



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR INGENIEROS  
INDUSTRIALES VALENCIA

**TRABAJO FIN DE MÁSTER UNIVERSITARIO EN TECNOLOGÍAS ENERGÉTICAS  
PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE**

# DESARROLLO DE UN MODELO FÍSICO DE PREDICCIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO DE UNA PLANTA INDUSTRIAL DEDICADA A LA FABRICACIÓN DE ÁRIDOS

AUTOR: CARDOZO DUARTE, JOHN ALEXANDER

TUTOR: ALCÁZAR ORTEGA, MANUEL

COTUTOR: ROJAS POVEDA, JUAN PABLO

**Curso Académico: 2018 - 19**

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero agradecer en primer lugar a mis padres, Hugo y Luz María, por el apoyo que han brindado en su disposición de tiempo para colaborar con este sueño, además de su paciencia en todos los días de trabajo.

A Wilson, Juan Pablo y a todo el equipo de Vértebra que me ha brindado una mano en los momentos de mayor necesidad y han creído y aportado para obtener este resultado.

Agradezco también a los mejores amigos que pude haber encontrado en MUTEDS por la oportunidad de encontrar ideas en los problemas que parecían no tener solución y sentir que nunca se está solo cuando se tiene un sueño.

Por último, y no menos importante, quiero agradecer a Viviana por haber sido el mejor apoyo para mantenerme constante en este camino, por todas las veces en las que me impulsó y aconsejó durante los momentos de flaqueza y quien ha vivido todo lo que significa poder entregar los resultados de este proyecto.

# Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos

---

## RESUMEN

Dentro de las herramientas ofrecidas en sectores industriales para procesos de optimización energética, se usan principalmente sistemas de medición energética para establecer, posteriormente a su uso, rutas de gestión energética al usuario; dentro de los principales actores industriales en el panorama de Colombia se encuentran las empresas de agregado pétreos, en las cuales el consumo de energía representa más de una cuarta parte de sus costos de producción y se ven limitados por los costos de implementar medidas de ahorro energético sin conocer con certeza los impactos de reducción en el consumo de energía.

Sin embargo, existen diferentes herramientas matemáticas poco usadas para el análisis energético comercialmente; los modelos matemáticos de energía permiten conocer de manera precisa el consumo energético de una máquina conociendo variables asociadas a su operación. Con el fin de crear una herramienta útil para el sector de áridos, este proyecto realizará un análisis de las máquinas eléctricas usadas en la trituración pétreo y sus modelos que demuestren los mejores resultados de predicción energética en producción, para ser desglosados y conectados a los demás modelos de las máquinas, que operan en serie dentro de una planta, y desarrollar un modelo matemático completo de una planta de áridos que relacione las variables de las diferentes máquinas para obtener un ciclo de operación continuo que entregue valores detallados de la energía eléctrica de cada máquina y de la planta en su totalidad, con base en datos operativos y constructivos de los equipos del usuario, para tomar decisiones adecuadas de implementación energética sin necesidad de inversiones previas.

Para esto, el modelo será simulado en un software matemático que contará con una interfaz en la que se ingresen los datos de entrada de la planta y entregue gráficas y valores del consumo energético de la planta descrita por el usuario del software, validado con la operación y consumo de una planta real.

**Palabras clave:** *Modelación matemática, índice de trabajo, relación de trituración, predicción energética, operación en serie, ciclos de trituración, Matlab, simulación energética, curvas de producción.*

## **ABSTRACT**

Among the tools offered in industrial sectors for energy optimization, energy measurement systems are mainly used to establish, after its use, energy management routes to the user; one of the principal industrial actors in the Colombian landscape are stone aggregate companies, in which energy consumption represents more than a quarter of their production costs and are limited by the costs of implementing energy saving measures without knowing with certainty the impacts of reduction in energy consumption.

However, there are different mathematical tools barely used for commercial energy analysis; the mathematical models of energy allow to know in a precise way the energy consumption of a machine knowing variables associated to its operation. In order to create a useful tool for the aggregates sector, this project will carry out an analysis of the electrical machines used in stone crushing process and their models that show the best results of energy prediction in production, to be analyzed and connected to other machine models, which operate in series within a plant, and develop a complete mathematical model of an aggregate plant that relates the variables of the different machines to obtain a continuous operating cycle that delivers detailed values of the electrical energy consumption of each machine and the plant as a whole, based on operational and constructive data of the user's equipment, to make appropriate energy implementation decisions without needing prior investments.

To do this, the model will be simulated in a mathematical software that will have an interface in which the input data of the plant is entered and provides graphs and values of the energy consumption of the plant described by the software user, this software will be validated with the operation and consumption of a real plant.

**Keywords:** *Mathematical modeling, work index, reduction ratio, energy prediction, series operation, crushing cycles, Matlab, energy simulation, production curves.*



**MEMORIA DEL TFM**

# Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos

---

## ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS.....	1
RESUMEN .....	2
ABSTRACT .....	3
MEMORIA DEL TFM.....	4
ÍNDICE.....	5
ÍNDICE DE FIGURAS .....	7
ÍNDICE DE TABLAS .....	9
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN .....	11
1.1. ANTECEDENTES .....	11
1.2. MOTIVACIÓN .....	14
1.3. OBJETIVOS .....	15
1.4. ALCANCE.....	15
1.5. NORMATIVA .....	16
1.6. NOMENCLATURA.....	17
1.7. ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO .....	20
CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE .....	21
2.1. INTRODUCCIÓN AL CAPÍTULO .....	21
2.2. TRITURADORAS DE PIEDRA A GRAN ESCALA.....	21
2.2.1. Trituración primaria.....	22
2.2.2. Trituración intermedia (secundaria) .....	22
2.2.3. Trituración fina (terciaria y cuaternaria) .....	22
2.3. ÍNDICE DE TRABAJO EN TRITURADOS .....	23
2.4. MAQUINARIA EN LA INDUSTRIA DE TRITURACIÓN .....	25
2.4.1. Trituradora de mandíbulas.....	26
2.4.2. Molinos de bolas .....	27
2.4.3. Trituradora tipo cono .....	28
2.4.4. Zaranda vibratoria .....	30
2.4.5. Banda transportadora .....	31
2.4.6. Iluminación .....	31
2.4.7. Tecnologías de lavado .....	32

# Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos

---

2.5.	SOBRE EL MODELO MATEMÁTICO .....	33
2.5.1.	Variables aleatorias del modelo .....	33
2.6.	SOBRE GRAVICON.....	34
2.7.	RESUMEN DEL CAPÍTULO .....	36
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA.....		38
3.1.	INTRODUCCIÓN AL CAPÍTULO .....	38
3.2.	DIAGRAMA DE FLUJO DE LA METODOLOGÍA DE ESTUDIO .....	38
3.3.	DESARROLLO DEL MODELO MATEMÁTICO.....	41
3.3.1.	Análisis de la operación de una planta de agregados pétreos.....	41
3.3.2.	Modelos matemáticos para las máquinas eléctricas de operación en una planta de agregados pétreos.....	43
3.3.3.	Análisis de las variables del modelo energético.....	49
3.3.4.	Modelos matemáticos de servicios auxiliares en plantas de agregados pétreos .....	58
3.3.5.	Potencia y energía eléctrica de una planta de agregados pétreos obtenidas a partir de los modelos matemáticos.....	60
3.3.6.	Definición del material pétreo de alimentación como variable aleatoria dentro del proceso de trituración.....	61
3.4.	DISEÑO DEL MODELO MATEMÁTICO EN SOFTWARE DE SIMULACIÓN .....	63
3.4.1.	Software de simulación matemática: MatLab .....	63
3.4.2.	Creación de los modelos de las máquinas eléctricas .....	63
3.4.3.	Integración de los subsistemas y desarrollo del modelo general de la planta .....	66
3.4.4.	Consideraciones especiales.....	66
3.4.5.	Resultado del diseño del modelo matemático en el software de simulación .....	67
3.5.	RESUMEN DEL CAPÍTULO .....	69
CAPÍTULO 4. VALIDACIÓN Y APLICACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO PARA PROCESOS DE OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA .....		70
4.1.	INTRODUCCIÓN AL CAPÍTULO .....	70
4.2.	VALIDACIÓN DEL MODELO ENERGÉTICO CON LOS DATOS RECOLECTADOS DE LA PLANTA DE TRITURACIÓN CAÑAVERAL.....	70
4.2.1.	Descripción de las etapas de medición energética y recolección de datos .....	70
4.2.2.	Datos de producción y consumo energético reales de la planta Cañaveral .....	73
4.2.3.	Comparativa de resultados del modelo energético con los consumos reales.....	77
4.3.	USO DEL MODELO ENERGÉTICO PARA RECOMENDACIONES ENERGÉTICAS CON UN CASO DE PRODUCCIÓN .....	93

# Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos

4.3.1.	Aplicación I - Velocidades variables en las bandas transportadoras.....	93
4.3.2.	Aplicación II - Cambios en las relaciones de trituración por etapas.....	98
4.4.	RESUMEN DEL CAPÍTULO .....	102
CAPÍTULO 5. RESUMEN Y CONCLUSIONES .....		104
5.1.	CONCLUSIONES .....	104
5.2.	TRABAJOS FUTUROS.....	105
BIBLIOGRAFÍA .....		107

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Evolución PIB en Colombia según actividad económica elaborado por la UPME [2]. .....	11
Figura 2.	Participación promedio sectorial dentro del consumo de electricidad 2013-2017 [2].....	12
Figura 3.	Modelo gráfico de una planta trituradora [11] .....	22
Figura 4.	Diagrama de trituradora de mandíbula.....	27
Figura 5.	Diagrama de molino de bolas.....	28
Figura 6.	Diagrama de trituradora de cono [19] .....	29
Figura 7.	Vista superior de la operación de trituradora de cono .....	29
Figura 8.	Diagrama de operación de una zaranda vibratoria [14] .....	30
Figura 9.	Vista general de la planta Gravicon.....	35
Figura 10.	Diagrama de operación de una planta de trituración con circuito cerrado.....	42
Figura 11.	Diagrama de operación de una planta de trituración con circuito abierto.....	43
Figura 12.	Diagrama de flujo de potencia de un motor eléctrico de inducción [31]. .....	45
Figura 13.	Curva de desempeño de carga de un motor WEG W22 IE2 Trifásico de 15kW [32]. .....	47
Figura 14.	Geometría de operación de trituradora tipo mandíbula. ....	50
Figura 15.	Geometría de operación de trituradora de cono .....	51
Figura 16.	Distancia del centro de gravedad de la carga [18] .....	52
Figura 17.	Relación del porcentaje de carga del molino de bolas J con el centro de gravedad de la carga Hcog [18] .....	53
Figura 18.	Equilibrio de fuerzas sobre una bola debido a la velocidad de giro del molino [18] .....	53
Figura 19.	Movimiento del material particulado desde la alimentación hasta su salida en el tiempo t. ..	57
Figura 20.	Consumo eléctrico de la primera etapa de la planta Gravicon, datos aportados por Vertebra Soluciones.....	61
Figura 21.	Gráfica log-normal del tamaño de las muestras vs el paso de material acumulado por tamices [27]. .....	62
Figura 22.	Vista de bloque del subsistema de una trituradora de mandíbula desarrollada en Simulink para aplicación del proyecto .....	64
Figura 23.	Vista interna del sub-sistema de la trituradora de mandíbula de la figura 20.....	64
Figura 24.	Datos suministrados por la ficha técnica de una trituradora tipo cono marca Metso [42]......	65
Figura 25.	Captura del modelo de simulación - Ingreso de datos de una trituradora tipo cono.....	65

## **Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos**

---

Figura 26. Captura de las tablas en Excel sobre los datos operativos de bandas transportadoras del modelo. ....	66
Figura 27. Diagrama unifilar de las subestaciones de Gravicon [28]. ....	71
Figura 28. Participación en el consumo de energía total de las instalaciones por subestación [28]. ....	72
Figura 29. Producción vs. Consumo energético diario de las instalaciones de Gravicon en junio del 2019 .....	74
Figura 30. Producción de material en la planta Cañaverl - 3 de julio del 2019.....	75
Figura 31. Consumos energéticos de las cargas monitoreadas de la planta Cañaverl - 3 de julio del 2019 [43]. ....	75
Figura 32. Producción de material en la planta Cañaverl - 21 de junio del 2019.....	76
Figura 33. Consumos energéticos de las cargas monitoreadas de la planta Cañaverl - 3 de julio del 2019 [43]. ....	77
Figura 34. Comparativa de resultados del consumo energético de la banda principal para jornada continua. ....	78
Figura 35. Comparativa de resultados del consumo energético de la trituradora de mandíbula del primer ciclo para jornada continua. ....	79
Figura 36. Comparativa de resultados del consumo energético de zaranda vibratoria del primer ciclo para jornada continua. ....	80
Figura 37. Comparativa de resultados del consumo energético de la trituradora tipo cono del segundo ciclo para jornada continua.....	81
Figura 38. Comparativa de resultados del consumo energético de la planta Cañaverl para jornada continua.....	83
Figura 39. Comparativa de resultados del consumo energético de la banda principal para jornada baja. ....	84
Figura 40. Comparativa de resultados del consumo energético de la trituradora de mandíbula del primer ciclo para jornada baja. ....	86
Figura 41. Comparativa de resultados del consumo energético de zaranda vibratoria del primer ciclo para jornada baja.....	87
Figura 42. Comparativa de resultados del consumo energético de la trituradora tipo cono del segundo ciclo para jornada baja. ....	88
Figura 43. Comparativa de resultados del consumo energético de la planta Cañaverl para jornada baja. ....	90
Figura 44. Producción de material para la simulación de las aplicaciones I y II.....	94
Figura 45. Velocidad de operación de las bandas transportadoras - Simulación aplicación I. ....	94
Figura 46. Resultado consumo energético planta total - simulación aplicación I.....	95
Figura 47. Resultado de consumo energético de banda transportadora principal – simulación aplicación I. ....	95
Figura 48. Resultados de consumo energético de la zaranda vibratoria del ciclo 1 - Simulación aplicación I. ....	96
Figura 49. Resultados de consumo energético de la trituradora del ciclo 1 - Simulación aplicación I. ....	97
Figura 50. Resultados del consumo energético de la trituradora del primer ciclo - Simulación aplicación II. ....	100
Figura 51. Resultados del consumo energético de la trituradora del segundo ciclo - Simulación aplicación II. ....	100

# Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos

Figura 52. Resultados del consumo energético de la trituradora del tercer ciclo - Simulación aplicación II. ....	101
Figura 53. Resultados del consumo energético total de la planta - Simulación aplicación II. ....	101

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de los minerales en Colombia según Ingeominas[3] .....	12
Tabla 2. Índice de trabajo de Bond – Trituración [11].....	24
Tabla 3. Rango de operación típica de los principales equipos de trituración .....	25
Tabla 4. Equipos usados para trituración de diferentes tipos de materiales [15] .....	26
Tabla 5. Tipos de trituradoras de mandíbula .....	27
Tabla 6. Características de diseño de trituradoras de cono [19] .....	29
Tabla 7. Ejemplos de trituradora de cono .....	30
Tabla 8. Niveles de iluminancia requeridos según el tipo de actividad .....	32
Tabla 9. Plantas de trituración de Gravicon S.A.S. ....	35
Tabla 10. Equipos de operación en la planta Cañaveral - Gravicon .....	36
Tabla 11. Distribución del material por zarandas en circuito cerrado. ....	42
Tabla 12. Distribución del material por zarandas en circuito abierto. ....	43
Tabla 13. Modelos matemáticos de las máquinas eléctricas principales .....	44
Tabla 14. Factor de multiplicación de la potencia útil en función de la temperatura ambiente e °C y de la altura en metros [33]. ....	49
Tabla 15. Características de fabricación molinos de bolas [34] .....	52
Tabla 16. Parámetros físicos comerciales de bandas transportadoras [36][37].....	55
Tabla 17. Valores estandarizados para el coeficiente de fricción f [35]. ....	56
Tabla 18. Valores estandarizados para el coeficiente de longitud C [35]. ....	56
Tabla 19. Modelos de zarandas vibratorias para agregados pétreos [38]. ....	57
Tabla 20. Eficacia lumínica de tecnologías de alumbrado[41] .....	59
Tabla 21. Formato de distribución de material log-normal para material pétreo de canteras .....	62
Tabla 22. Distribución de subestaciones Gravicon.....	71
Tabla 23. Cargas eléctricas monitoreadas por Vertebra Soluciones en la planta Cañaveral .....	73
Tabla 24. Indicadores de consumo energético planta Cañaveral - Junio 2019.....	73
Tabla 25. Características de operación de la planta Cañaveral - 3 de julio del 2019.....	75
Tabla 26. Características de operación de la planta Cañaveral – 21 de junio del 2019.....	76
Tabla 27. Comparativa de valores energéticos de la banda principal para jornada continua.....	78
Tabla 28. Comparativa de valores energéticos de la trituradora de mandíbula del primer ciclo para jornada continua.....	79
Tabla 29. Comparativa de valores energéticos de la zaranda vibratoria del primer ciclo para jornada continua.....	80
Tabla 30. Comparativa de valores energéticos de la trituradora tipo cono del segundo ciclo para jornada continua.....	82
Tabla 31. Comparativa de valores energéticos de la planta Cañaveral para jornada continua.....	83
Tabla 32. Comparativa de valores energéticos de la banda principal para jornada baja. ....	85

## **Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos**

---

Tabla 33. Comparativa de valores energéticos de la trituradora de mandíbula del primer ciclo para jornada baja.....	86
Tabla 34. Comparativa de valores energéticos de la zaranda vibratoria del primer ciclo para jornada baja.....	87
Tabla 35. Comparativa de valores energéticos de la trituradora tipo cono del segundo ciclo para jornada baja.....	89
Tabla 36. Comparativa de valores energéticos de la planta Cañaveral para jornada baja.....	90
Tabla 37. Resumen de las simulaciones energéticas y su comparación con los consumos reales.....	91
Tabla 38. Características de operación de la planta - simulación aplicación I.....	93
Tabla 39. Resumen resultados de consumos energéticos - Simulación aplicación I.....	97
Tabla 40. Características de operación de la planta - Simulación aplicación II.....	99
Tabla 41. Relaciones de trituración y tamaños de filtro - Simulación aplicación II.....	99
Tabla 42. Resumen de resultados de la simulación aplicación II.....	102
Tabla 43. Aplicaciones del modelo predictivo de energía para plantas de fabricación de áridos.....	103

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. ANTECEDENTES

La industria de agregados pétreos es un sector industrial importante que se dedica a la producción de piedra triturada de diversos tamaños, dependiendo de los requisitos que actúan como materia prima para diversas actividades de construcción como la construcción de carreteras, autopistas, puentes, edificios, canales, etc.[1]

Esta industria constituye una de las principales actividades económicas dentro de Colombia en los últimos años, como se puede apreciar en la figura 1, en la que las actividades de explotación de canteras han generado más de 60.000 millones de pesos colombianos en los últimos ocho años (17 millones de euros a tasa de cambio de febrero del 2019).

