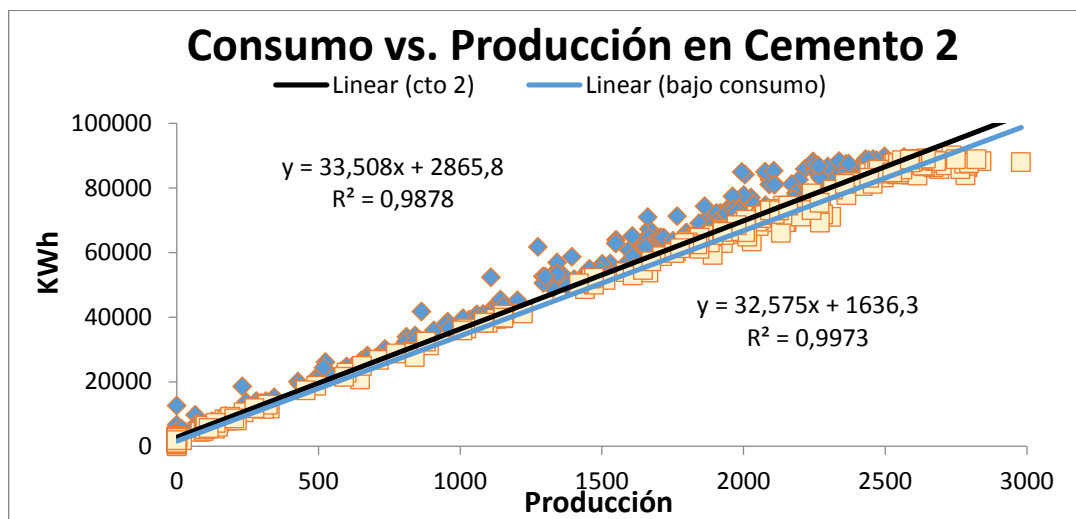


Figura 0. 17 Línea base y línea meta en Molienda de Cemento 2

La ecuación de la línea meta es de $E_m = 32.575 \cdot P + 1.636.3$ con un factor de correlación de 0.9973.

La Enap de la línea meta es de 1,636.3 [kWh], la razón de cambio es de 32.575 [kWh/t] y se obtiene +/- 10.06 [kWh] de error.

Para obtener el potencial de ahorro se resta el consumo de Enap de la línea base con el consumo de Enap de la línea meta.

$$\text{Potencial de ahorro} = 2,865.8 - 1,636.3 \left[\frac{kWh}{t} \right]$$

$$\text{Potencial de ahorro} = 1,229.5 \left[\frac{kWh}{t} \right]$$

En este inicio de la implementación del SGEEn se partirá con esta línea base, la cual con la obtención de la línea meta se puede observar que existe una posibilidad de reducción energético de alrededor de 5.12% que representa un ahorro de 1,229.5 kWh.

Sistema de molienda de Cemento 4

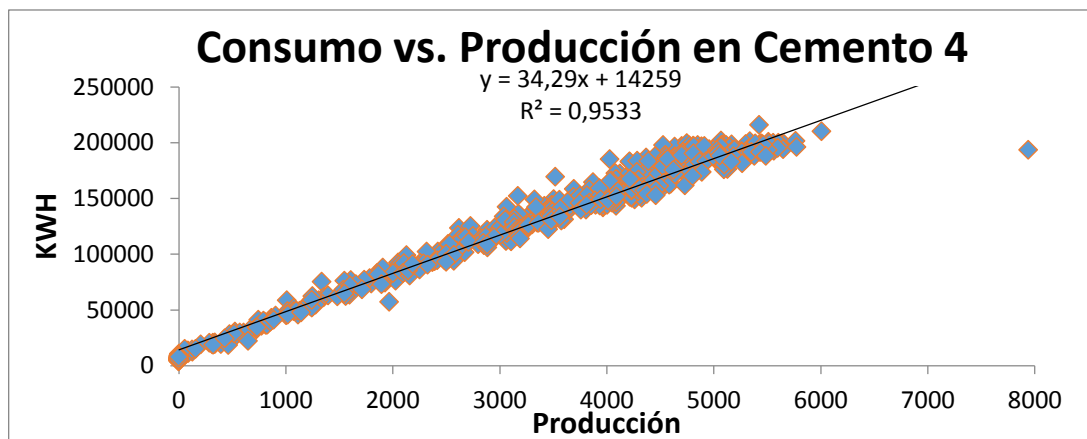


Figura 0. 18 Línea base de Molienda de Cemento 4

La ecuación de la línea base es $E = 34.29 \cdot P + 14,259$ con un factor de correlación de 0.9533, el cual está dentro de los parámetros de aceptabilidad para un posterior análisis de los indicadores de desempeño energético.

Se puede observar que la energía no asociada a la producción (E_{nap}) de la línea base es de 14,259 [kWh], la razón de cambio es de 34.29 [kWh/t] y se obtiene +/- 2.51 [kWh] de error.

Se procede a obtener la línea meta alcanzable, la cual se realiza con los puntos que se encuentran debajo de la línea base ya obtenida.