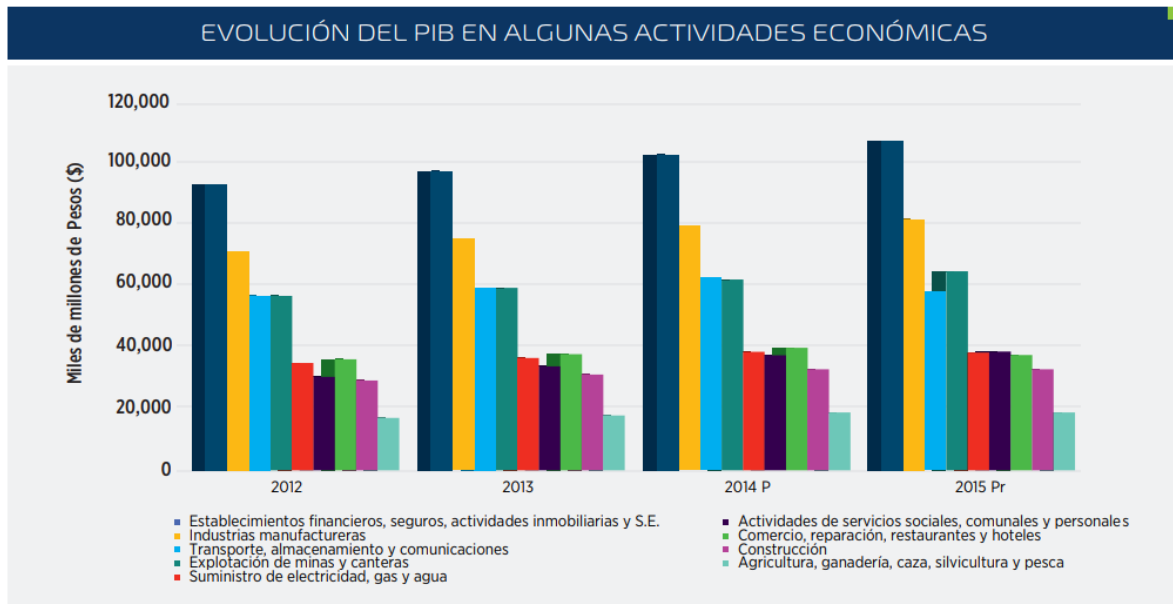


Figura 1. Evolución PIB en Colombia según actividad económica elaborado por la UPME [2].

Los principales minerales que se explotan, transforman y comercializan en Colombia son agrupados según la UPME (Unidad de Planeación Minero Energética – Organismo Oficial) en siete grupos, según la utilidad de sus recursos [3]:

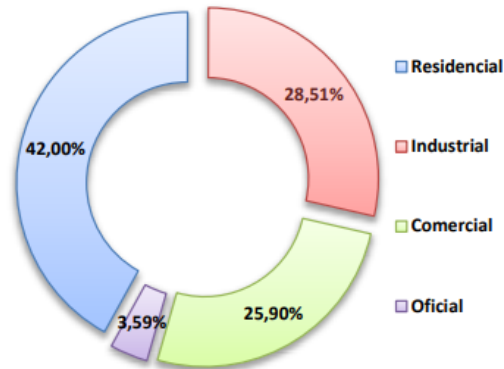


## Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos

Tabla 1. Clasificación de los minerales en Colombia según Ingeominas[3]

Clasificación	Principales materiales extraídos en Colombia
<b>Materiales de construcción</b>	Calizas, arcillas, arenas, gravas, rocas ornamentales
<b>Minerales energéticos</b>	Carbón, uranio
<b>Minerales industriales</b>	Fosfatos, grafito, yeso, sal
<b>Metales especiales</b>	Titanio, mercurio
<b>Metales de industria de acero</b>	Hierro, níquel
<b>Metales base</b>	Cobre, plomo, zinc
<b>Metales preciosos</b>	Oro, plata, platino, esmeralda, diamantes

Esta actividad de explotación minera hace parte de una de las principales actividades de ingreso económico al PIB del país como muestra la figura 1, pero así mismo, es una de las principales actividades industriales del país. La importancia de las actividades minerales en Colombia se refleja en la participación que tienen estas empresas dentro de la demanda total energética del país como muestra la figura 2:



Fuente: UPME, Base de Datos SUI, 2018.

Figura 2. Participación promedio sectorial dentro del consumo de electricidad 2013-2017 [2]

Dentro de los Grandes Consumidores de Energía (GCE) de Colombia logran consumir anualmente en conjunto más del 5% de la energía total del país [2], entre los cuales se encuentran tres grandes empresas dedicadas a la explotación y transformación de agregados pétreos como principal actividad económica.

Los agregados se refieren a cualquier combinación de arena, grava o roca triturada en su estado natural o procesado. Son minerales comunes, resultado de las fuerzas geológicas erosivas del agua y del viento. Son generalmente encontrados en ríos y valles, donde han sido depositados por las corrientes de agua.

El costo energético en los procesos de las empresas de agregados pétreos dentro del costo total de su producción es en promedio un 28%, según la empresa Argos, una de las más grande en derivados pétreos y materiales de construcción en Colombia [4]. Esto demuestra la importancia optimizar los procesos energéticos de estas empresas para poder disminuir los costos de producción y ser más competitivas en el mercado; por otra parte, un control adecuado en los procesos energéticos de las empresas en este sector, pueden representar un ahorro importante en recursos de generación

## **Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos**

---

eléctrica del país, para otros proyectos social y ambientalmente responsables dentro de la planeación energética de Colombia.

Estas empresas de agregados pétreos deben contar con un suministro fiable de fuentes de energía que respalden los procesos de producción en los espacios y tiempos requeridos por las empresas en su operación de manera eficiente. Por otra parte, el acceso para el movimiento de piedras minadas y productos de piedra triturada representan una variable muy importante en la eficiencia de los procesos, por ende, en los costes de su producción. Es por esta razón que la mayoría de las trituradoras de piedra están ubicadas a lo largo de la periferia de las ciudades o cerca de grandes proyectos de construcción. Igualmente, para las trituradoras es de gran importancia estar ubicadas cerca de la fuente de materia prima, como las minas de piedra, las camas de río, etc. [5]

De esta manera, diferentes factores geográficos, ambientales y constructivos pueden afectar el consumo energético de una empresa de agregado pétreos, un control preventivo en sus procesos de producción de vista al consumo de energía representa una herramienta de optimización importante. Pero para poder planear rutinas de producción orientadas a mejorar la eficiencia energética de una empresa, esta debe contar con un modelo predictivo que le permita realizar simulaciones de consumos de energía antes de ejecutarlas, teniendo en cuenta todas las variables mecánicas y ambientales en los diferentes procesos que componen el desarrollo de trituración de una fábrica, desde el transporte del material, hasta el producto final obtenido y entregado al cliente.

De esta manera, se podrían plantear diferentes rutinas de producción en diferentes etapas del proceso de producción que den como resultado escenarios que puedan mejorar la eficiencia energética de una planta, sin necesidad de realizar cambios físicos en la empresa.

## **Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos**

---

### **1.2. MOTIVACIÓN**

La energía eléctrica consumida en los procesos de producción en la industria de agregados pétreos representa uno de sus principales costos, como se analizó en la sección anterior. Por esta razón, las plantas de agregados pétreos deben implementar medidas que les permita ser eficientes en sus consumos energéticos con el fin de reducir sus costos de producción.

Sin embargo, la implementación de una gestión adecuada de eficiencia energética se basa, en la mayoría de los casos, en acciones que se toman a partir de mediciones de consumo posteriores al proceso de producción, es decir, no se pueden implementar gestiones para mejorar el consumo energético hasta haber completado un proceso de medición.

Los sistemas de monitoreo energético están asociados directamente, en la actualidad, a la capacidad de una empresa de gestionar y mejorar sus consumos de energía; entre más completos y complejos sean estos sistemas, mayor será la información que obtendrán las empresas para conocer los puntos en los que pueden realizar mejoras en el uso de la energía. Sin embargo, muchas veces, los sistemas de monitoreo energético más completos representan mayores costos tanto en su instalación como en la gestión de análisis de la información obtenida.

Por esta razón, el presente estudio, en trabajo conjunto con la empresa colombiana de monitoreo y gestión energética Vértebra Soluciones, busca desarrollar una nueva alternativa de análisis energético en el sector de agregados pétreos, mediante una herramienta que utilice modelos matemáticos de consumo energético para predecir los consumos energéticos de una planta a partir de la producción esperada y las características electromecánicas de sus instalaciones, basada en la normativa ISO 50001 de gestión de la energía, que se realimente de la experiencia y herramientas de la empresa Vertebrata para entregar a los usuarios que utilicen este modelo, información predictiva confiable y útil para mejorar sus procesos de producción sin instalar equipos o que permita tomar decisiones de inversiones en nueva maquinaria para la planta.

## **Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos**

---

### **1.3. OBJETIVOS**

El objetivo de este documento es estudiar los patrones de consumo energético de plantas de agregados pétreos en base a sus procesos de producción y desarrollar un modelo físico matemático de las máquinas involucradas en el proceso de la trituración de piedras, que sirva como herramienta para predecir los consumos de energía de dichas plantas, así como su implementación en un software de simulación.

El modelo físico de dichos procesos dispondrá de una interfaz que permitirá al usuario introducir de forma cómoda y estandarizada los datos de entrada, tales como producción esperada, datos técnicos de los equipos, horarios de trabajo, costo unitario de la energía, entre otras variables, para obtener la energía eléctrica consumida estimada y las pérdidas estimadas en el proceso. El proyecto prevé también la validación del modelo con datos reales de una planta de trituración de piedra ubicada en Colombia.

Con este modelo, el usuario podrá realizar simulaciones que le permitan estudiar el impacto de la aplicación de medidas de ahorro energético y/o económico en su proceso y realizar proyecciones de gestión energética de esta industria como un actor importante en el sector energético.

El modelo desarrollado podrá ser usado en futuros estudios para optimización de procesos en base a la modificación de los patrones de consumo energético mediante la aplicación de medidas no sólo de eficiencia, sino también de acciones dinámicas de respuesta de la demanda.

### **1.4. ALCANCE**

El alcance del proyecto es crear un modelo matemático de simulación energética que integre las máquinas y equipos eléctricos que participan en las diferentes etapas de producción de agregados pétreos para obtener el consumo de energía individual y acumulado de estas plantas.

Esta herramienta va a permitir a las empresas dedicadas a esta actividad predecir el consumo de energía de su proceso de trituración a través de un software de simulación que opere con el modelo desarrollado. Esta herramienta va a asociar los consumos energéticos a las curvas de producción de la planta para establecer indicadores de consumos, asignar el porcentaje de participación de cada máquina en el consumo total e identificar oportunidades de optimización energética durante el proceso.

## Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos

### 1.5. NORMATIVA

Norma	Descripción
<b>NTC- ISO 50001</b>	<p>Es una normativa desarrollada por ISO (International Organization for Standardization) en el que se determinan los requisitos para la gestión de la energía en una organización [6].</p> <p>Esta norma es de aplicación en todo tipo de empresas y organizaciones independientemente de su tamaño o actividad.</p> <p>El objetivo principal de esta Norma es integrar la Gestión de la energía en todos sus aspectos, dentro de una organización con el sistema de Gestión de la Empresa, abarcando desde la compra de energía y materias primas hasta las medidas a adoptar en la empresa para promover el ahorro energético.</p>
<b>INVIAS E-123</b>	<p>Normativa colombiana de ensayo de materiales para carreteras por el Instituto Nacional de Vías de Colombia (INVIAS) para la determinación de los tamaños de las partículas de los suelos en vías vehiculares de Colombia [7].</p> <p>El producto de las fábricas de agregados pétreos es principalmente utilizado como material de construcción; las fábricas en Colombia deben garantizar la calidad de material bajo esta normativa.</p>
<b>RETIE</b>	<p>Reglamento técnico de instalaciones eléctrica del Ministerio Nacional de Minas y Energías de Colombia [8].</p> <p>Toda instalación eléctrica en Colombia debe ser diseñada, construida y operada bajo el reglamento establecido en este reglamento (obligatorio cumplimiento). El diseño de alimentación eléctrica de los equipos eléctricos que operen en la planta debe diseñarse para cumplir con el RETIE.</p>
<b>RETILAP</b>	<p>Reglamento técnico de iluminación y alumbrado público del Ministerio Nacional de Minas y Energía de Colombia [9].</p> <p>Todo espacio de trabajo industrial debe cumplir con el reglamento establecido en este documento para permitir su operación.</p>
<b>NTC 2050</b>	<p>Norma Técnica Colombiana del código eléctrico de Colombia [10]. Reúne las normativas de diferentes estándares internacionales para asegurar la correcta operación de las instalaciones eléctricas en Colombia.</p> <p>No es de obligatorio cumplimiento, pero el reglamento RETIE y diferentes entidades de certificación y gestión de calidad exigen su cumplimiento.</p>

# Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos

## 1.6. NOMENCLATURA

### Variables Generales

Nomenclatura	Descripción	Unidad
$E_{PT}$	Energía consumida por la operación completa de la planta de agregados pétreos	kWh
$T$	Periodo de tiempo a evaluar para el consumo energético de la planta	h
$P_{PT}$	Potencia requerida para la operación completa de la planta de agregados pétreos	kW
$n_{em}$	Número de equipos electromecánicos del proceso de trituración de la planta de agregados pétreos	-
$P_T$	Potencia eléctrica del proceso de trituración de la planta (sin auxiliares)	kW
$P_{Ad}$	Potencia de equipos adicionales no identificados en la operación de la planta	kW
$W_i$	Índice de trabajo de Bond para el material triturado en la planta	kW/ton
$g$	Aceleración gravitacional	m/s <sup>2</sup>

### Variables Trituradora de Mandíbula

Nomenclatura	Descripción	Unidad
$P_{mtm}$	Potencia mecánica consumida en tiempo real de la trituradora de mandíbula	kW
$P_{etm}$	Potencia eléctrica consumida en tiempo real de la trituradora de mandíbula	kW
$Q_{tm}$	Tasa de entrada del material particulado a la trituradora de mandíbula	ton/h
$F_{80 tm}$	Tamaño del tamiz por el que pasa el 80% del mineral de alimentación	m
$P_{80 tm}$	Tamaño de salida del tamiz por el que pasa el 80% del mineral producto	m
$G_{tm}$	Apertura de entrada de material de la trituradora de mandíbula	m
$L_{Ttm}$	Longitud de ajuste de salida de la trituradora de mandíbula	m
$L_{min tm}$	Longitud de apertura mínima de salida – mayor relación de trituración	m
$L_{max tm}$	Longitud de apertura máxima de salida – menor relación de trituración	m

### Variables Trituradora Tipo Cono

Nomenclatura	Descripción	Unidad
$P_{mtc}$	Potencia mecánica consumida en tiempo real de la trituradora tipo cono	kWh
$P_{etc}$	Potencia eléctrica consumida en tiempo real de la trituradora tipo cono	kWh
$Q_{tc}$	Tasa de entrada del material particulado a la trituradora tipo cono	ton/h
$F_{80 tc}$	Tamaño del tamiz por el que pasa el 80% del mineral de alimentación	m
$P_{80 tc}$	Tamaño de salida del tamiz por el que pasa el 80% del mineral producto	m
$G_{tc}$	Apertura de entrada de material de la trituradora tipo cono	m
$L_{Ttc}$	Longitud de ajuste de salida de la trituradora tipo cono	m
$L_{min tc}$	Longitud de apertura mínima de salida – mayor relación de trituración	m
$L_{max tc}$	Longitud de apertura máxima de salida – menor relación de trituración	m

## Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos

### Variables de molino de bolas

Nomenclatura	Descripción	Unidad
$P_{mmb}$	Potencia mecánica consumida en tiempo real del molino de bolas	kW
$P_{emb}$	Potencia eléctrica consumida en tiempo real del molino de bolas	kW
$H_{cog}$	Distancia del centro del molino de bolas al centro de gravedad de la carga	m
$M_{mb}$	Masa de la carga en el molino de bolas	ton
$\alpha_{mb}$	Ángulo de reposo de la carga dentro del molino de bolas	rad
$R_{mb}$	Radio del molino de bolas	m
$r_{mb}$	Radio de las bolas de acero	m