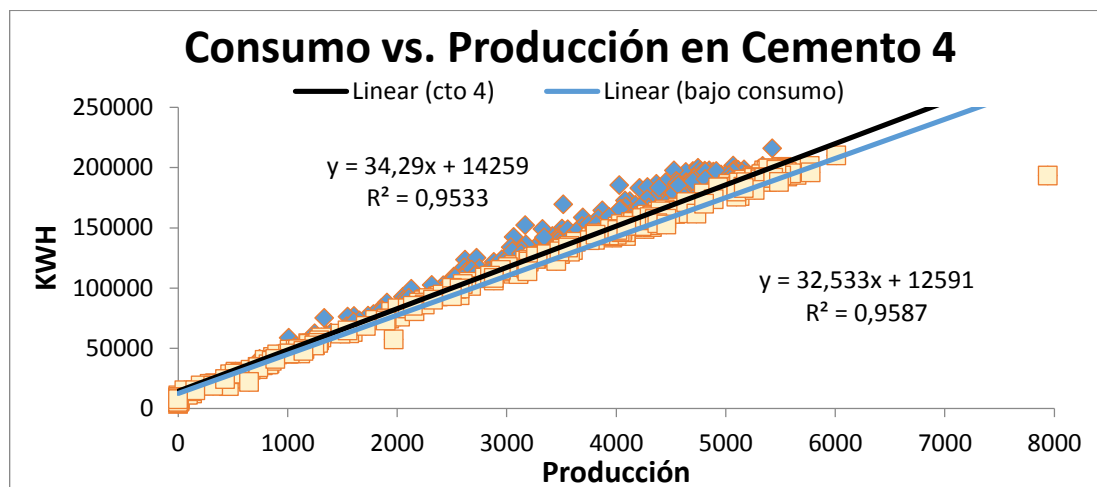


Figura 0. 19 Línea base y línea meta en Molienda de Cemento 4

La ecuación de la línea meta es de $E_m = 32.533 \cdot P + 12.591$ con un factor de correlación de 0.9587.

La Enap de la línea meta es de 12,591 [kWh], la razón de cambio es de 32.533 [kWh/t] y se obtiene +/- 9.34 [kWh] de error.

Para obtener el potencial de ahorro se resta el consumo de Enap de la línea base con el consumo de Enap de la línea meta.

$$\text{Potencial de ahorro} = 14,259 - 12,591 \left[\frac{\text{kWh}}{t} \right]$$

$$\text{Potencial de ahorro} = 1,668 \left[\frac{\text{kWh}}{t} \right]$$

En este inicio de la implementación del SGEEn se partirá con esta línea base, la cual con la obtención de la línea meta se puede observar que existe una posibilidad de reducción energética de alrededor de 6.94% que representa un ahorro de 1,668 kWh.

Sistema Prensa

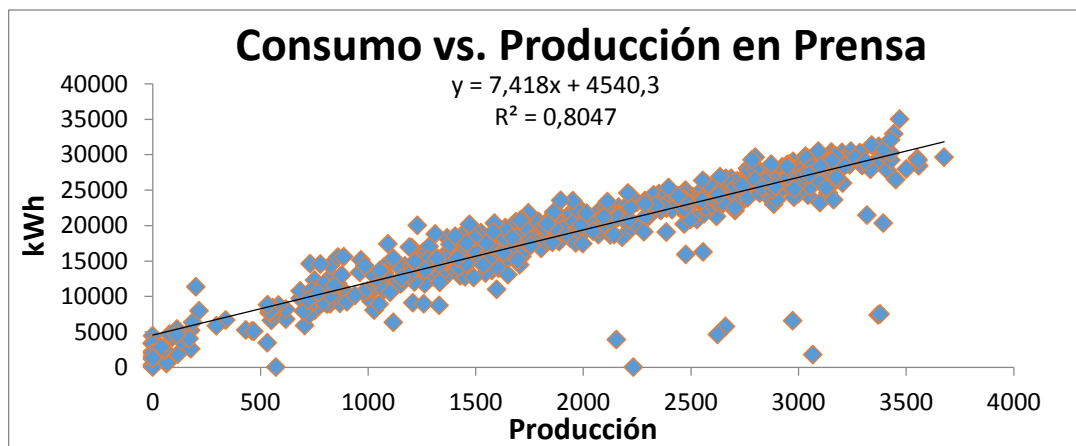


Figura 0. 20 Línea base y línea meta en Prensa

La ecuación de la línea base es $E = 7.418 \cdot P + 4,540.3$ con un factor de correlación de 0.8047, el cual está dentro de los parámetros de aceptabilidad para un posterior análisis de los indicadores de desempeño energético.

Se puede observar que la energía no asociada a la producción (E_{nap}) de la línea base es de 4,540.3 [kWh], la razón de cambio es de 7.418 [kWh/t] y se obtiene +/- 4.17 [kWh] de error.

Se procede a obtener la línea meta alcanzable, la cual se realiza con los puntos que se encuentran debajo de la línea base ya obtenida.

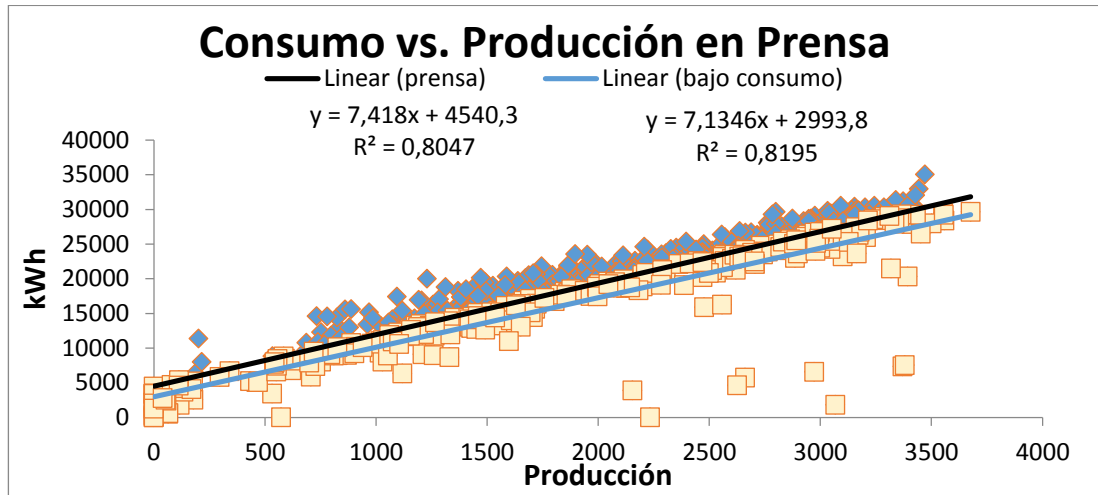


Figura 0. 21 Línea base y línea meta en Prensa

La ecuación de la línea meta es de $E_m = 7.1346 \cdot P + 2,993.8$ con un factor de correlación de 0.8195.