### Variables de banda transportadora

Nomenclatura	Descripción	Unidad
$P_{mbt}$	Potencia mecánica consumida en tiempo real de la banda transportadora	kW
$P_{ebt}$	Potencia eléctrica consumida en tiempo real de la banda transportadora	kW
$v_{bt}$	Velocidad de la banda transportadora	m/s
$F_u$	Fuerza motriz de la banda transportadora	N
$F_H$	Resistencia primaria de la banda transportadora	N
$F_N$	Resistencia secundaria de la banda transportadora	N
$F_{ST}$	Resistencia de deslizamiento de la banda transportadora	N
$q_{rc}$	Masa unitaria de las partes rodantes superiores	kg/m
$q_{ru}$	Masa unitaria de las partes rodantes inferiores	kg/m
$q_B$	Masa unitaria de la banda	kg/m
$q_G$	Masa unitaria de la carga	kg/m
$L$	Longitud horizontal total	m
$H_{bt}$	Elevación de la banda transportadora	m
$\delta_{bt}$	Inclinación respecto al ángulo horizontal de la banda transportadora	rad
$f_{bt}$	Factor de fricción del material de la banda transportadora	-
$C_{bt}$	Coficiente por longitud de banda	-

## Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos

### Variables de Zarandas Vibratorias

Nomenclatura	Descripción	Unidad
$P_{mzv}$	Potencia mecánica consumida en tiempo real de la zaranda vibratoria	kW
$P_{ezv}$	Potencia eléctrica consumida en tiempo real de la zaranda vibratoria	kW
$C_{zv}$	Coeficiente de amortiguamiento de los resortes de la zaranda	-
$M_{zv}$	Masa de vibración	kg
$A_{zv}$	Amplitud de vibración mecánica	m
$n_{zv}$	Frecuencia de vibración mecánica	rpm
$d_{zv}$	Diámetro del rodamiento de la zaranda vibratoria	m
$f_m$	Coeficiente de fricción del rodamiento	-
$Q_{ent\ zv}$	Tasa de entrada del material particulado a la zaranda vibratoria	kg/s
$Q_{p\ zv}$	Tasa del material que pasa a través del tamiz de la zaranda	kg/s
$Q_{np\ zv}$	Tasa del material que no pasa a través del tamiz de la zaranda	kg/s
$t_z$	Tiempo de recorrido del material dentro de la zaranda vibratoria	s
$L_z$	Longitud de la bandeja de filtro de la zaranda vibratoria	m
$a_p$	Aceleración del material particulado dentro de la zaranda vibratoria	m/s <sup>2</sup>
$\theta_z$	Ángulo de inclinación de la zaranda vibratoria respecto al plano horizontal	rad

### Variables de Equipos Auxiliares

Nomenclatura	Descripción	Unidad
$P_{mba}$	Potencia mecánica consumida en tiempo real de la bomba de agua	kW
$P_{eba}$	Potencia eléctrica consumida en tiempo real de la bomba de agua	kW
$\mu_{ba}$	Eficiencia eléctrica de la bomba de agua	-
$H_{ba}$	Diferencia de altura de suministro de la bomba de agua	m
$\rho_{lav}$	Densidad del líquido de lavado	kg/m <sup>3</sup>
$\Phi$	Flujo luminoso requerido en las instalaciones	lum
$E_M$	Nivel de iluminación medio o iluminancia	lux
$S$	Superficie de la planta a iluminar	m <sup>2</sup>
$C_u$	Coeficiente de utilización - Relación entre el flujo luminoso recibido por un cuerpo y el flujo emitido por la fuente luminosa	-
$C_m$	Coeficiente de mantenimiento	-
$P_{lum}$	Potencia eléctrica consumida por iluminación	kW
$\mu_{lum}$	Eficacia lumínica de la tecnología escogida	-



## Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos

---

### 1.7. ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO

La presente memoria está organizada en cinco capítulos para abordar el desarrollo del proyecto de forma secuencial y organizada, tanto para la investigación y trabajo que se llevará a cabo, como para el lector del documento.

El primer capítulo *Introducción*, presenta el contexto del proyecto. Para esto, el capítulo se enfoca en explicar los objetivos del trabajo, establecer las condiciones, antecedentes y métodos sobre los que va a partir el proyecto y finalmente, brindar herramientas y guías de seguimiento para todo el documento.

El segundo capítulo *Estado del Arte*, hace referencia a toda la investigación que se realiza previamente al desarrollo del modelo. Sigue paso a paso los conceptos económicos y técnicos bajo los que operan las plantas de trituración pétreo y estudia las máquinas eléctricas que hacen parte del proceso de trituración para comprender las variables que determinan su consumo de energía.

El tercer capítulo *Metodología*, explica los pasos que se han seguido para la creación del modelo matemático de predicción energética, desde las bases teóricas de operación de las máquinas y la integración de sus procesos en un software matemático que permita simular el modelo para cualquier configuración de plantas de fabricación de áridos.

El cuarto capítulo *Validación y aplicación del modelo*, hace referencia a la validación que se hace de los resultados del modelo en el software de simulación, comparándolo con los consumos y la producción reales de una planta de agregados pétreos en Colombia. Por otra parte, hará referencia a las aplicaciones que se dan en este trabajo a la herramienta para obtener herramientas que permitan optimizar los procesos de producción de la planta simulada.

El quinto capítulo *Resume y conclusiones*, presenta los datos que entrega el modelo matemático en el software de simulación y realizando el análisis de estos datos para un caso de una planta de agregados pétreos que permita realizar comparativas de consumos en diferentes condiciones de simulación que demuestran las utilidades del modelo energético.

## **CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE**

### **2.1. INTRODUCCIÓN AL CAPÍTULO**

Con el fin de reconocer todas las condiciones necesarias para crear un modelo matemático que cumpla todas las condiciones físicas y operativas de una planta de fabricación de áridos, se realizará en primer lugar un recorrido a las bases operativas de estas plantas, las etapas que tiene un proceso de trituración, los equipos necesarios para poder realizar estas tareas según el tipo de material de entrada que se disponga, y el árido que se desee de salida, y finalmente, las características mecánicas, eléctricas y operativas de estas máquinas para crear una aproximación a las variables que determinan los consumos energéticos de estos equipos.

Finalmente, se obtendrán todas las herramientas necesarias para crear los diagramas operativos y energéticos de una planta de fabricación de áridos, según los requisitos del usuario del modelo, que encontrará en la sumatoria de los comportamientos energéticos de cada una de sus máquinas, el consumo predictivo total de su planta.

### **2.2. TRITURADORAS DE PIEDRA A GRAN ESCALA**

Aquellas trituradoras que típicamente tienen dos o más equipos de trituradoras de tipo primario, secundario y terciario con al menos 2 o más cribas vibratorias con carga mecanizada, operaciones de transporte de descarga y producción de más de 100 TPH de piedras trituradas se clasifican como trituradoras grandes. Este tipo de trituradora generalmente tiene sus propias minas alquiladas de piedra a cielo abierto y una flota de equipos mecánicos de minería, equipos de transporte, cargadores, etc. Estas trituradoras implican una gran inversión de capital y operan principalmente durante todo el día. Todas las operaciones de transporte se realizan a través de cintas transportadoras adecuadas.

Se pueden clasificar todas las trituradoras en dos grandes grupos:

- a) Trituradoras por compresión: Son aquellas que comprimen el material hasta que este se rompe.
- b) Trituradoras por Impacto: Son aquellas que usan el principio de impactos rápidos para triturar el agregado.

Las trituradoras de mandíbulas, cono, giratorias y de rodillos operan según el principio de compresión, mientras que las trituradoras de impactos y los molinos de martillos usan el principio de impacto.

## Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos

---

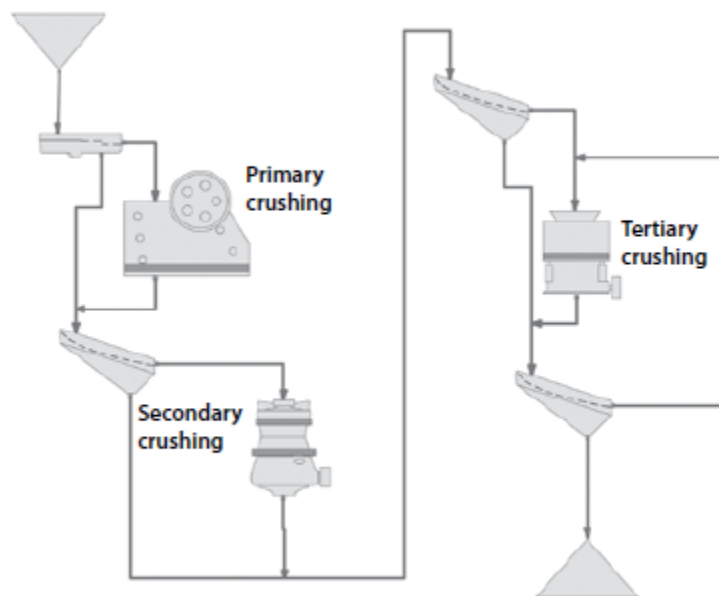


Figura 3. Modelo gráfico de una planta trituradora [11]

### 2.2.1. Trituración primaria

El propósito de la trituración primaria es reducir el material a un tamaño que permita su transporte en bandas transportadoras. En la mayor parte de las instalaciones productoras de agregados, la trituración primaria se hace con una trituradora de mandíbulas. Plantas con capacidades muy elevadas usan normalmente una trituradora giratoria primaria. Cuando el material es fácil de triturar y no muy abrasivo, una trituradora de impactos puede ser la mejor solución para la trituración primaria.[12]

### 2.2.2. Trituración intermedia (secundaria)

El propósito de la trituración intermedia es producir varios productos gruesos – por ejemplo, agregados para terracerías – o preparar el material para retritución final. Si la trituración intermedia se destina a producir balastro para ferrocarriles, la calidad del producto es importante. En los demás casos, normalmente no hay exigencias de calidad con la excepción de que el producto sea adecuado para la trituración fina. En la mayoría de los casos, el objetivo es obtener la mayor reducción posible con los menores costos. [12]

### 2.2.3. Trituración fina (terciaria y cuaternaria)

Estas etapas del proceso de trituración determinan la calidad del producto final. Las especificaciones de calidad son exactas para los productos finales, especialmente en la industria de agregados.

## **Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos**

---

Las exigencias comunes por parte de los clientes en la producción de agregados son la capacidad y la calidad (granulometría). La industria de agregados también tiene exigencias de calidad adicionales, tales como la forma cúbica de las partículas (factor de forma). [12]

### **2.3. ÍNDICE DE TRABAJO EN TRITURADOS**

A lo largo de los años, varios trabajadores han intentado determinar la energía necesaria para triturar rocas. El consumo energético de las operaciones de trituración es estimado por la metodología propuesta por Fred Bond en el año 1952, donde se relacionan los datos empíricos de la energía consumida por tonelada de material, para reducirlo de tamaño.

Desde el punto de vista técnico, el método de Bond constituye el método más fiable de caracterización de un mineral con vistas al diseño de molino o trituradoras en los que se va a procesar. Esta es, sin duda, una ingeniosa aproximación a la práctica, ya que los ensayos de caracterización de materiales se revelaban insuficientes a la hora de predecir el comportamiento de un material ante la trituradora [13].

## Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos

Tabla 2. Índice de trabajo de Bond – Trituración [11]

Sólido [kWh/sh.ton]	Wi	Sólido [kWh/sh.ton]	Wi
Andesita	18,25	Magnetita	9,97
Barita	4,73	Taconita	14,61
Basalto	17,10	Plomo	11,90
Bauxita	8,78	Plomo-Zinc	10,93
Clinker de cemento	13,45	Caliza	12,74
Cemento crudo	10,51	Manganeso	12,20
Arcilla	6,30	Magnesita	11,13
Carbón	13,00	Molibdeno	12,80
Coca	15,13	Níquel	13,65
Cobre	12,72	Esquisto bituminoso	15,84
Diorita	20,90	Fosfato	9,92
Dolomita	11,27	Potasa	8,05
Esmeril	56,70	Pirita	8,93
Feldespato	10,80	Pirrotita	9,57
Ferro-cromo	7,64	Cuarcita	9,58
Ferro-manganeso	8,30	Cuarzo	13,57
Ferro-silicona	10,01	Rutilo	12,68
Pedernal	26,16	Esquisto	15,87
Fluorita	8,91	Arena silica	14,10
Gabbro	18,45	Carburo de silicio	25,87
Vidrio	12,31	Escoria	10,24
Gneis	20,13	Pizarra	14,30
Oro	14,93	Silicato de sodio	13,40
Granito	15,13	Espodumeno	10,37
Grafito	43,56	Sienita	13,13
Grava	16,06	Estaño	10,90
Yeso	6,73	Titanio	12,33
Hematita	12,84	Zinc	11,56

El índice de trabajo de Bond representa la energía requerida para la trituración unitaria de diferentes tipos de materiales, como se muestra en la tabla 2. En general, el método observa que, en el proceso de reducción de tamaño, a medida que el tamaño de las partículas disminuye, el área de superficie de las partículas aumenta. Por lo tanto, una medida de tamaño o área de superficie antes y después de la reducción de tamaño indicaría la cantidad de energía gastada en el proceso de trituración. Bond consideró el trabajo como la energía requerida para la reducción de partículas de alimentación que pasaron del 80% de un tamiz particular a un tamaño de partícula del producto que pasaba el 80% de una abertura del tamiz [14].

## Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos

### 2.4. MAQUINARIA EN LA INDUSTRIA DE TRITURACIÓN

En la industria de trituración se requieren distintas máquinas para lograr obtener los productos agregados finales según los requisitos de cada empresa. Las características de los principales tipos de equipos de reducción de tamaño se enumeran en la tabla 3, incluidos los tamaños de alimentación y producto, la capacidad, el consumo de energía y el índice de reducción promedio. Los equipos de reducción de tamaño grueso funcionan con relaciones de reducción inferiores a 10, mientras que los equipos para partículas más finas operan con relaciones de 100 o más. Algunas veces son necesarias varias operaciones de triturado en serie para reducir material muy grande a partículas pequeñas[15].

Tabla 3. Rango de operación típica de los principales equipos de trituración

Equipo	Tamaño de roca alimentación (mm)	Tamaño de roca producto (mm)	Proporción de reducción	Capacidad (ton/h)	Consumo de potencia (kW)
Trituradora giratoria	200 - 2000	25 - 250	8	100 - 500	100 - 700
Trituradora de mandíbula	100 - 1000	25 - 100	8	10 - 1000	5 - 200
Trituradora de cono	50 - 300	5 - 50	8	10 - 1000	20 - 250
Trituradora de impacto	50 - 300	1 - 10	40	10 - 1000	100 - 2000
Molino de barras	5 - 20	0,5 - 2	10	20 - 500	100 - 4000
Molino de bolas	1 - 10	0,01 - 0,1	100	10 - 300	50 - 5000
Molino tipo martillo	5 - 30	0,01 - 0,1	400	0,1 - 5	1 - 100
Molino jet	1 - 10	0,003 - 0,05	300	0,1 - 2	2 - 100

En el caso de trituración de agregados pétreos, no todas las máquinas que existen en el mercado industrial se adaptan a las condiciones de dureza y tamaño de diferentes industrias, como muestra la tabla 4. Los equipos que se adaptan a la relación de reducción de tamaño respecto al esfuerzo mecánico que requieren las máquinas se muestran en el listado a continuación [15]:

## Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos

Tabla 4. Equipos usados para trituración de diferentes tipos de materiales [15]

Material	Equipos usados
Asbesto y mica	Trituradoras giratorias, molinos tipo martillo
Cemento	Trituradoras giratorias y de mandíbula, molinos de bolas
Carbón	Trituradoras giratorias, pulverizadoras, molinos de bolas y de anillos rodantes
Coca	Molinos de bolas, molinos de barras y molinos de anillos rodantes
Algodón y cuero	Cortadora giratoria
Grafito	Molinos de bolas, molinos de barras y molinos de anillos rodantes
Goma dura	Molinos de rodillos
Cal	Molinos de anillos rodantes, molinos tipo martillo
Minerales metálicos	Trituradoras giratorias y de mandíbula, molinos de bolas
Fosfatos	Molinos de bolas y de anillos rodantes
Polímeros	Pulverizadoras y molinos de desgaste
Sales	Molinos tipo martillo
Agregados pétreos	Trituradoras giratorias de mandíbula y tipo cono
Sulfuros	Molinos de anillos rodantes
Talcos	Trituradoras giratorias y molinos de anillos rodantes

Con base en los circuitos de triturado de uso comercial para agregados pétreos, el presente estudio se enfocará en el análisis de operación y consumo energético de los siguientes equipos para implementar en el modelo energético de una planta trituradora convencional:

- a. Trituradoras de mandíbula
- b. Molinos de bolas
- c. Trituradoras tipo cono/giratorias
- d. Equipos adicionales para la operación de la planta: transporte, cribado, clasificación, iluminación, etc.

### 2.4.1. Trituradora de mandíbulas

En una planta de trituración en la que se desea reducir el tamaño de material de roca o mineral, se utilizan dos máquinas para la trituración primaria: la trituradora de mandíbulas y la trituradora giratoria. En la trituración primaria, el material normalmente se alimenta directamente desde los sitios de explosión y se descarga en la trituradora desde un vehículo de carga. Esto implica que el rango de tamaño del material es grande y puede diferir en hasta tres órdenes de magnitud entre las partículas más pequeñas y más grandes (1–1000 mm). En una trituradora de mandíbulas, el material se tritura entre dos placas: una placa estática y una placa móvil. La compresión se aplica mediante la placa móvil y el material se aplasta. La reducción de tamaño obtenida por una trituradora de mandíbulas se condiciona a la trituración debido a la naturaleza de la máquina. Hay dos tipos principales de trituradoras de mandíbula: una sola palanca y una doble [16].

## Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos

Las trituradoras de mandíbulas han demostrado ser prioritarias en la industria de los agregados y son máquinas que reducen el tamaño máximo, pero no crean finos ni partículas cúbicas en la misma medida que, por ejemplo, una trituradora de cono. Las trituradoras de mandíbula se utilizan principalmente en operaciones en las que los volúmenes involucrados no justifican una trituradora giratoria. El rendimiento de una trituradora de mandíbulas varía entre 30 y 1200 tph.

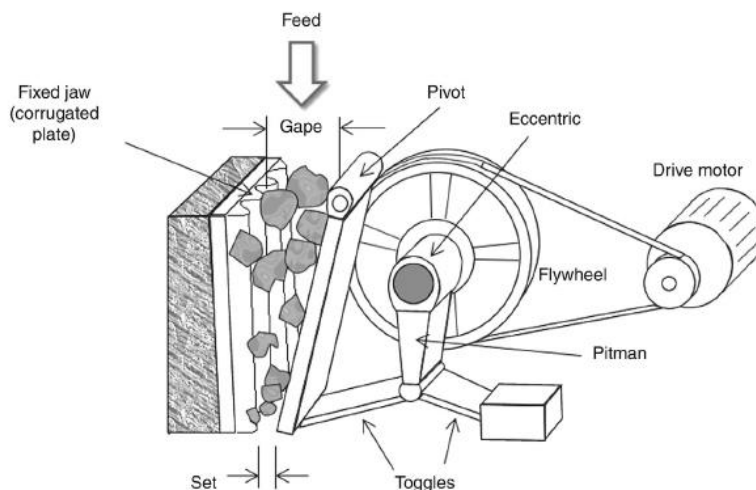


Figura 4. Diagrama de trituradora de mandíbula

La placa móvil aplica la fuerza de impacto sobre las partículas mantenidas contra la placa estacionaria como se muestra en la figura 4. Ambas placas están atornilladas a un bloque pesado. La placa móvil se gira en el extremo superior (trituradora Blake) o en el extremo inferior (trituradora tipo Dodge) y se conecta a un eje excéntrico. En las trituradoras universales, las placas se giran en el medio para que los extremos superior e inferior puedan moverse [17].

Tabla 5. Tipos de trituradoras de mandíbula

Tipo de trituradora (mandíbula)	Tamaño (mm)				Proporción de reducción		Potencia (kW)		Velocidad de giro (rpm)	
	Abertura		Ancho		Rango	Promedio	Min	Max	Min	Max
	Min	Max	Min	Max						
Blake, doble palanca	125	1600	150	2100	4:1/9:1	7:1	2,25	225	100	300
Palanca sencilla	125	1600	150	2100	4:1/9:1	7:1	2,25	400	120	300
Tipo Dodge	100	280	150	280	4:1/9:1	7:1	2,25	11	250	300

### 2.4.2. Molinos de bolas

El objetivo habitual de reducir el tamaño de las piezas de mineral es separar el mineral de interés contenido en el cuerpo de los minerales asociados. La reducción de tamaño se logra moliendo el mineral triturado en molinos tubulares o dispositivos tales como molinos de bolas o molinos de rodillos. En los molinos tubulares, un medio de molienda como bolas de acero imparte las fuerzas necesarias para la reducción de tamaño. Al girar un molino cargado con rocas y medios de molienda



## Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos

(bolas de acero), toda la carga se eleva contra el perímetro del molino en la dirección del movimiento. Al alcanzar cierta altura, parte de la carga cae en cascada y cae al fondo del molino; la otra parte tiende a deslizarse hacia abajo, pero pronto viaja en la dirección de movimiento del molino. Durante este proceso, los medios caen repetidamente sobre la roca rompiendo su tamaño. También se produce cierta reducción de tamaño debido a las fuerzas abrasivas. Como resultado de la acción combinada del impacto y la abrasión repetidos a lo largo del tiempo, se produce una reducción de tamaño y, si se da el tiempo suficiente, se libera el mineral de interés, como muestra la figura 5 [18].

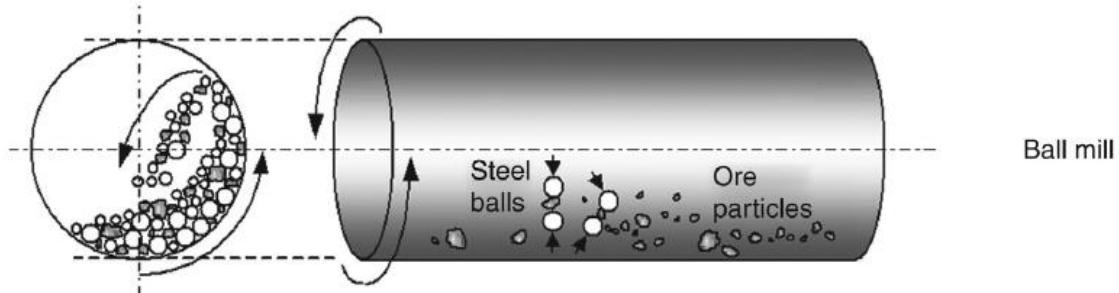


Figura 5. Diagrama de molino de bolas

Inicialmente, cuando la velocidad de rotación de los molinos aumenta, la acción de triturado aumenta y también lo hace el rendimiento del molino. Pero cuando la velocidad es mayor que un cierto valor, la carga junto con los medios de molienda tiende a adherirse a la pared interna cuando no se produce ni cataratas ni cascadas y la carga se centrifuga. En tal caso, la acción de rectificadado se reduce considerablemente o se detiene por completo y la potencia requerida para hacer girar el molino disminuye drásticamente. La velocidad a la que se puede extraer la potencia máxima en un molino es, por lo tanto, crítica y la velocidad a la que la centrifugadora de carga se conoce como la Velocidad crítica. Todos los molinos deben girarse a velocidades inferiores a la velocidad crítica para que tenga lugar la molienda.

Las cinco condiciones más importantes que afectan la potencia del molino son:

1. Diámetro del molino.
2. Longitud del molino.
3. Porcentaje de carga.
4. Velocidad del molino.
5. Tipo de molino.

### 2.4.3. Trituradora tipo cono

Las trituradoras giratorias normalmente se conocen como trituradoras primarias, ya que están diseñadas para recibir rocas corridas en la mina (ROM) directamente de las minas. Las trituradoras giratorias reducen el tamaño en un máximo de aproximadamente una décima parte de su tamaño. Por lo general, las operaciones metalúrgicas requieren una mayor reducción de tamaño; Por lo

## Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos

tanto, los productos de las trituradoras primarias se transportan a trituradoras secundarias o de cono donde se produce una mayor reducción de tamaño. Aquí, la relación de reducción máxima es de aproximadamente 8:1. En algunos casos, se requiere la instalación de una trituradora terciaria donde la reducción máxima es de aproximadamente 10:1. Las trituradoras secundarias también están diseñadas según el principio de trituración giratoria, pero los detalles de construcción varían.

El mecanismo de reducción de tamaño de las trituradoras de cono se debe principalmente a la acción de compresión de dos piezas de acero contra la roca. A medida que la distancia entre las dos placas disminuye la reducción de tamaño continua tiene lugar. [19]

Tabla 6. Características de diseño de trituradoras de cono [19]

Características de diseño	Circuito abierto		Circuito cerrado	
	Max	Min	Max	Min
<b>Tamaño (mm)</b>	3050	600	3050	600
<b>Rango de tamaño de la cámara (mm)</b>	76 - 432	25 - 76	76 - 178	25 - 51
<b>Configuración de descarga</b>	22 - 38,1	6,4 - 15,8	6,4 - 19	25 - 71
<b>Potencia (kW)</b>	300 - 500	25 - 30	300 - 500	25 - 30

Como los mecanismos de trituración en estas trituradoras son similares a las trituradoras giratorias primarias, sus diseños son similares, pero en este caso el eje se apoya en la parte inferior del cono giratorio en lugar de suspenderse como en las trituradoras giratorias más grandes, como se muestra en las figuras 6 y 7.

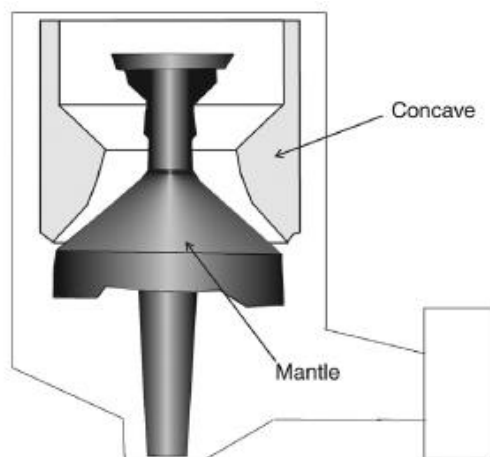


Figura 6. Diagrama de trituradora de cono [19]

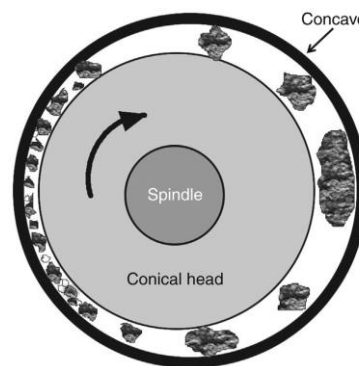


Figura 7. Vista superior de la operación de trituradora de cono

La cabeza encargada de realizar la trituración gira dentro de un cono truncado invertido. Estas trituradoras están diseñadas de modo que la relación de ancho de cabeza - profundidad es mayor que la trituradora giratoria estándar, los ángulos de cono son mucho más planos y la pendiente del manto y los cóncavos son paralelos entre sí. Los ángulos de cono con menor inclinación ayudan a retener las partículas por más tiempo entre las superficies de trituración y, por lo tanto, producen

## Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos

partículas mucho más finas. Para evitar daños a las superficies de aplastamiento, la carcasa de las trituradoras se mantiene en su lugar mediante fuertes resortes o sistemas hidráulicos.

Tabla 7. Ejemplos de trituradora de cono

Trituradora	Tipo	Abertura de alimentación (mm)	Lmin (mm)	Capacidad (ton/h)
<b>HP800 Estándar</b>	Fino	267	25	495 - 730
	Medio	297	32	545 - 800
	Grueso	353	32	545 - 800
<b>HP800 Cabeza corta</b>	Fino	33	5	-
	Medio	92	10	260 - 335
	Grueso	155	10	325 - 425
<b>MP1000 Estándar 2392mm</b>	Fino	300	25	915 - 1210
	Medio	390	32	-
	Grueso	414	38	1375 - 1750

### 2.4.4. Zaranda vibratoria

A menudo, debido a las diferencias relativas en la dureza, la friabilidad y el aplastamiento entre el mineral y las rocas huésped, los minerales pueden ser "liberados" por diferentes procesos de trituración. Las partículas producidas, que tienen diferentes tamaños y formas, pueden separarse por cribado sobre zarandas que permiten que las partículas que son menores que la abertura de la pantalla puedan pasar mientras retienen las otras. Dichas separaciones de los constituyentes minerales pueden ser un método eficiente y económico para concentrar un mineral y rechazar los demás productos de la trituración [20].

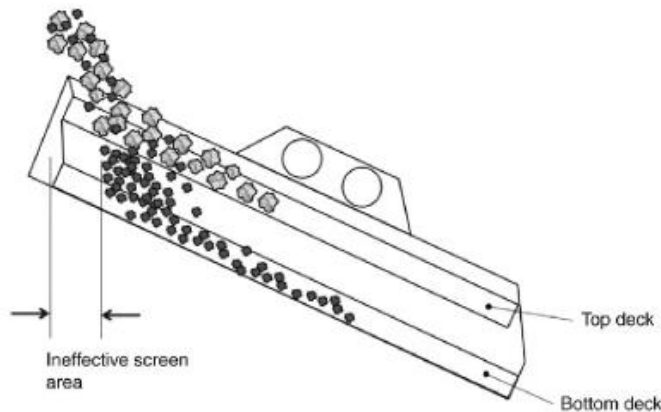


Figura 8. Diagrama de operación de una zaranda vibratoria [14]

## **Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos**

---

La máquina de cribado es ampliamente utilizada en la industria, pero en el diseño y la selección de los parámetros de movimiento, todavía se utiliza en su mayoría el diseño de analogía tradicional y datos empíricos. Si la optimización mecánica se aplica al diseño de la pantalla vibratoria, los resultados del diseño pueden ser económicos y razonables, para obtener una alta tasa de producción con poco consumo de energía [21].

### **2.4.5. Banda transportadora**

Las bandas transportadoras generalmente se aplican como el medio más eficiente y económico para transportar materiales a granel en diversos procesos tecnológicos. Sin embargo, también consumen grandes cantidades de energía. La mayor parte del desperdicio de energía es causado por la velocidad de la banda, lo que puede resultar en pérdidas económicas significativas. Un sistema de cinta transportadora es un sistema de energía típico que convierte la energía eléctrica en energía mecánica. La programación de velocidad óptima de un sistema de cinta transportadora formulado como un tipo de problema de optimización tiene una alta eficiencia de operación.

Dado que pueden ocurrir vibraciones perjudiciales en la construcción de la banda y del transportador a cierta velocidad de la banda, el proceso de optimización debe cumplir los requisitos de confiabilidad y la alta disponibilidad del sistema. Un modelo de cálculo de energía de un sistema de cinta transportadora es la cuestión clave para hacer frente a este problema de optimización. Cuantificar la demanda de energía dentro de los sistemas de cinta transportadora es, en general, un proceso complejo. Más específicamente, hay varios factores que influyen en el consumo de energía de un sistema de cinta transportadora como variables de operación, construcción del sistema, tasa de carga de la banda y su característica dinámica, utilización del conductor y su rendimiento, etc [22].

### **2.4.6. Iluminación**

El trabajo realizado en la industria cubre una gama de actividades mucho más variada que el de las oficinas y escuelas. Las tareas visuales pueden ser extremadamente pequeñas o muy grandes, oscuras o claras, y abarca formas planas o contorneadas.

Desde el punto de vista de percepción visual, tales tareas se clasifican según su grado de finura. Entre menos crítica sea una tarea menor serán las exigencias de nivel y calidad del alumbrado. A la inversa, cuanto más fino sea el trabajo, mayor debe ser el nivel de iluminancia y la ausencia de deslumbramiento [9].

El sistema de alumbrado industrial está determinado principalmente por la naturaleza del trabajo a realizar, la forma del espacio que se ilumina y el tipo de estructura del techo.

La mayoría de las aplicaciones industriales utilizan luminarias destinadas a proporcionar una distribución de luz de forma directa o semidirecta.

## Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos

En lugares de trabajo se debe asegurar el cumplimiento de los niveles de iluminancia de la Tabla 440.1 del Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado RETILAP de Colombia, adaptados de la norma ISO 8995 “Principles of visual ergonomics -- The lighting of indoor work systems”.

Tabla 8. Niveles de iluminancia requeridos según el tipo de actividad

Tipo de Actividad	Niveles de iluminancia (luxes)		
	Mínimos	Medios	Máximos
<b>Industria mecánica</b>			
Trabajo ocasional	150	200	300

La potencia requerida de un sistema de iluminación depende de distintos factores para cumplir con los requisitos de iluminancia en el espacio de trabajo:

1. La tecnología utilizada por la fuente de iluminación.
2. La luminaria controla el flujo luminoso emitido por la fuente y, en su caso, evita o minimiza el deslumbramiento.
3. Los sistemas de control y regulación de la luminaria.

### 2.4.7. Tecnologías de lavado

El lavado es el método más simple de enriquecimiento utilizado para mejorar el valor de las fracciones de roca y minerales desde el tamaño de la arena y hacia arriba. La eliminación de impurezas de la superficie como arcilla, polvo, compuestos orgánicos o sales es a menudo una necesidad para un producto que cumpla con las condiciones de calidad del mercado de agregados [11].

La arena y la grava a menudo se pueden lavar durante el proceso de selección, pero si el material transporta material no deseado, el lavado debe preceder al proceso de selección. Cuando la piedra de la planta trituradora se recubre con arcilla u otras sustancias pegajosas, se pone a través de un lavador para limpiar la grava antes de que llegue a la zaranda [5]. Así mismo, la liberación de material particulado en el proceso de trituración y transporte del material debe ser controlado para evitar pérdidas considerables de producción y contaminación por emisiones atmosféricas[23].

Por estas razones, en la industria de agregado pétreos se suelen usar bombas de agua para torres de limpieza y clasificación, y para sistemas de riego sobre las bandas transportadoras y a la entrada de los procesos de trituración para evitar emisiones de material particulado al ambiente.

Para cumplir con las condiciones mínimas de las licencias ambientales de la región en la que se desarrolle una industria, esta debe garantizar un porcentaje de humedad respecto al volumen de producción y transporte de los diferentes procesos de la planta.

#### Zarandas húmedas

## **Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos**

---

El riego con agua se puede utilizar para lavar materiales en una zaranda sin importar el tamaño del orificio en el medio de detección. Si el tamaño del orificio es de 20 mm o menos, la pulverización de agua aumenta la capacidad (inversamente proporcional al tamaño del orificio)[11].