La Enap de la línea meta es de 2,993.8 [kWh], la razón de cambio es de 7.1346 [kWh/t] y se obtiene +/- 7.34 [kWh] de error.

Para obtener el potencial de ahorro se resta el consumo de Enap de la línea base con el consumo de Enap de la línea meta.

$$\text{Potencial de ahorro} = 4,540.3 - 2,993.8 \left[\frac{\text{kWh}}{t} \right]$$

$$\text{Potencial de ahorro} = 1,546.5 \left[\frac{\text{kWh}}{t} \right]$$

En este inicio de la implementación del SGen se partirá con esta línea base, la cual con la obtención de la línea meta se puede observar que existe una posibilidad de reducción energético de alrededor de 6.44%, que representa un ahorro de 1,546.5 kWh.

ANEXO # 5

Producción de 9,000 toneladas de cemento sin equipos fuera de servicio

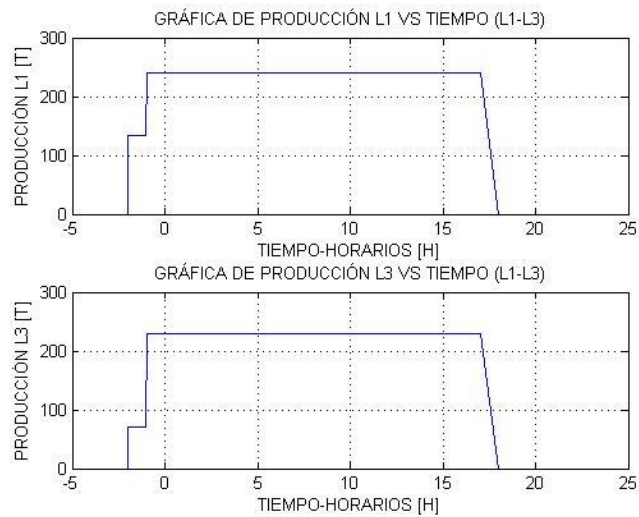


Figura 0. 22 Curvas de producción vs. Tiempo de las líneas L1 - L3 producción de 9,000 toneladas de cemento sin equipos fuera de servicio

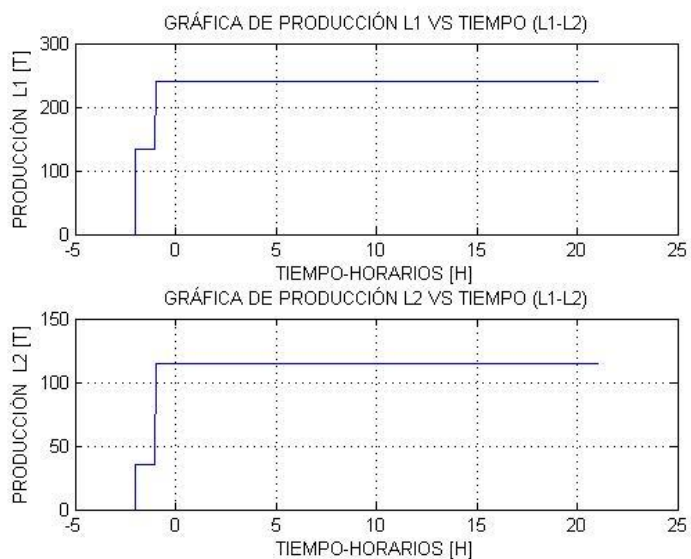


Figura 0. 23 Curvas de producción vs. Tiempo de las líneas L1 – L2 producción de 9,000 toneladas de cemento sin equipos fuera de servicio

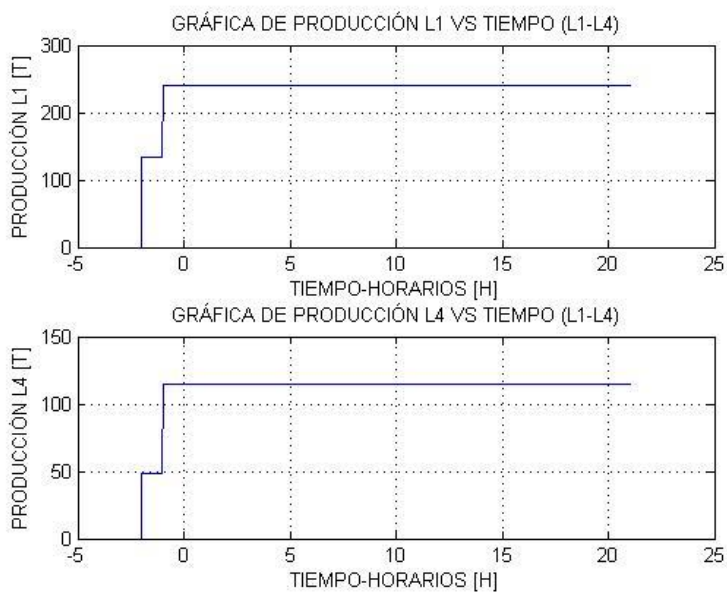


Figura 0. 24 Curvas de producción vs. Tiempo de las líneas L1 – L2 producción de 9,000 toneladas de cemento sin equipos fuera de servicio

Resultados de producir 9,000 toneladas de cemento sin equipos fuera de servicio

La combinación más económica que satisface la demanda es la Línea de Producción L1 con la L3.