Requerimientos de agua (típicos) m<sup>3</sup>/h.ton con un mínimo de 2 bar:

- Arena y grava 1.0
- Agregados – rocas pesadas 0.5
- Minería - mineral crudo 0.5
- Reciclaje (concreto) 0.2

### **2.5. SOBRE EL MODELO MATEMÁTICO**

La modelación matemática es el uso de las matemáticas para describir fenómenos del mundo real, con el fin de inquirir aspectos importantes, explicar fenómenos relacionados, probar ideas, o hacer predicciones. En consecuencia, permite a las disciplinas como ingeniería, física, fisiología, ecología, etc. tener un mejor conocimiento de su objeto de estudio. En vez de realizar prácticas en el mundo real, un experto puede llevar a cabo comprobaciones con representaciones matemáticas; se parte de datos para la formulación del modelo, el cual se analiza para establecer conclusiones matemáticas, las cuales se interpretan mediante predicciones que se prueban con datos reales. Con la recolección de datos se busca la información relevante y fundamental para entender el problema. Se identifican variables, constantes y relaciones entre ellas, como insumos para la formulación del modelo.

Para la formulación se debe comenzar con modelos simples, para ir agregando los datos que se consideren necesarios. Se inicia con la identificación de las variables, las constantes y las relaciones importantes que se descubran entre ellas. Esto permite conectarlas mediante operadores matemáticos para establecer ecuaciones, desigualdades, funciones, matrices o series de números, e ir agregando elementos de tal forma que se logre describir matemáticamente el objeto a modelar[24].

#### **2.5.1. Variables aleatorias del modelo**

##### **2.5.1.1. Método de Monte Carlo**

El método de Monte Carlo es un proceso estadístico numérico, es decir, una secuencia de estados cuya evolución viene determinada por sucesos aleatorios usado para determinar expresiones matemáticas complejas. Un suceso aleatorio es un conjunto de resultados que se producen con cierta probabilidad [25].

En la práctica este análisis consiste en ejecutar varias veces diferentes sucesos variando aleatoriamente su valor en función de la expresión estadística que los define, dando como resultado un conjunto de valores finales que siguen las tendencias previamente establecidas de cada variable. Este conjunto de valores permite simular para cada ocasión una distribución aleatoria estadística

## **Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos**

---

para el modelo energético. Esta simulación de Monte Carlo proporciona al tomador de decisiones un rango de posibles resultados y las probabilidades de que ocurran para cualquier elección de acción.

La simulación de Monte Carlo realiza una construcción de modelos de resultados posibles mediante la sustitución de un rango de valores (una distribución de probabilidad) por cualquier factor que tenga incertidumbre inherente. Luego calcula los resultados una n cantidad de veces, utilizando cada vez un conjunto diferente de valores aleatorios de las funciones de probabilidad. Dependiendo de la cantidad de incertidumbres y los rangos especificados para ellos, una simulación de Monte Carlo podría involucrar miles o decenas de miles de recálculos antes de que se complete. La simulación de Monte Carlo produce distribuciones de posibles valores de resultado.

Durante una simulación de Monte Carlo, los valores se muestrean de forma aleatoria a partir de las distribuciones de probabilidad de entrada. Cada conjunto de muestras se denomina iteración, y se registra el resultado resultante de esa muestra. La simulación de Monte Carlo hace esto cientos o miles de veces, y el resultado es una distribución de probabilidad de posibles resultados. De esta manera, la simulación de Monte Carlo proporciona una visión mucho más completa de lo que puede suceder. Le dice no solo lo que podría suceder, sino también la probabilidad de que suceda. [26].

### **2.5.1.2. Distribución del tamaño del material de alimentación**

En el caso de una planta de agregados pétreos es sumamente difícil calcular el tamaño de cada una de las partículas que conforman el material de entrada a la planta de trituración, pero es necesario definir una tendencia de distribución de tamaños de entrada al ser una de las variables principales para conocer la distribución de masas del material en cada una de las etapas.

En la mayoría de las aplicaciones de procesamiento de minerales, todo lo que se requiere es un tamaño aproximado de partículas. El tamizado a través de tamices estándar de aberturas conocidas y la determinación del tamaño del tamiz sobre el cual se retienen todas las partículas puede proporcionar convenientemente el tamaño limitante de un grupo de tamices sucesivos cuanto más cerca esté la estimación del tamaño real.

En lugar de mediciones individuales de tamaños de partículas, el tamaño medio de una partícula que pasa a través de los tamices y se retiene en ellos proporciona una buena aproximación del tamaño de partículas dentro de los rangos de tamices [27].

## **2.6. SOBRE GRAVICON**

Gravicon S.A. es una empresa colombiana dedicada a la producción y comercialización de agregados pétreos ubicada en el municipio de Acacias, estado del Meta. Participa en el suministro de materia prima en la producción de concreto, obras de ingeniería vial e infraestructura en el país.

Los frentes de explotación de la materia prima para la empresa están ubicados sobre el río Guayuriba, en el Meta. La empresa se encuentra ubicada en el borde permitido de construcción junto al río Guayuriba para disminuir los procesos y costos de transporte del material.

## Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos

Los productos finales de la empresa deben cumplir con la Norma Técnica Colombiana “NTC” y normativa INVIAS para el uso de materiales en infraestructura y el Instituto de Desarrollo Urbano IDU de granulometría, equivalentes de arena, masas unitarias, índices de forma, caras fracturadas entre otros.



Figura 9. Vista general de la planta Gravicon

Gravicon cuenta con más de 40 años de operación en sus instalaciones, en las que ha ido evolucionando sus procesos de producción y actualmente algunas de las características de su operación son:

- Las instalaciones de Gravicon en el río Guayuriba cuenta con tres plantas de trituración con las siguientes características:

Tabla 9. Plantas de trituración de Gravicon S.A.S.

Planta	Cañaveral	Guayuriba	Planta Móvil
<b>Función</b>	Producción principal	Producción especial de clientes	Producción de respaldo
<b>Producción diaria media (ton/día)</b>	2400 ton	1700 ton	475 ton
<b>Horas de operación mensual media (h/mes)</b>	180 h	78 h	25 h

- Gravicon ha desarrollado un plan de monitoreo y auditorías energéticas con Vértebra Soluciones para analizar los procesos productivos y consumos de energía de la planta Cañaveral.
- La planta de trituración Cañaveral consiste en una planta trituradora de tres etapas de ciclo abierto, es decir, la planta produce agregados pétreos (gravas) de tres tamaños diferentes y actualmente consume el 73% de la energía eléctrica del total consumido por Gravicon [28].
- Los principales equipos que conforman la planta de trituración Cañaveral son:



## Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos

Tabla 10. Equipos de operación en la planta Cañaveral - Gravicon

	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3
<b>Trituradora</b>	Tipo mandíbula Marca: Lippman	Tipo Cono Marca: Simmon	Tipo Cono Marca: Metso HP4
<b>Banda entrada trituración</b>	-	Longitud: 42m Ancho: 1.50m Inclinación: 15°	Longitud: 95m Ancho: 1.50m Inclinación: 10°
<b>Banda salida trituración</b>	Longitud: 65m Ancho: 1.50m Inclinación: 25°	Longitud: 70m Ancho: 1.50m Inclinación: 22°	Longitud: 75m Ancho: 1.25m Inclinación: 10°
<b>Zaranda Vibratoria</b>	Tipo: LDS – Accionamiento lineal Frecuencia: 900 vib/min	Tipo: LDS – Accionamiento lineal Frecuencia: 900 vib/min	Tipo: LDS – Accionamiento lineal Frecuencia: 1000 vib/min
<b>Banda salida de material</b>	Longitud: 115m Ancho: 1.50m Inclinación: 8°	Longitud: 95m Ancho: 1.25m Inclinación: 10°	Longitud: 120m Ancho: 1.25m Inclinación: 5°
<b>Bomba de riego</b>	Capacidad nominal: 2100 LPM Altura de bombeo: 36m Material de suministro: Agua almacenada en pozos naturales (1000 kg/m <sup>3</sup> )		
<b>Bomba de filtro zaranda 3</b>	Capacidad nominal: 800 LPM Altura de bombeo: 9m Material de suministro: Lodo residual (3160 kg/m <sup>3</sup> según mediciones de Gravicon)		

En los anexos 2 y 5 del presente trabajo, se podrán encontrar los registros fotográficos de la planta y algunas fichas técnicas de los principales equipos nombrados en esta sección.

### 2.7. RESUMEN DEL CAPÍTULO

Con el objetivo de conocer todas las condiciones operativas que existen detrás de la producción de áridos en este sector industrial, se ha realizado una aproximación a todas las características físicas y operativas del proceso de trituración de piedra, las etapas implicadas en este proceso y los equipos empleados para tal fin.

Una vez se ha contado con las principales máquinas eléctricas implicadas en este proceso, se ha realizado una aproximación al análisis hecho en previos estudios sobre las características operativas de estas y sus requisitos energéticos para dicha operación.

## **Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos**

---

De esta manera han surgido conceptos importantes dentro de la energía consumida en los procesos de trituración como el índice de trabajo (Work Index) de los materiales y las escalas o multietapas de trituración.

Finalmente hemos hecho un acercamiento inicial a las características físicas y operativas generales de la planta de trituración Gravicon, la cual será durante los siguientes capítulos, la base para el desarrollo y validación del modelo.

## **CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA**

### **3.1. INTRODUCCIÓN AL CAPÍTULO**

Con el fin de obtener un modelo matemático capaz de simular la operación completa de una planta de agregados pétreos, el presente capítulo consta de una serie de etapas de estudio y análisis del comportamiento de estas plantas, en búsqueda de las diferentes variables que influyen en su operación y de modelos fiables que simulen el comportamiento en conjunto de cada uno de los equipos, cada una de las etapas de estudio permitirán ir creando un único modelo que tome en consideración todas las variables necesarias, individuales y generales de los equipos que hacen parte del proceso, en una herramienta de simulación matemática.

Una vez se obtenga un modelo completo de la planta simulado en un software matemático, se realizará en primer lugar, una comparación con una planta real de la empresa Gravicon S.A. en Colombia, con los datos aportados por la empresa Vertebra Soluciones que cuenta con los históricos de consumo y producción totales de dicha planta.

Con el modelo retroalimentado con los valores de una planta real, se ha de mostrar diferentes simulaciones que den como resultado escenarios simulados en el software que demuestren posibilidades de ahorro energético en los procesos de producción de la planta.

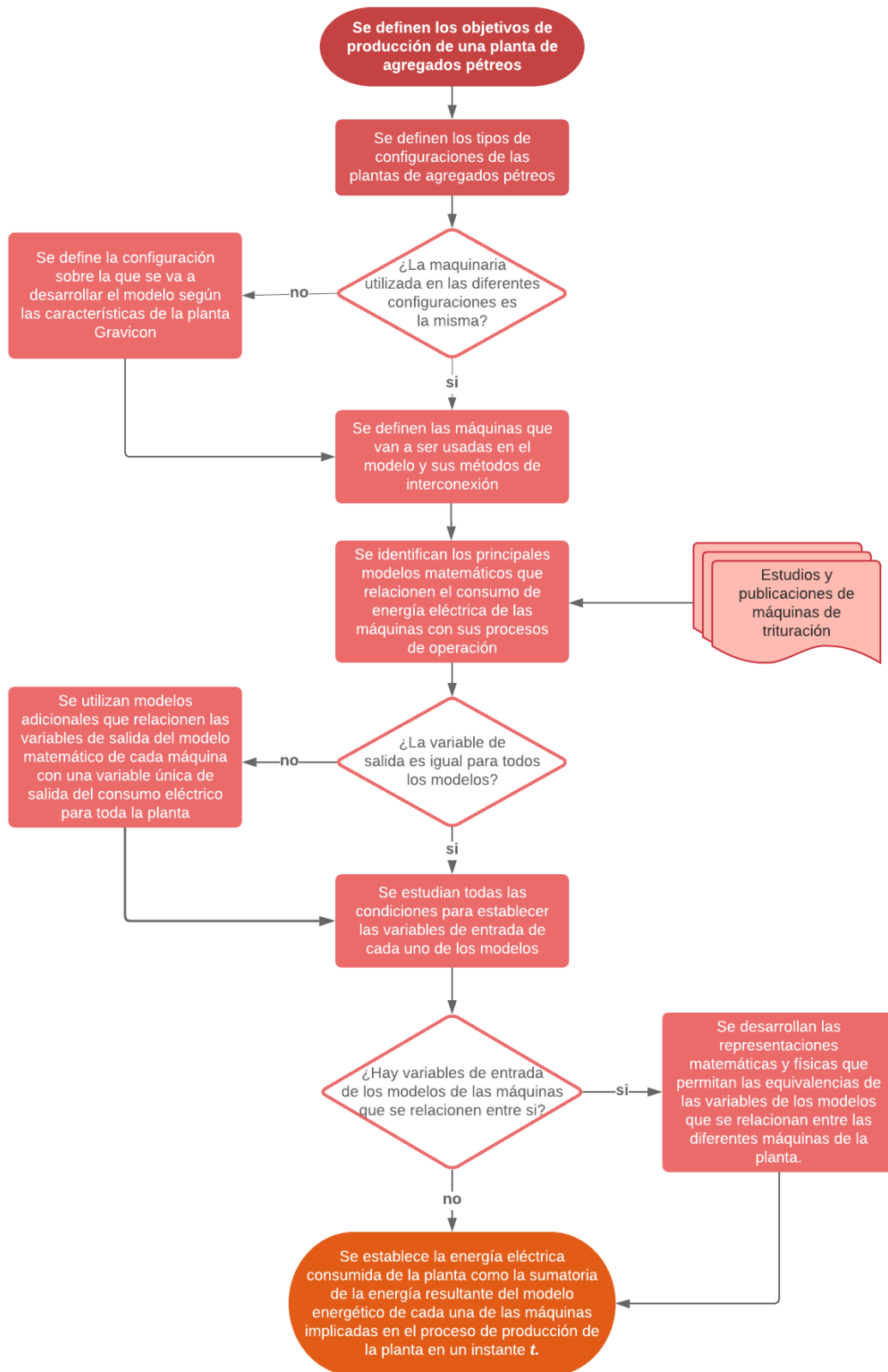
### **3.2. DIAGRAMA DE FLUJO DE LA METODOLOGÍA DE ESTUDIO**

A continuación, se expone los pasos que se van a seguir, desde el análisis de la operación de una planta de agregados pétreos y las máquinas eléctricas que componen este proceso, hasta la integración del modelo energético completo de una planta de trituración en un software matemático de simulación.

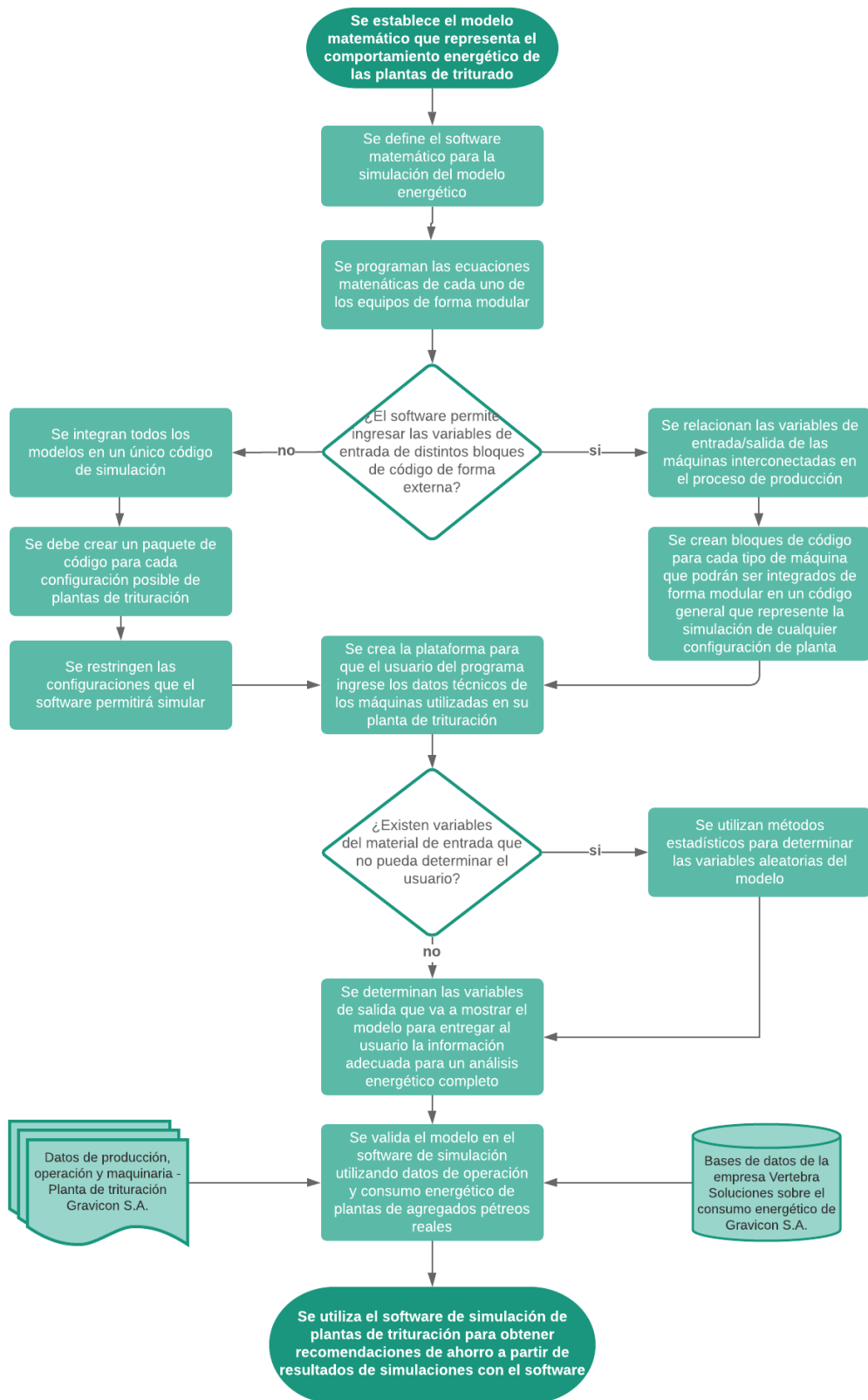
Para esto, las actividades se desarrollarán en dos etapas: las primeras actividades se enfocan en el levantamiento y análisis de los diferentes modelos que se hayan desarrollado en estudios previos para cada una de las máquinas de trituración, transporte y selección de material pétreo, para integrarlas en un único modelo que considere las variables de operación individual de cada equipo y posteriormente, su operación en conjunto para interconexión de variables.