La cantidad de dólares usados es: $6.3276 \cdot 10^6$

La cantidad de Toneladas producidas es: $9.1343 \cdot 10^3$

La cantidad de Energía en KWH consumida es: $8.4654 \cdot 10^7$

La cantidad de Toneladas almacenadas es: 134.2778

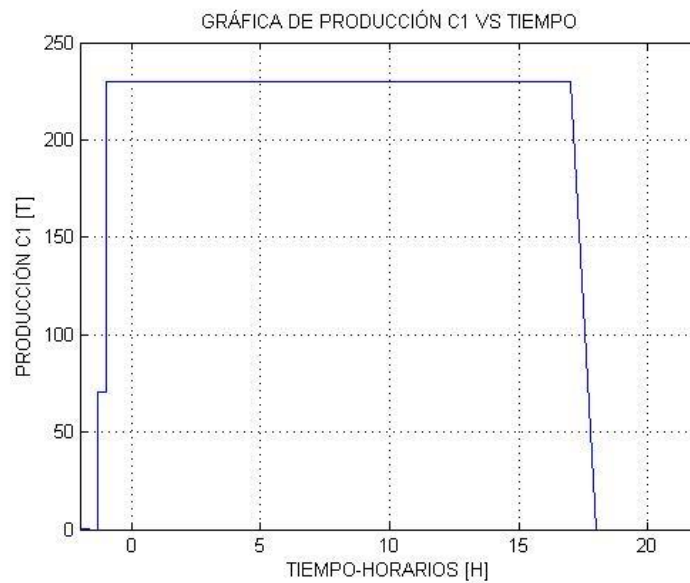


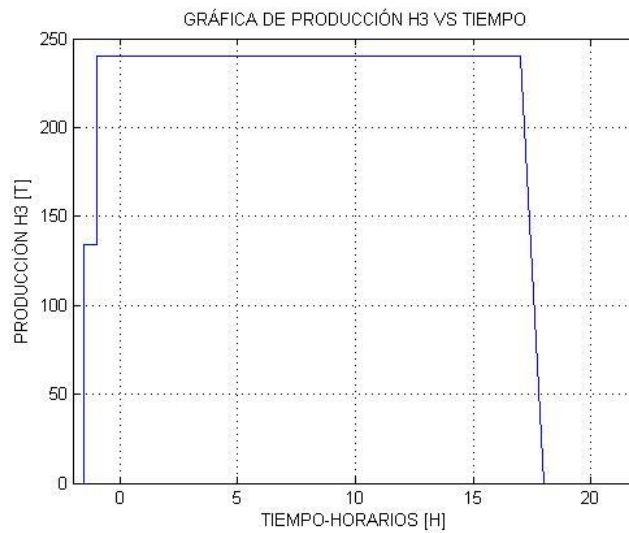
Figura 0. 25 Curva de producción vs. Tiempo de operatividad de equipo Eq11 producción de 9,000 toneladas de cemento sin equipos fuera de servicio



Figura 0. 26 Curva de producción vs. Tiempo de operatividad de equipo Eq21 producción de 9,000 toneladas de cemento sin equipos fuera de servicio



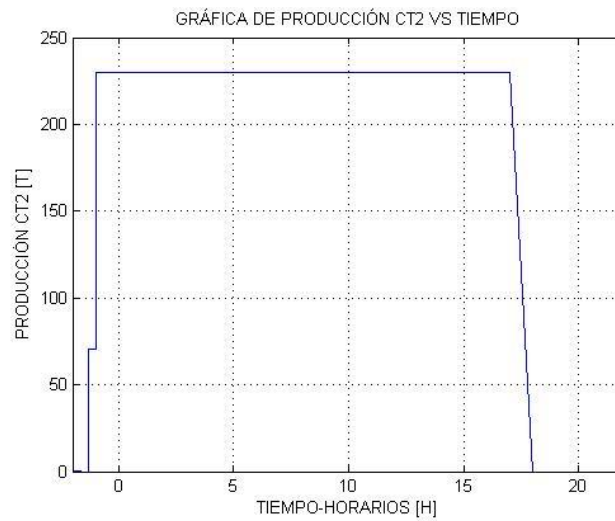
Figura 0. 27 Curva de producción vs. Tiempo de operatividad de equipo Eq22 producción de 9,000 toneladas de cemento sin equipos fuera de servicio



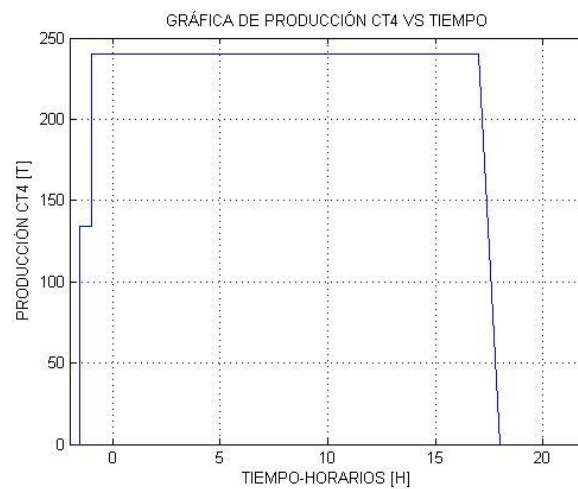
**Figura 0. 28 Curva de producción vs. Tiempo de operatividad de equipo Eq23
producción de 9,000 toneladas de cemento sin equipos fuera de servicio**



**Figura 0. 29 Curva de producción vs. Tiempo de operatividad de equipo Eq31
producción de 9,000 toneladas de cemento sin equipos fuera de servicio**



**Figura 0. 30 Curva de producción vs. Tiempo de operatividad de equipo Eq32
producción de 9,000 toneladas de cemento sin equipos fuera de servicio**



**Figura 0. 31 Curva de producción vs. Tiempo de operatividad de equipo Eq33
producción de 9,000 toneladas de cemento sin equipos fuera de servicio**



**Figura 0. 32 Curva de producción vs. Tiempo de operatividad de equipo Eq00
producción de 9,000 toneladas de cemento sin equipos fuera de servicio**

ANEXO # 6

Producción de 4,000 toneladas, equipo Eq32 fuera de servicio

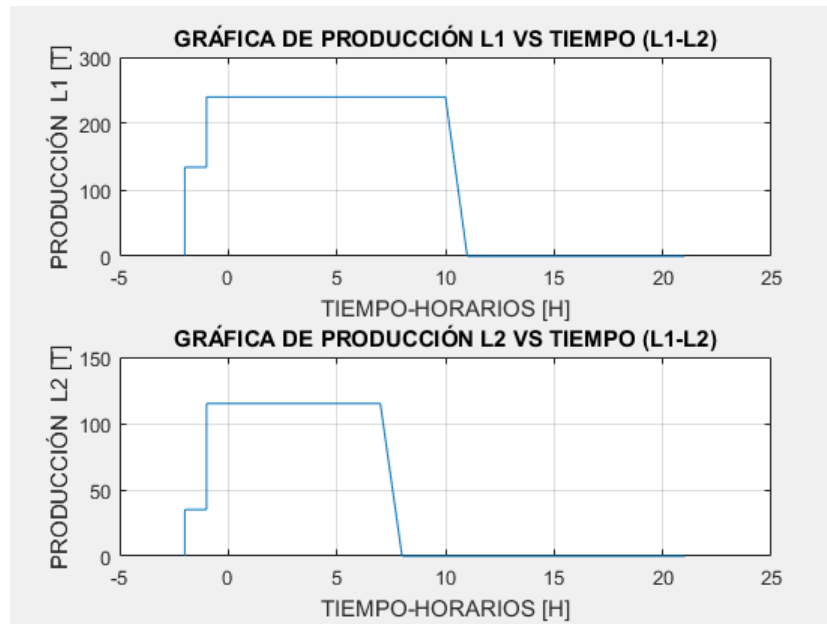


Figura 0. 33 Curvas de producción vs. Tiempo de las líneas L1 – L2 producción de 4,000 toneladas de cemento y Eq32 fuera de servicio.

Resultados de producir 4,000 toneladas de cemento y Eq32 fuera de servicio

La combinación más económica que satisface la demanda es la Línea de Producción L1 con la L2.

La cantidad de dólares usados es: $3.8537 \cdot 10^6$

La cantidad de toneladas producidas es: $4.0841 \cdot 10^3$

La cantidad de Energía en KWH consumida es: $5.3339 \cdot 10^7$

La cantidad de Toneladas almacenadas es: 84.1389

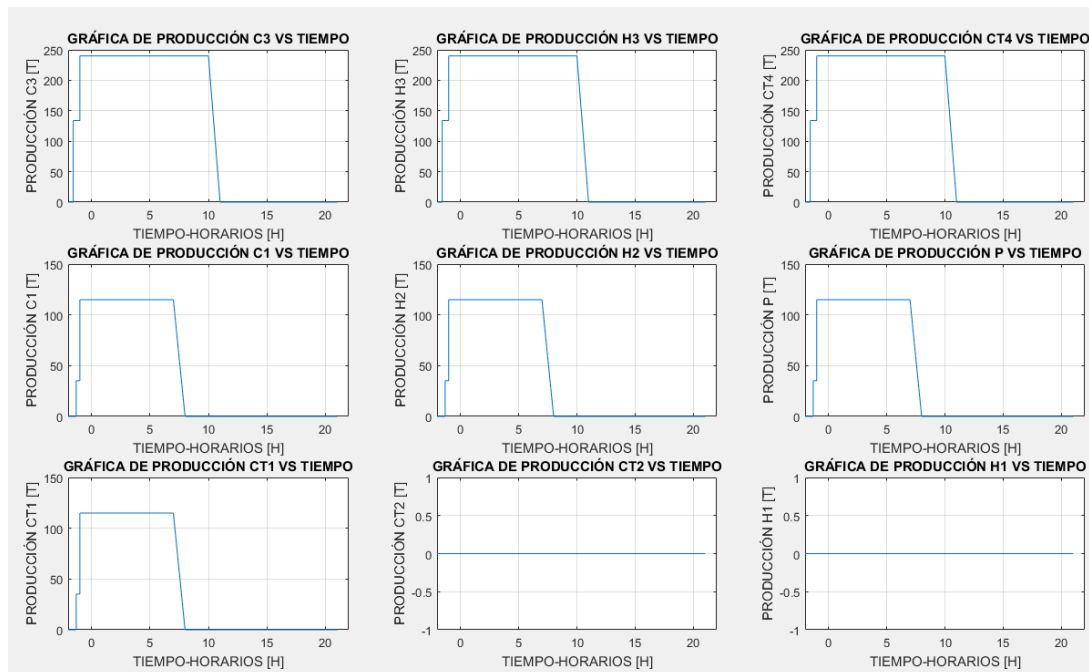


Figura 0. 34 Curvas de producción vs. Tiempo de operatividad de los equipos para el caso 4,000 toneladas y Eq32 fuera de servicio.