La segunda etapa, utilizará el modelo resultante del estudio energético matemático para ser simulado en un software matemático que permita al usuario incluir todas las características mecánicas, eléctricas y ambientales que caractericen la operación de su planta de trituración, con el fin de obtener como resultado las características de consumo energético de la planta a partir de una producción esperada y un horario predeterminado de operación.

# Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos



# Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos



# Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos

---

## 3.3. DESARROLLO DEL MODELO MATEMÁTICO

Con el fin de obtener un modelo matemático para el consumo de energía de una planta de agregados pétreos, el presente proyecto debe contar con diferentes etapas de estudio y análisis matemático y físico de los equipos que operan en el proceso de trituración y distribución del material pétreo, para entender su operación individual y la conexión que existe entre sus variables.

Esta sección permitirá comprender el comportamiento individual de cada una de las máquinas que operan en estas plantas y como su operación y consumo de energía se integran al consumo energético eléctrico total de dicha fábrica.

### 3.3.1. Análisis de la operación de una planta de agregados pétreos

Las máquinas trituradoras estudiadas en el presente trabajo no superan, en sus diseños comerciales, relaciones de trituración superiores de 15:1, en la mayoría de los casos, esta relación no es suficiente para producir agregados pétreos (arena, grava, base granular, etc.) con el tamaño requerido para uso comercial o industrial.

Por esta razón, como se observa en la figura 3 del presente documento, las plantas de agregados pétreos suelen contar con más de una etapa de trituración para alcanzar los estándares exigidos del material producido por las plantas, como en el caso de la planta de Gravicon, descrita en el capítulo 2.5.

De esta manera, cada una de las etapas va a contar con máquinas encargadas del proceso de trituración, clasificación y distribución que van a estar relacionadas entre ellas, así como la operación de las etapas se van a relacionar entre ellas, convirtiéndose al final en un único proceso de operación continua con una producción final y un consumo de energía global.

El material que pasa a través de la planta para obtener los agregados pétreos será distribuido y clasificado según su tamaño para utilizarse en diferentes procesos, esta clasificación será la tarea principal de las zarandas vibratorias, que permitirán transportar el material según su tamaño a la etapa de trituración adecuada para obtener un producto final que cumpla con la normativa colombiana de calidad de producto INVIAS E-123.

Para cada una de las zarandas vibratorias que se encuentran en una planta de trituración se va a cumplir que:

$$Q_{ent\ zv}(t) = Q_{p\ zv}(t) + Q_{np\ zv}(t) \quad (1)$$

La ecuación anterior se traduce en que la tasa de material que pasa por cada una de las máquinas no es igual para todas y que esta tasa tiene variaciones en cada instante  $t$  según las proporciones de tamaño del material a lo largo del tiempo.

Así mismo, la distribución del material va a depender si la fábrica cuenta con circuitos cerrados de alimentación (obtiene un único producto final) o si cuenta con circuitos abiertos (cada etapa de trituración obtiene un producto distinto).

Los procesos del material en cada configuración de circuito se describen a continuación.

## Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos

### 3.3.1.1. Plantas de trituración de circuito cerrado

La configuración de esta planta, como se muestra en la figura 10, obtiene un único producto final. Para esto, todo el material que entra a la planta pasa por las diferentes etapas de trituración, las veces que sean necesarias, hasta obtener el producto esperado del tamaño requerido.

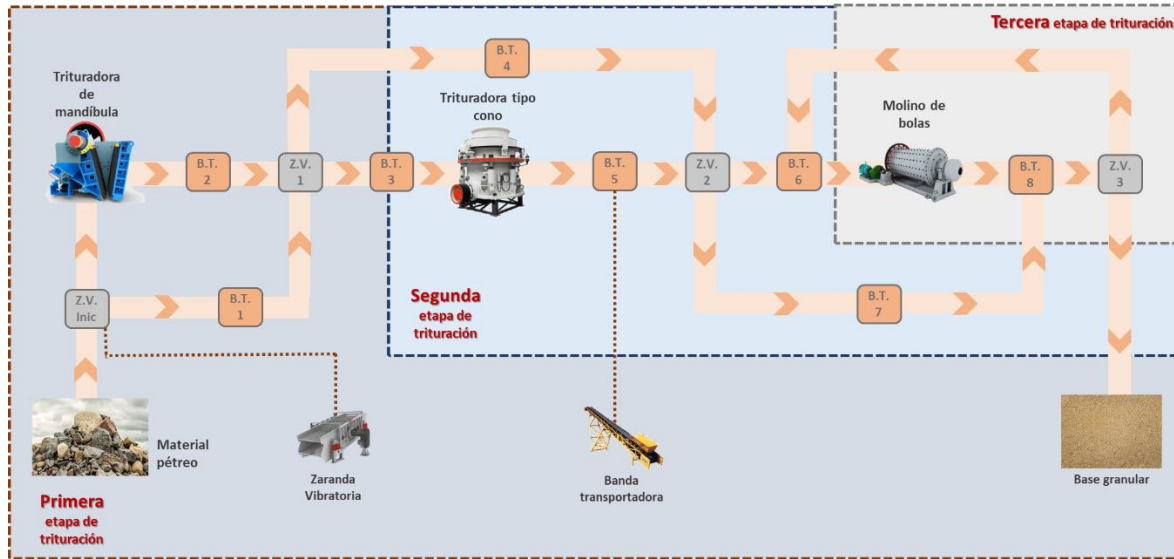


Figura 10. Diagrama de operación de una planta de trituración con circuito cerrado.

En esta configuración, la tasa de suministro de material a la planta va a ser igual a la tasa de producción del material pétreo obtenido para venta.

$$Q_{entrada\ planta}(t) = Q_{producto\ 1}(t) \quad (2)$$

Así mismo, la tasa de distribución del material pétreo para cada una de las máquinas en la planta de esta configuración se observa en la tabla 11.

Tabla 11. Distribución del material por zarandas en circuito cerrado.

Nombre de la zaranda vibratoria	Material de entrada $Q_{ent\ zv}$	Material que pasa por el tamiz $Q_{p\ zv}$	Material que no pasa por el tamiz $Q_{np\ zv}$
<b>Zaranda de entrada Zaranda 1</b>	$Q_{entrada\ planta}$	$Q_{ent\ zv2}$	$Q_{tm}$
<b>Zaranda segunda etapa Zaranda 2</b>	$Q_{p\ zv1} + Q_{tm}$	$Q_{ent\ zv3}$	$Q_{tc}$
<b>Zaranda tercera etapa Zaranda 3</b>	$Q_{p\ zv2} + Q_{tc}$	$Q_{ent\ zv4}$	$Q_{mb}$
<b>Zaranda de salida Zaranda 4</b>	$Q_{p\ zv4} + Q_{mb}$	$Q_{producto\ 1}$	$Q_{mb}$

# Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos

## 3.3.1.2. Plantas de trituración de circuito abierto

La configuración de esta planta, como se muestra en la figura 11, obtiene un producto por cada etapa de trituración de la planta. Para esto, todo el material que entra a la planta pasa por las diferentes etapas de trituración, las veces que sean necesarias, hasta obtener el producto esperado del tamaño requerido.

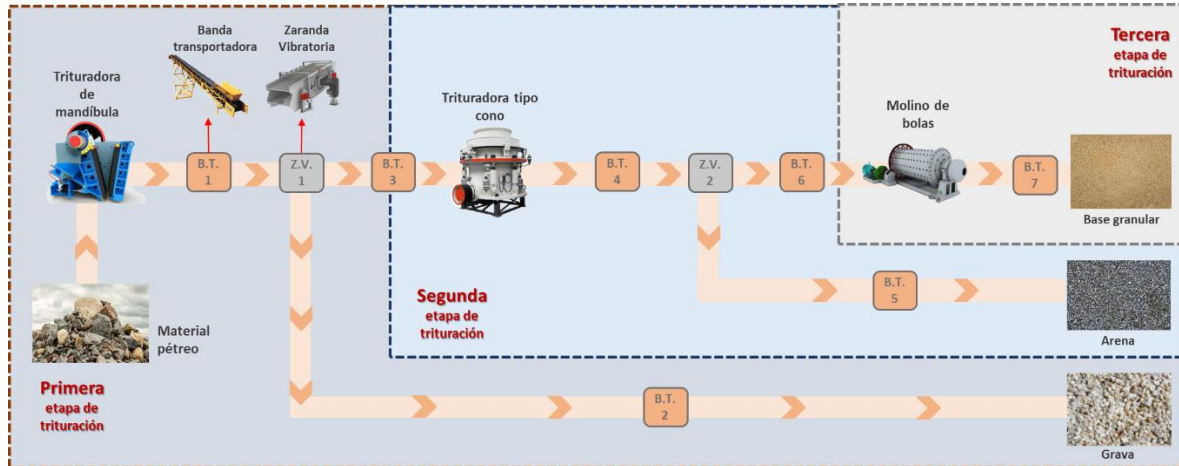


Figura 11. Diagrama de operación de una planta de trituración con circuito abierto.

En esta configuración, la tasa de suministro de material a la planta va a ser igual a la tasa de producción del material pétreo obtenido de cada una de las etapas que para venta según el material obtenido.

$$Q_{entrada\ planta}(t) = Q_{producto\ 1}(t) + Q_{producto\ 2}(t) + Q_{producto\ 3}(t) \quad (2)$$

Así mismo, la tasa de distribución del material pétreo para cada una de las máquinas en la planta de esta configuración se observa en la tabla 12.

Tabla 12. Distribución del material por zarandas en circuito abierto.

Nombre de la zaranda vibratoria	Material de entrada $Q_{ent\ zv}$	Material que pasa por el tamiz $Q_{p\ zv}$	Material que no pasa por el tamiz $Q_{np\ zv}$
Zaranda primera etapa <b>Zaranda 1</b>	$Q_{tm}$	$Q_{producto\ 1}$	$Q_{tc}$
Zaranda segunda etapa <b>Zaranda 2</b>	$Q_{tc}$	$Q_{producto\ 2}$	$Q_{mb}$

## 3.3.2. Modelos matemáticos para las máquinas eléctricas de operación en una planta de agregados pétreos

Con base en el estudio realizado de cada uno de los elementos que componen una planta de agregados pétreos en el capítulo 2 y el análisis de la operación nominal de una planta de agregados pétreos, teniendo en cuenta su relación de producción vs. consumo, estudiados en la sección 3.1,



## Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos

se encuentran en distintos estudios los modelos que describen la potencia requerida de cada máquina para realizar las tareas de producción, transporte y selección adecuados en una planta de trituración, como se muestra en la tabla 13:

Tabla 13. Modelos matemáticos de las máquinas eléctricas principales

Equipo	Modelo Matemático	Observaciones
<b>Trituradora de mandíbula</b>	$P_{mtm}(t) = W_i \cdot Q_{tm} \cdot 10 \cdot \left[ \frac{1}{\sqrt{P_{80tm}}} - \frac{1}{\sqrt{F_{80tm}}} \right]$	(2) [17] Método <i>Rose and English</i>
<b>Molino de bolas</b>	$P_{mmb}(t) = \frac{M_{mb} \cdot H_{cog} \cdot \sin \alpha_{mb} \cdot 2\pi \cdot \omega}{13.488}$	(3) [29] Método de Metso
<b>Trituradora de cono</b>	$P_{mtc}(t) = W_i \cdot Q_{tc} \cdot \left[ \frac{\sqrt{F_{80tc}} - \sqrt{P_{80tc}}}{\sqrt{F_{80tc}}} \right] \cdot \sqrt{\frac{100}{P_{80tc}}}$	(4) [19] Método <i>Rose and English</i>
<b>Banda transportadora</b>	$P_{mbt}(t) = \frac{F_u \cdot v_{bt}}{\mu_1 \cdot \mu_2 \cdot 1000}$	(5) [30] Proporcionalidad con la fuerza motriz y velocidad de la banda
<b>Zaranda vibratoria</b>	$P_{mvz}(t) = \frac{1}{\mu} \cdot (P_{1zv}(t) + P_{2zv}(t))$	(6)
	$P_1(t) = \frac{C_{zv} \cdot M_{zv} \cdot A_{zv}^2 \cdot n_{zv}^3}{1.740.480}$	(7) [21] Sumatoria de potencias de vibración y fricción
	$P_2(t) = \frac{f_m \cdot M_{zv} \cdot A_{zv} \cdot n_{zv}^3 \cdot d_{zv}}{1.740.480}$	(8)

Para cada uno de los equipos nombrados en la tabla anterior, existen diferentes modelos que describían el comportamiento potencia vs. consumo; se han escogido los modelos que han resultado de estudios específicos para trituración de agregados pétreos, debido a la variación que podían existir en otros modelos respecto a las relaciones de trituración esperadas para otros minerales, sus densidades y tamaños para otras aplicaciones.

Por otra parte, cada uno de los modelos presentaba variaciones respecto al tipo de salida del modelo. Con cada máquina se realizó un acercamiento para obtener la misma unidad de salida, con el fin de poder realizar una sumatoria de los consumos de todos los equipos en conjunto. De esta manera, todos los modelos en la tabla 13 entregan como variable de salida, la potencia mecánica en tiempo real de las máquinas.

## Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos

### 3.3.2.1. Diagrama de pérdidas de potencia en motores eléctricos inductivos

Para poder realizar un análisis de la energía eléctrica consumida de los equipos, con el fin de poder obtener resultados acordes a los objetivos planteados del trabajo, las potencias mecánicas de cada equipo deben contar con diferentes factores físicos en la conversión de la potencia mecánica requerida para la operación de cada máquina, hasta el consumo final eléctrico para su operación.

Se puede describir a un motor de inducción básicamente como un transformador rotatorio. Su entrada es un sistema trifásico de voltajes y corrientes. En un transformador ordinario, la salida es la potencia eléctrica de los devanados secundarios. Los devanados secundarios de un motor de inducción (el rotor) están en cortocircuito, por lo que no hay salida de electricidad en estos motores, en cambio, la salida es mecánica [31]. La relación entre la potencia eléctrica de entrada y la potencia mecánica de salida del motor se muestra en el diagrama de flujo de potencia de la figura 12.

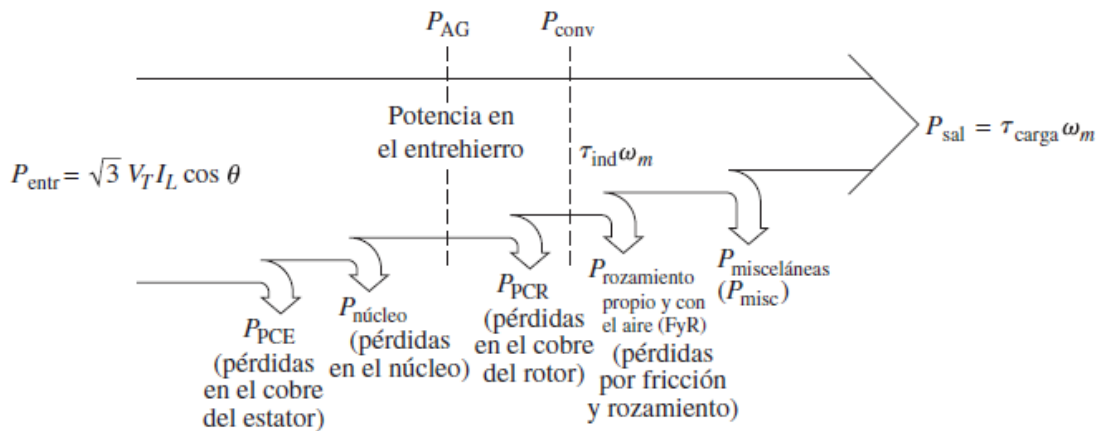


Figura 12. Diagrama de flujo de potencia de un motor eléctrico de inducción [31].

La potencia de entrada de un motor de inducción  $P_{entr}$  en la figura 12, que a lo largo del presente trabajo se le denominará la potencia eléctrica de alimentación de la máquina eléctrica,  $P_{ex}$ , se presenta en forma de voltajes y corrientes eléctricas trifásicas. Las primeras pérdidas que se encuentran en la maquina son las pérdidas en los devanados del estator (las pérdidas en el cobre del estator  $P_{PCE}$ ). Luego se pierde cierta cantidad de potencia por la histéresis y las corrientes parasitas del estator ( $P_{nucl}$ ). La potencia restante en este punto se transfiere al rotor de la maquina a través del entrehierro entre el estator y el rotor. Esta potencia se llama potencia en el entrehierro  $P_{EH}$  de la máquina. Una vez que se transfiere la potencia al rotor, una parte de ella se elimina en las pérdidas en el cobre del rotor  $P_{PCR}$  y el resto se convierte de su forma eléctrica a mecánica ( $P_{conv}$ ).