Combinación de líneas	Energía [GWh]	Costo [MUSD]	Ahorro energía
L1 - L2	53,339	3,85	
L1 - L3	75,558	5,609	29%
L1 - L4	Fuera de servicio		

Tabla 32. Ahorro de consumo de energía eléctrica para producción de 4,000 toneladas y Eq32 fuera de servicio.

ANEXO # 7

Producción de 5,000 toneladas, equipo Eq22 fuera de servicio

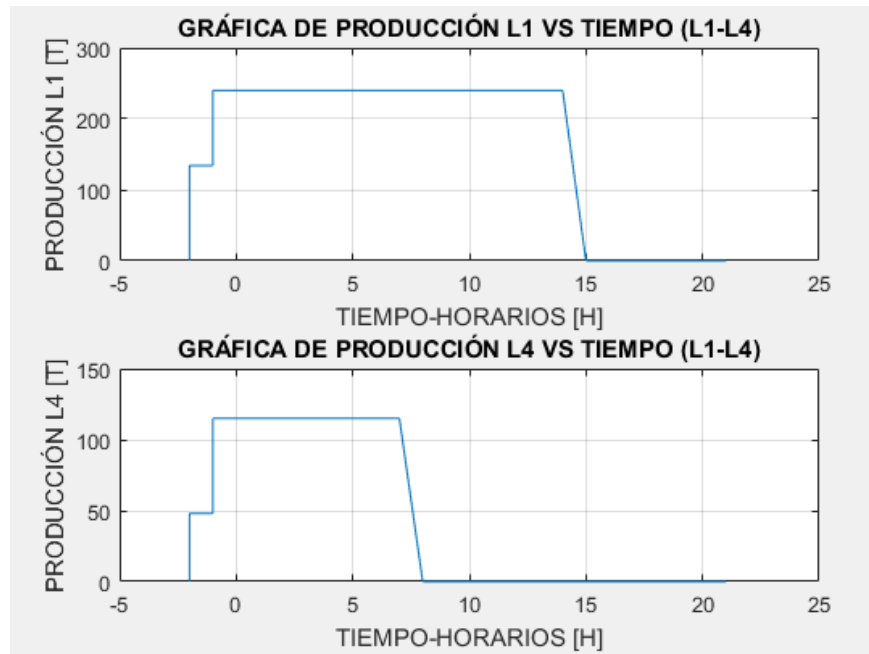


Figura 0. 35 Curvas de producción vs. Tiempo de las líneas L1 – L4 producción de 5,000 toneladas de cemento y Eq22 fuera de servicio.

Resultados de producir 5,000 toneladas de cemento y Eq22 fuera de servicio

La combinación más económica que satisface la demanda es la Línea de Producción L1 con la L4.

La cantidad de dólares usados es: $5.2580 \cdot 10^6$

La cantidad de toneladas producidas es: $5.0570 \cdot 10^3$

La cantidad de Energía en KWH consumida es: $7.1114 \cdot 10^7$

La cantidad de Toneladas almacenadas es: 57.0294

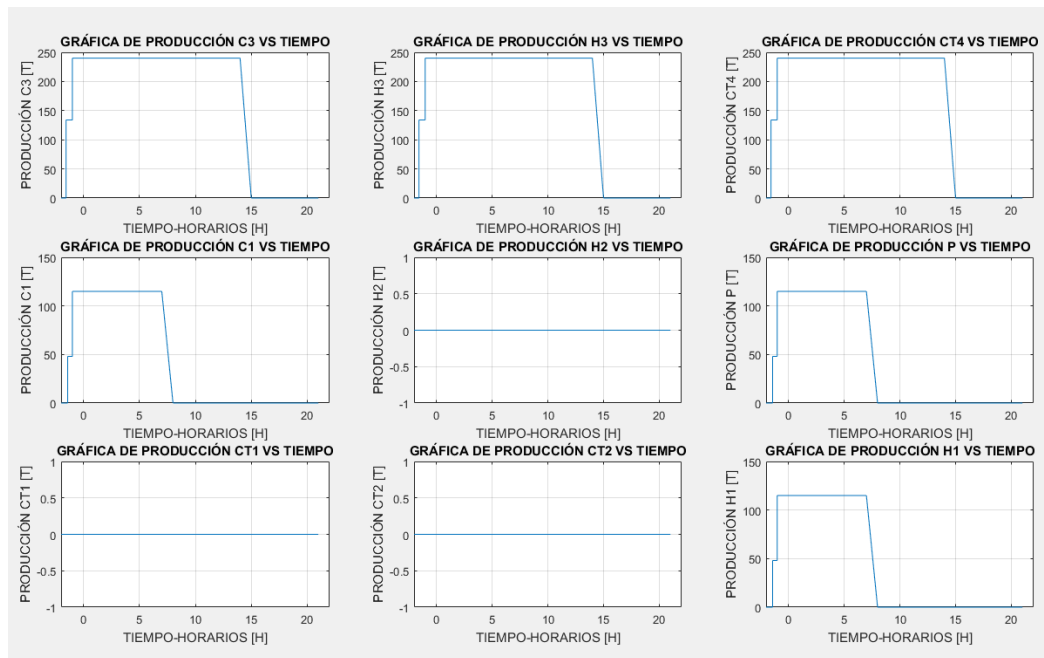


Figura 0. 36 Curvas de producción vs. Tiempo de operatividad de los equipos para el caso 5000 toneladas y Eq22 fuera de servicio

Combinación de líneas	Energía [GWh]	Costo [MUSD]	Ahorro energía
L1 - L2	Fuera de servicio		
L1 - L3	93,33	7,11	24%
L1 - L4	71,11	5,258	-

Tabla 33. Ahorro de consumo de energía eléctrica para producción de 5,000 toneladas y Eq22 fuera de servicio

ANEXO # 8

VLL	4000	[V]
Frec	50	[Hz]
Par Polos	3	[-]
Vel. Sincr.	1000	[rpm]
R1	0.120	[Ω]
R2'	0.241	[Ω]
L1	2.446	[mH]
L2'	2.446	[mH]
Vel. Op.	899.69	[rpm]

Tabla 34. Parámetros Eléctricos del Motor 564-AP1.