Por último, se restan las perdidas por fricción y rozamiento con el aire  $P_{FyR}$  y las perdidas misceláneas  $P_{misc}$ . La potencia restante es la salida del motor  $P_{sal}$ .

Puesto que un motor de inducción de manera usual opera a una velocidad muy cercana a la velocidad síncrona, el movimiento relativo de los campos magnéticos sobre la superficie del rotor es muy lento y las pérdidas en el núcleo del rotor son muy pequeñas en comparación con las pérdidas en el núcleo del estator. Así mismo, la mayor parte de estas pérdidas en el núcleo se presentan en el circuito del estator, por lo que todas las pérdidas en el núcleo se agrupan en ese

## Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos

---

punto en el diagrama. Estas pérdidas se representan en el circuito equivalente del motor de inducción por medio del resistor. Si las pérdidas en el núcleo se describen simplemente con un valor de potencia, en lugar de un elemento de circuito, a menudo se agrupan con las pérdidas mecánicas y se restan en el punto del diagrama donde se ubican las pérdidas mecánicas.

Mientras mayor sea la velocidad del motor de inducción, mayores serán las pérdidas por fricción, por rozamiento con el aire y misceláneas. Por otro lado, mientras mayor sea la velocidad del motor (hasta  $n_{sinc}$ ), menores serán las pérdidas en el núcleo.

Finalmente, las pérdidas del diagrama de flujo se pueden agrupar en dos factores, como se muestra en la ecuación 9:

$$P_{ex}(t) = \frac{P_{mx}(t)}{\mu_{ex} \cdot \mu_{Tx}} \quad (9)$$

Donde,

$P_{ex}$  = Potencia eléctrica de la máquina x (kW).

$P_{mx}$  = Potencia mecánica de la máquina x (kW).

$\mu_{ex}$  = Factor de pérdidas eléctricas en el rotor y estator de la máquina x [31].

$\mu_{Tx}$  = Factor de pérdidas mecánicas y misceláneas en el devanado de la máquina x [31].

Mientras mayor sea la velocidad del motor de inducción, mayores serán las pérdidas por fricción, por rozamiento con el aire y misceláneas. Por otro lado, mientras mayor sea la velocidad del motor (hasta  $n_{sinc}$ ), menores serán las pérdidas en el núcleo.

Finalmente, el modelo energético de la planta en su totalidad debe sumar la potencia consumida por cada una de las máquinas eléctricas en el tiempo  $t$  para evaluar el comportamiento en conjunto de todos los equipos. La ecuación 9 muestra la sumatoria de la potencia eléctrica demandada para el proceso de trituración:

$$P_T(t) = \sum_{x=1}^{n_{em}} P_{ex}(t) \quad (10)$$

### 3.3.2.2. Factor de pérdidas eléctricas en el rotor y estator

Las pérdidas electromagnéticas de un motor de inducción van a estar ligadas a las condiciones físicas de fabricación de estas máquinas, comúnmente asociados a los materiales y condiciones de fabricación del equipo.

Las resistencias equivalentes del rotor y el estator de una máquina eléctrica, como se describe en la sección anterior, van a representar un valor de pérdidas que depende directamente de la corriente eléctrica que está circulando por sus devanados.

De esta forma, las pérdidas eléctricas de un motor van a depender del punto de operación en el que se encuentre la máquina eléctrica. A partir de las pruebas de fabricación que se realizan en los

## Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos

motores eléctricos, los fabricantes deben proveer las curvas de eficiencia energética de una máquina eléctrica respecto al punto de operación en el que se encuentre la máquina como se muestra en la figura 13:

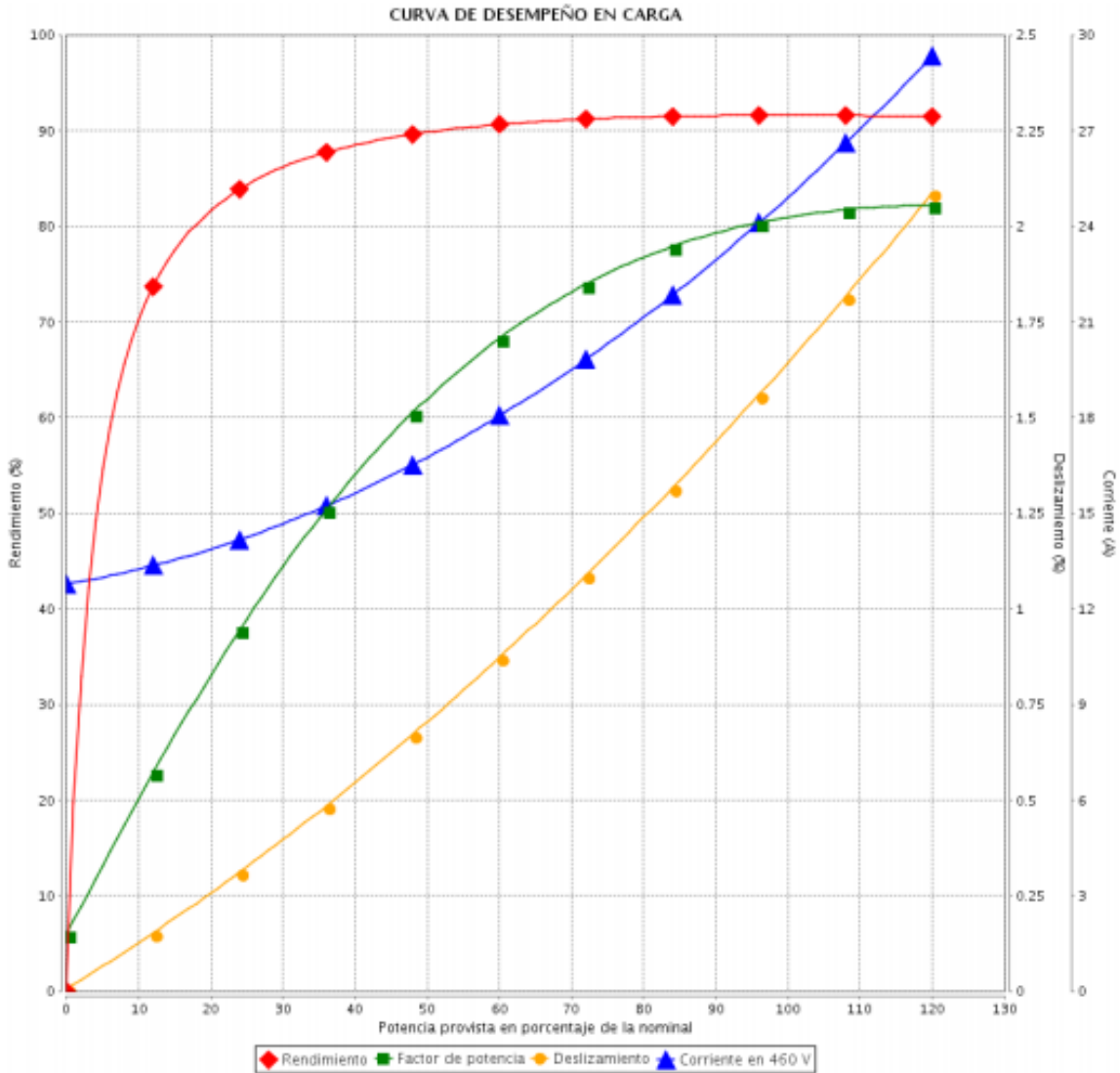


Figura 13. Curva de desempeño de carga de un motor WEG W22 IE2 Trifásico de 15kW [32].

En el anexo 4 de la presente memoria se encuentran una serie de fichas técnicas de motores eléctricos que WEG ha entregado a Vertebra Soluciones para el manejo de información energética en diferentes proyectos. En la mayoría de los casos el proveedor de cualquier máquina eléctrica debe poner a disposición de la empresa de agregado pétreos las curvas de desempeño de los motores adquiridos.

En caso de que no se cuenten con estas curvas, el usuario del modelo podrá contar con las curvas que Vertebra Soluciones pone a disposición del presente trabajo para simular las condiciones óptimas de operación de la planta.

## **Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos**

---

### **3.3.2.3. Factor de pérdidas misceláneas por condiciones ambientales**

Para analizar la viabilidad del uso de un motor en una determinada aplicación, se deben tomar en consideración algunos parámetros:

- Altitud en que el motor será instalado
- Temperatura del medio refrigerante

Conforme a las características operativas de los motores en el IEC 60034-1, las condiciones usuales de servicio de motores inductivos son:

- Altitud no superior a 1.000 m por encima del nivel del mar.
- Medio refrigerante (en la mayoría de los casos, el aire ambiente) con temperatura no superior a 40 °C y exenta de elementos perjudiciales.

Hasta estos valores de altitud y temperatura ambiente, se consideran condiciones normales donde el motor debe proveer, sin sobrecalentamiento, su potencia nominal.

#### **Pérdidas por altitud**

Motores funcionando en altitudes por encima de 1000 m presentan problemas de calentamiento causado por la rarefacción del aire y, consecuentemente, disminución de su poder de refrigeración. El intercambio insuficiente de calor entre el motor y el aire circundante lleva a la exigencia de reducción de pérdidas, lo que significa también la reducción de la potencia [33].

Los motores tienen calentamiento directamente proporcional a las pérdidas y éstas varían, aproximadamente, en una razón cuadrática con la potencia.

#### **Pérdidas por temperatura ambiente**

En motores que trabajan a temperaturas ambientes constantemente superiores a 40°C, el devanado puede alcanzar temperaturas perjudiciales para el aislamiento. Este hecho debe ser compensado por un proyecto especial del motor, usando materiales aislantes especiales o por sobredimensionamiento del motor.

La tabla 14 muestra el resultado del estudio hecho para motores eléctricos de inducción para conocer el factor de multiplicación de la potencia útil realizado por la empresa WEG, que en este estudio sería equivalente al factor de pérdidas mecánicas y misceláneas en el devanado de las máquinas eléctricas  $\mu_{Tx}$ :

## Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos

Tabla 14. Factor de multiplicación de la potencia útil en función de la temperatura ambiente e °C y de la altura en metros [33].

Temp/H	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000
10	1,16	1,13	1,11	1,08	1,04	1,01	0,97
15	1,13	1,11	1,08	1,06	1,02	0,98	0,94
20	1,11	1,08	1,06	1,03	1,00	0,95	0,91
25	1,08	1,06	1,03	1,00	0,95	0,93	0,89
30	1,06	1,03	1,00	0,96	0,92	0,90	0,86
35	1,03	1,00	0,95	0,93	0,90	0,88	0,84
40	1,00	0,97	0,94	0,90	0,86	0,82	0,80
45	0,95	0,92	0,90	0,88	0,85	0,82	0,78
50	0,92	0,90	0,87	0,85	0,82	0,80	0,77
55	0,88	0,85	0,83	0,81	0,78	0,76	0,73
60	0,83	0,82	0,80	0,77	0,75	0,73	0,70

### 3.3.3. Análisis de las variables del modelo energético

Los modelos matemáticos de las máquinas del proceso de trituración seleccionados en la tabla 13 de la presente memoria, describen a la potencia mecánica de las máquinas en un instante  $t$  en proporción a diferentes variables físicas, mecánicas y ambientales. Algunas de estas variables de los diferentes modelos estarán relacionadas de manera directa con la producción de la planta u otras que estén relacionadas con las características de fabricación y operación directa de los equipos.

En esta sección, se describirán las variables que determinan el consumo energético de cada uno de los equipos analizados hasta el momento, para dimensionar o restringir sus valores y comprender su relación con la potencia eléctrica consumida.

#### 3.3.3.1. Variables de la trituradora de mandíbula y la trituradora tipo cono

El método *Rose and English* de la ecuación (1) y (4), relaciona de manera precisa dos factores considerados fundamentales para conocer la potencia requerida para una máquina trituradora tipo mandíbula y una tipo cono en el proceso de reducción:

- a. El índice de trabajo de Bond, descrito en el capítulo 2.2., en el que se relaciona la energía requerida para el quiebre de diferentes tipos de materiales producidos normalmente en los procesos de trituración, dependiendo de su densidad y dureza.
- b. La relación de reducción esperada de la máquina va a ser proporcional al esfuerzo requerido de la trituradora.

En las nomenclaturas del capítulo 1.6. se encuentran los términos  $F_{80}$ , para el tamaño por el que pasa el 80% del mineral de alimentación y  $P_{80}$  para el tamaño por el que pasa el 80% del mineral producto. La relación de estos dos términos es el resultado de la configuración física de la máquina, en que las compuertas de entrada y salida varían con el fin de obtener el producto esperado.

La configuración física que adopten estas máquinas exigirá diferentes niveles de consumo energético, como se muestra en las ecuaciones a continuación:

## Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos

$$F_{80\ tm} = 6,3 \times 10^5 \cdot G_{tm} \quad (11)$$

$$P_{80\ tm} = 7 \times 10^5 \cdot (L_{\min\ tm} + L_{Ttm}) \quad (12)$$

Así mismo, las aperturas de salida máxima y mínima dependen de la configuración geométrica del diseño de la máquina, las aperturas de salida de producto van a depender directamente de la relación de reducción de tamaño para el que se diseña la máquina, como muestra en las siguientes ecuaciones y en la figura 14.

$$L_{\min\ tm} = \frac{G_{tm}}{R_{\max}} \quad (13)$$

$$L_{\max\ tm} = \frac{G_{tm}}{R_{\min}} \quad (14)$$

$$L_{Ttm} = L_{\max\ tm} - L_{\min\ tm} \quad (15)$$

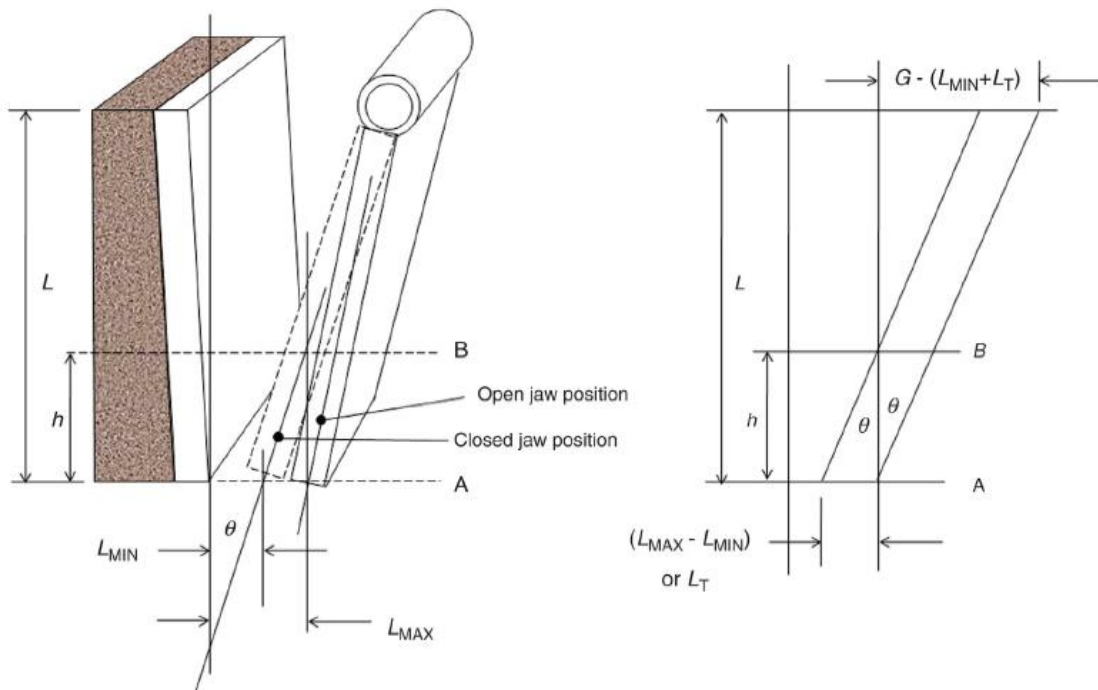


Figura 14. Geometría de operación de trituradora tipo mandíbula.

La tabla 5 ofrece valores estandarizados de la abertura, relación de reducción y potencia nominal de una trituradora de mandíbula comercial. Así mismo, el modelo puede tener variaciones en su cálculo, según la configuración interna de trituración (Placa sencilla, Blake, Dodge, etc.) que deben evaluarse como una máquina de una o dos etapas en el cálculo de consumo.

Por otra parte, el modelo energético sobre el cual se determina la potencia requerida para un cono giratorio tipo cono varía únicamente en la distribución del material, y por ende en las propiedades

## Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos

que determinan el tamaño de alimentación y producción del material en la trituradora de cono, como se muestra en la figura 13.