VLL	4000	[V]
Frec	60	[Hz]
Par Polos	4	[-]
Vel. Sincr.	900	[rpm]
R1	0.100	[Ω]
R2'	0.200	[Ω]
L1	3.630	[mH]
L2'	3.630	[mH]
Vel. Op.	869.719	[rpm]

Tabla 35. Parámetros Eléctricos del Motor 564-VE1.

VLL	200	[V]
Frec	39	[Hz]
Par Polos	1	[-]
Vel. Sincr.	2340	[rpm]
R1	0.047	[Ω]
R2'	0.079	[Ω]
L1	1.352	[mH]
L2'	1.352	[mH]
Vel. Op.	2215.52	[rpm]

Tabla 36. Parámetros Eléctricos del Motor 473-VT1.

VLL	630	[V]
Frec	51	[Hz]
Par Polos	3	[-]
Vel. Sincr.	1020	[rpm]
R1	0.013	[Ω]
R2'	0.025	[Ω]
L1	0.371	[mH]
L2'	0.371	[mH]
Vel. Op.	971.47	[rpm]

Tabla 37. Parámetros Eléctricos del Motor 463-AP1.

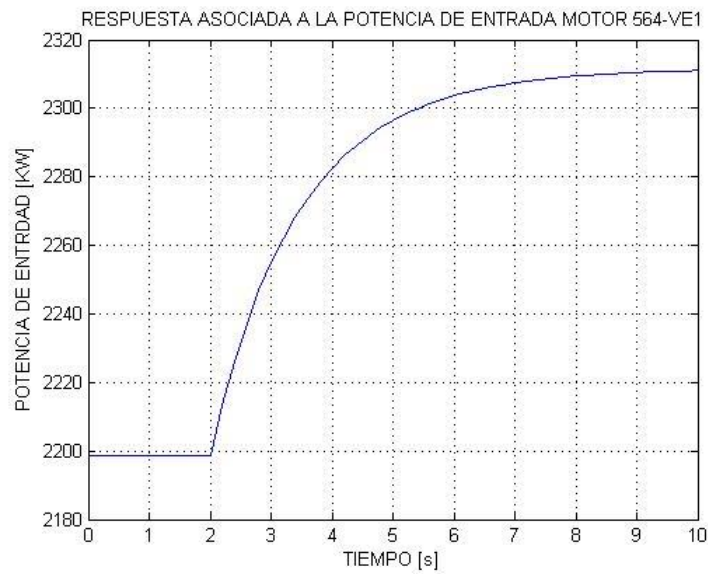


Figura 0.35. Respuesta de Potencia Consumida, incremento de Torque de Carga, motor 564-VE1.

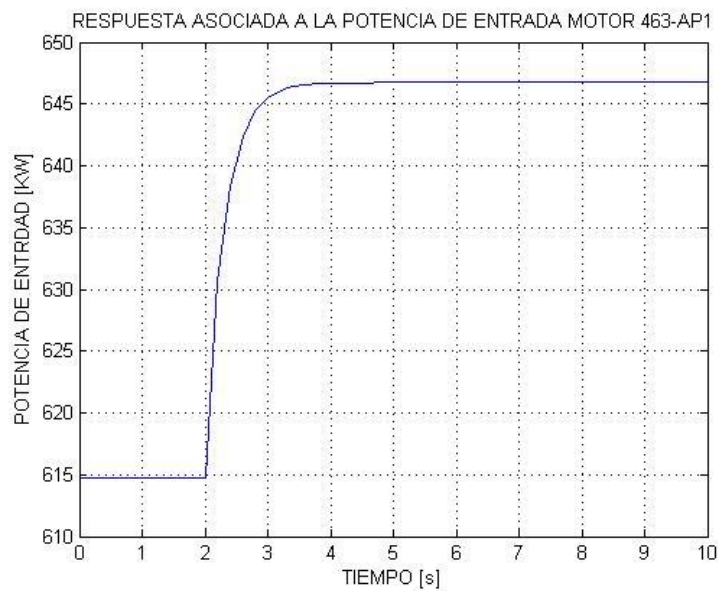


Figura 0.36. Respuesta de Potencia Consumida, incremento de Torque de Carga, motor 473-VT1.

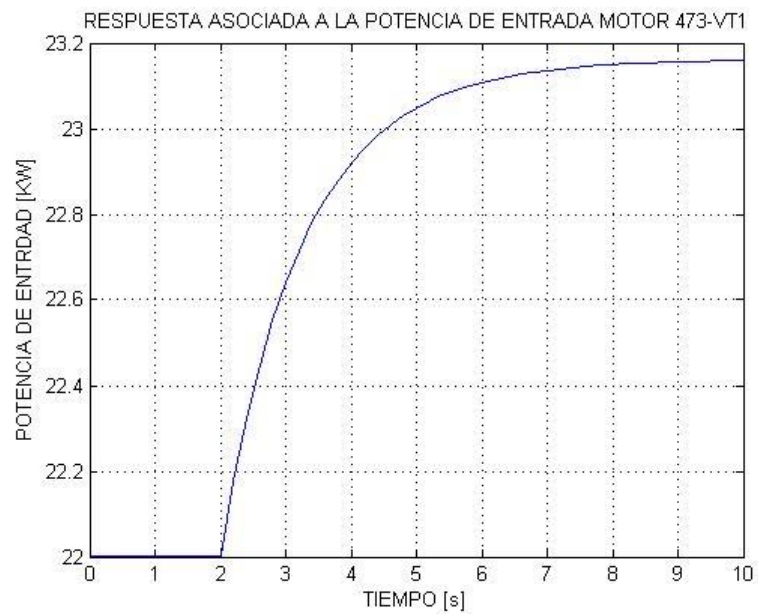


Figura 0.37. Respuesta de Potencia Consumida, incremento de Torque de Carga, motor 463-AP1.

Potencia de entrada [kW]	Velocidades medidas [rad/s]	Velocidad calculada [rad/s]	Porcentaje de error - velocidades
2100.563	89.9996	91.287	-1.41%
	90.0749		-1.33%
	89.7247		-1.71%
	90.5089		-0.85%
	89.7097		-1.73%
2118.056	90.1990947	91.25	-1.15%
	89.6865197		-1.71%
	90.8295782		-0.46%
	90.3957662		-0.94%
	90.333838		-1.00%
	89.7749145		-1.62%
	90.6779195		-0.63%

2138.557	90.2474736	91.207	-1.05%
	90.9548789		-0.28%
	90.9106288		-0.32%
	91.1719726		-0.04%
	91.0290181		-0.20%
	90.5942164		-0.67%
	90.7223723		-0.53%
2198.493	91.4640	91.077	0.42%
	91.5089		0.47%
	90.9603		-0.13%
	90.8310		-0.27%
	91.0327		-0.05%
	90.9737		-0.11%

Tabla 38. Comparativa de Velocidades, Potencia como eje, motor 564-VE1.

Potencia de entrada [kW]	Velocidades medidas [rad/s]	Velocidad calculada [rad/s]	Porcentaje de error - velocidades
1859.183	226.461314	234.7334	-3.52%
	228.84024		-2.51%
	226.585169		-3.47%
	227.231032		-3.20%
	227.57101		-3.05%
1880.999	227.8217	234.575	-2.88%
	228.1716		-2.73%
	227.9478		-2.83%
	227.9208		-2.84%
	227.6312		-2.96%
	227.9117		-2.84%
	227.1215		-3.18%

2068.000	237.459868	233.132	1.86%
	238.51025		2.31%
	239.588584		2.77%
	237.447598		1.85%
	237.1333		1.72%
	238.07619		2.12%
	236.899907		1.62%
2200.180	245.168879	232.009	5.67%
	243.770567		5.07%
	241.386186		4.04%
	238.51775		2.81%
	238.070962		2.61%
	238.313446		2.72%

Tabla 39. Comparativa de Velocidades, Potencia como eje, motor 473-VT1.

Potencia de entrada [kW]	Corrientes medidas [A]	Corriente calculada [A]	Porcentaje de error - corrientes
1859.183	64.3016669	56.770	13.27%
	63.8216667		12.42%
	64.3083331		13.28%
	64.2166669		13.12%
	64.1966666		13.08%
1880.999	64.325	57.528	11.82%
	64.2949997		11.76%
	64.6450003		12.37%
	64.4183331		11.98%
	64.4166669		11.97%
	64.4233334		11.99%
	64.4366664		12.01%

2068.000	66.1366664	64.240	2.95%
	66.1100004		2.91%
	65.9099998		2.60%
	66.2266661		3.09%
	66.2983332		3.20%
	66.0983333		2.89%
	66.1716666		3.01%
2200.180	67.1933336	69.210	-2.91%
	67.4150003		-2.59%
	67.7516666		-2.11%
	68.2266668		-1.42%
	68.3466667		-1.25%
	68.2666664		-1.36%

Tabla 40. Comparativa de Corrientes, Potencia como eje, motor 473-VT1.

Potencia de entrada [kW]	Velocidades medidas [rad/s]	Velocidad calculada [rad/s]	Porcentaje de error - velocidades
515.309	101.710663	102.836	-1.09%
	101.760507		-1.05%
	99.1544003		-3.58%
	91.3291871		-11.19%
	86.4095258		-15.97%
550.309	101.695435	102.475	-0.76%
	101.743236		-0.71%
	101.745584		-0.71%
	101.707934		-0.75%
	101.939509		-0.52%
	101.660363		-0.79%
	101.753613		-0.70%

588.104	101.680892	102.053	-0.36%
	101.745735		-0.30%
	91.366155		-10.47%
	101.732782		-0.31%
	83.9030345		-17.78%
	101.74316		-0.30%
	101.68839		-0.36%
614.522	101.749749	101.732	0.02%
	101.727705		0.00%
	108.938796		7.08%
	101.78558		0.05%
	101.725509		-0.01%
	101.681269		-0.05%

Tabla 41. Comparativa de Velocidades, Potencia como eje, motor 463-AP1.

Potencia de entrada [kW]	Corrientes medidas [A]	Corriente calculada [A]	Porcentaje de error - corrientes
515.309	519.659291	499.750	3.98%
	520.048035		4.06%
	520.184824		4.09%
	519.377276		3.93%
	519.842356		4.02%
550.309	557.584468	538.888	3.47%
	553.660848		2.74%
	555.474727		3.08%
	559.000776		3.73%
	554.303039		2.86%
	554.252548		2.85%
	556.667636		3.30%

588.104	593.975804	582.997	1.88%
	592.683599		1.66%
	593.314618		1.77%
	593.234997		1.76%
	593.869012		1.86%
	593.89478		1.87%
	592.981302		1.71%
614.522	618.676624	615.346	0.54%
	621.594924		1.02%
	620.621429		0.86%
	618.336228		0.49%
	619.518045		0.68%
	620.348956		0.81%

Tabla 42. Comparativa de Corrientes, Potencia como eje, motor 463-AP1.