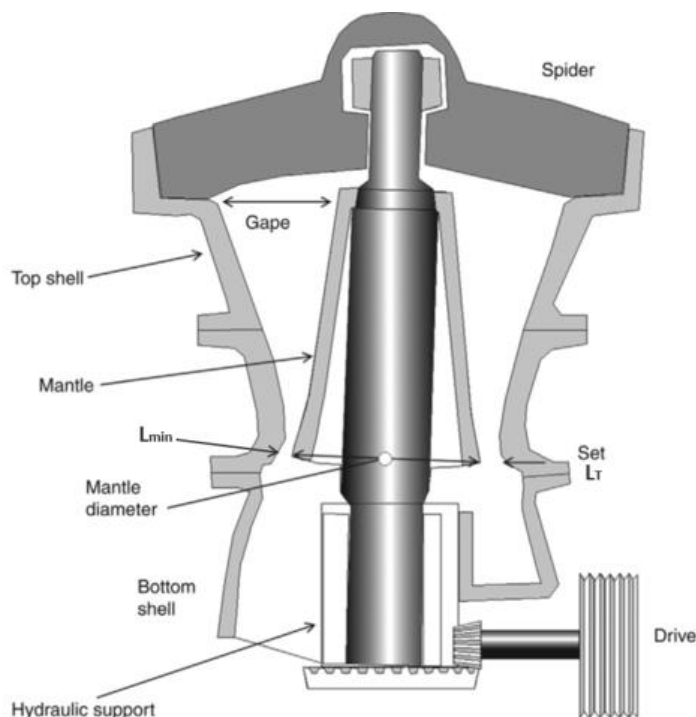


Figura 15. Geometría de operación de trituradora de cono

### 3.3.3.2. Variables del molino de bolas

La operación de un molino consiste, como se estudió en el capítulo 2.3.2. en mantener una velocidad de giro constante, el cual, con las bolas de acero internas, se encargarán de triturar el material primo para la producción de agregados pétreos.

La ecuación (2) basada en el método de Metso, demuestra que los factores que determinan la potencia requerida para el proceso de trituración de un molino son:

1. La velocidad de giro del molino: a mayor velocidad, el equipo debe mantener el mismo torque, el motor eléctrico que permite este giro requiere mayor potencia.
2. La capacidad de llenado: entre mayor sea el material que se encuentre dentro del molino en el proceso de triturado, mayor será el esfuerzo para el motor eléctrico y mayor será el tiempo que dure el proceso de reducción esperado del molino.
3. La densidad del material y los elementos de triturado: cada molino puede contar con diferentes elementos que se encarguen del proceso de quiebre y reducción de tamaño, siendo el más común las bolas de acero. Entre mayor sea la densidad del material y los equipos de triturado, mayor será el esfuerzo de la máquina. Así mismo, el índice de trabajo de Bond ( $W_i$ ) determina el tiempo necesario para alcanzar el tamaño esperado del agregado pétreo.



## Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos

El material de alimentación de un molino de bolas suele ser de diámetros inferiores a 5 cm, como muestra la tabla 15, por esta razón los molinos de bolas se utilizan en la segunda o tercera etapa de trituración de una planta de agregados pétreos, y por esta misma razón, el índice de trabajo de Bond tiene menor relevancia en el consumo energético de este equipo, a diferencia de la trituradora de mandíbula, del capítulo anterior.

Tabla 15. Características de fabricación molinos de bolas [34]

Parámetro	Características de fabricación
Relación Longitud/Diámetro	0,5 – 3,5
Tamaño del agregado en alimentación	~1,9 cm
Relación de reducción	20:1 a 200:1

Según los puntos anteriores, el tamaño del molino y la capacidad esperada de producción de esta máquina, serán factores relacionados directamente al consumo energético del proceso de trituración. La tabla 15 resume las características físicas de diferentes modelos comerciales y, por otra parte, las figuras 16 - 18 explican las características geométricas de estos molinos:

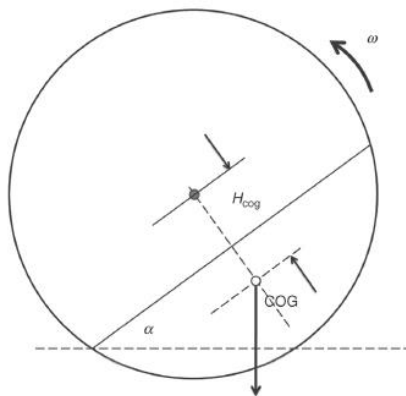


Figura 16. Distancia del centro de gravedad de la carga [18]

Para conocer la distancia del centro de gravedad de la carga del molino, se han realizado estudios [18] para encontrar la proporción directa entre el porcentaje de carga del molino con su distancia del centro de gravedad, como muestra la figura 17:

## Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos

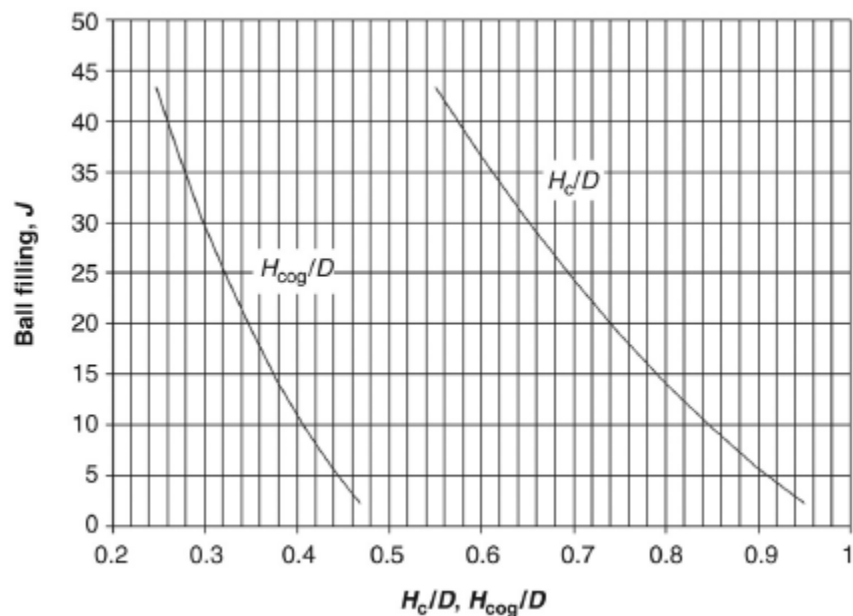


Figura 17. Relación del porcentaje de carga del molino de bolas  $J$  con el centro de gravedad de la carga  $H_{cog}$  [18]

De esta figura, vamos a asignar un valor de relación  $H_{cog}/D$  con base en el porcentaje de llenado del molino. Este porcentaje va a ser proporcional a la cantidad de material que estará entrando constantemente en el molino

Por otra parte, la velocidad de giro del molino va a determinar la intensidad de las fuerzas que se aplican sobre las cargas por el impacto que recibe el material entre las bolas de acero contra la pared del molino y la caída del material – a mayor velocidad, el ángulo de reposo de la carga aumenta y la fuerza del impacto de caída aumenta, como muestra la figura 18:

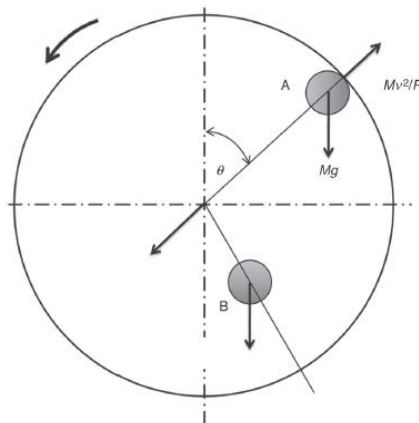


Figura 18. Equilibrio de fuerzas sobre una bola debido a la velocidad de giro del molino [18]

## Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos

En el proceso de giro del molino, se consideran dos posiciones de las cargas que se encuentran en el proceso:

Por una parte, el material que se encuentra ubicado en B se ubica en el centro de gravedad de la carga COG, en la que interactúan diferentes fuerzas de cada uno de los elementos que están en interacción con este material. La posición B corresponde a la posición COG de la figura 16.

El material o partícula que se encuentren en la posición A se considera como el punto crítico de fuerzas, en las que la partícula se sostiene en el punto de equilibrio contra la pared del tubo, de esta manera se presenta un equilibrio de fuerzas entre la fuerza centrífuga y la fuerza de gravedad, como se muestra en la figura 18:

$$M_{mb} \cdot g \cdot \cos\theta_{mb} = \frac{M_{mb} \cdot v_{mb}^2}{R_{mb} - r_{mb}} \quad (16)$$

De la anterior ecuación podemos obtener:

$$\cos\theta_{mb} = \frac{(2\pi \cdot (R_{mb} - r_{mb}) \cdot \omega)^2}{(R_{mb} - r_{mb}) \cdot g \cdot 60^2} \quad (17)$$

Donde  $\omega$  es la velocidad de giro del molino que salen en la ecuación (2) correspondiente a la potencia mecánica de un molino de bolas.

En  $\theta = 0$ ,  $\cos\theta = 1$ , la fuerza de gravedad que tiende a sacar la bola de la pared será máxima y la velocidad requerida para superar esta fuerza se conoce como velocidad crítica. Denotando la velocidad crítica como  $\omega_c$ . Sustituyendo estos valores en las ecuaciones anteriores, la velocidad crítica estará dada por:

$$\omega_{crit} = \frac{42.3}{\sqrt{(D_{mb} - d_{mb})}} \quad (18)$$

Finalmente, de la ecuación (2) del método de Metso, el ángulo de reposo de la carga  $\alpha$  está relacionado directamente con el consumo energético de la máquina. Así mismo, como se muestra en las figuras 16 y 18, los ángulos  $\alpha_{mb}$  y  $\theta_{mb}$  son complementarios:

$$\alpha_{mb} = \frac{\pi}{2} - \theta_{mb} \quad (19)$$

De esta manera, la velocidad de giro va a determinar, según las ecuaciones (21) y (23) el ángulo de reposo de la carga:

$$\alpha_{mb} = \frac{\pi}{2} - \cos^{-1} \frac{(2\pi \cdot \omega)^2 \cdot (R_{mb} - r_{mb})}{g \cdot 60^2} \quad (20)$$

Para el análisis final del molino, debemos tener en cuenta que la velocidad de giro máxima de la planta va a ser la velocidad crítica  $\omega_c$  calculada en la ecuación (17). La velocidad de un molino de bolas puede venir determinado como porcentaje de la velocidad crítica o como su valor nominal.

### 3.3.3.3. Variables de la banda transportadora

La variable directa para conocer cuál es la energía requerida por una banda transportadora es la fuerza motriz a las que se enfrenta la máquina. Entre mayores sean las fuerzas a las que se enfrenta una banda, mayor será la potencia requerida, por esto, se deben estudiar todas las fuerzas que

## Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos

pueden actuar sobre el desplazamiento del material por la banda [30]. Estas fuerzas se pueden clasificar, como lo muestra la siguiente ecuación:

$$F_u = F_H + F_N + F_u \quad (21)$$

Las resistencias de fricción y deslizamiento sumadas a lo largo de la banda transportadora son la principal carga para la máquina, las fuerzas se deben estudiar según las secciones que tenga cada banda; una sección con un ángulo de inclinación diferente va a enfrentar mayores esfuerzos para transportar la misma carga. La separación entre resistencias primarias y secundarias se efectúan en la normativa DIN 22101 [35] para bandas transportadoras.

Finalmente, las variables que determinan las resistencias mecánicas de la banda se pueden clasificar en:

- Variables fijas: Material de la banda, ancho y grosor, ángulo de inclinación.
- Variables dinámicas: Cantidad de material transportado, velocidad de la banda.

El estudio de fuerzas realizado en el DIN 22101 entrega como resumen la ecuación (22) para determinar la fuerza motriz total de la banda transportadora:

$$F_u = C_{bt} \cdot f_{bt} \cdot L_{bt} \cdot g \cdot [q_{rc} + q_{ru} + (2q_B + q_g) \cdot \cos\delta_{bt}] + q_G \cdot H_{bt} \cdot g \quad (22)$$

Para conocer las variables que determinan las fuerzas motrices de las bandas transportadoras, se deben estudiar los valores sobre los que trabajan las bandas transportadoras comercialmente utilizadas en la industria y la normativa existente, como se muestran en las tablas 16, 17 y 18 a continuación:

Tabla 16. Parámetros físicos comerciales de bandas transportadoras [36][37].

Característica	Valores comerciales	
	Mínimo	Máximo
Fuerza de tensión (kN/m)	160	5000
Grosor de la banda (mm)	11	25
Ancho de la banda (mm)	600	2200
Peso unitario de la banda (kg/m <sup>2</sup> )	3,40	4,10
Diámetro del rodillo superior (mm)	400	2100
Diámetro del rodillo inferior (mm)	350	1700

A partir del diámetro de los rodillos se pueden determinar las masas unitarias de las partes rodantes  $q_{rc}$  y  $q_{ru}$  requeridas para el cálculo de las fuerzas en conjunto con el peso unitario de la banda y el ancho de la banda.

Por otra parte, los coeficientes  $f_{BT}$  y  $C$  son estimadas a partir del estudio desarrollado en el DIN 22101 en relación a las condiciones de la banda transportadora como se muestra en las tablas 17 y 18:

## Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos

Tabla 17. Valores estandarizados para el coeficiente de fricción  $f$  [35].

Criterio	Clasificación		
	Mínimo	Medio	Máximo
Velocidad de la banda (m/s)	0 a 4	4 a 6	Más de 6
Ángulo de inclinación (°)	0 a 25	25 a 35	Más de 35
Temperatura ambiente (°C)	Más de 25	15 a 25	Menos de 15
Coeficiente de fricción $f_{BT}$	0,010	0,020	0,040

Tabla 18. Valores estandarizados para el coeficiente de longitud  $C$  [35].

Longitud (m)	Coeficiente $C$	Longitud (m)	Coeficiente $C$
80	1,92	600	1,17
100	1,78	700	1,14
150	1,58	800	1,12
200	1,45	900	1,10
300	1,31	1000	1,09
400	1,25	1500	1,06
500	1,20	>2000	1,05

### 3.3.3.4. Variables de la zaranda vibratoria

La potencia consumida por una zaranda vibratoria va a ser definida por dos factores principales, como se muestra en las ecuaciones (6) y (7). Estos factores se agrupan en el consumo de potencia por vibración  $P_1$  y el consumo de potencia por fricción  $P_2$ .

En estas ecuaciones y al igual que en las bandas transportadoras, las variables que definen el consumo energético de una banda transportadora se pueden agrupar en:

- Variables fijas: Amplitud y frecuencia de la vibración, coeficientes de amortiguamiento y fricción, diámetro del rodamiento.
- Variables dinámicas: Masa de vibración.

A diferencia de otras máquinas del proceso de trituración, en la zaranda vibratoria juega un papel muy importante el diseño seleccionado de la máquina para cumplir con la función de selección.

Comercialmente, existen múltiples clases de zarandas para el proceso de filtrado de materiales granulados[38], entre los cuales se destacan dos modelos especializados en agregados pétreos, como se muestra en la tabla 19.

## Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos

Tabla 19. Modelos de zarandas vibratorias para agregados pétreos [38].

Modelo	Amplitud (mm)	Frecuencia de vibraciones (rpm)	Abertura de la pantalla (mm)
Unidad linear LDS	9-10	880-980	5 – 50
Tipo resorte RSH	6-7	1100	10

La masa de vibración del agregado pétreo clasificado va a ser proporcional por un lado al área y la inclinación de la zaranda vibratoria y por otro, a la tasa de alimentación de la banda transportadora que alimenta la zaranda.

Para conocer la cantidad de material pétreo que se encuentra dentro de la zaranda vibratoria en cualquier instante de tiempo  $t$ , debemos conocer el ritmo de alimentación  $Q$  de la planta para el agregado esperado, y el tiempo que demora un material particulado entre el punto de alimentación a la zaranda y el momento que sale de ella como material no filtrado.

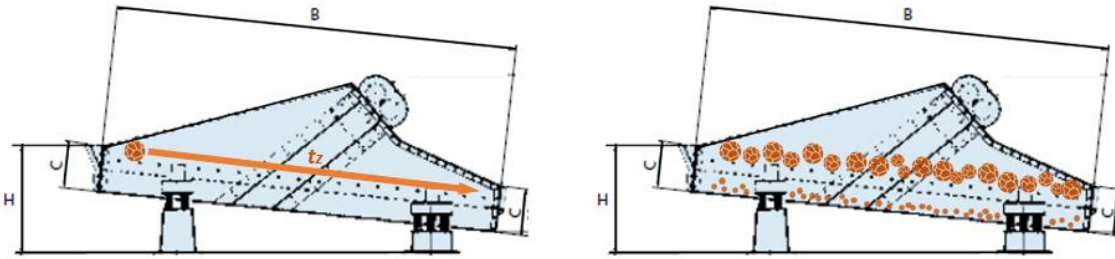


Figura 19. Movimiento del material particulado desde la alimentación hasta su salida en el tiempo  $t$ .

Como se muestra en la figura 19, la zaranda vibratoria en el instante  $t_z$  va a estar en su ocupación completa de material particulado para una tasa de alimentación  $Q_z$ , de esta manera, la masa de vibración  $M$  usada para el cálculo de la potencia de la zaranda vibratoria en las ecuaciones (6) y (7) puede ser calculada como:

$$M_{zv}(t) = Q_{ent\ zv}(t) \cdot t_z \quad (23)$$

Por su parte, el tiempo de recorrido del material va a depender de factores como la inclinación de diseño de la zaranda vibratoria, el factor de fricción de la bandeja de filtro y las dimensiones de la bandeja.

Mediante un proceso de estimación de fuerzas actuantes sobre el material particulado entrante a la zaranda en el periodo de  $t = 0$  hasta  $t = t_z$ , se puede estimar  $t_z$  como:

$$t_z = \sqrt{\frac{2 \cdot L_z}{a_p}} \quad (24)$$

Así mismo, la aceleración del material va a depender de factores físicos de la zaranda, como lo muestra la siguiente ecuación:

## Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos

---

$$a_p = \sqrt{a_{px}^2 + a_{py}^2} \quad (25)$$

$$a_{px} = g \cdot \cos\theta_z \cdot (\sin\theta_z - f_m \cdot \cos\theta_z) \quad (26)$$

$$a_{py} = g \cdot (1 - \cos^2\theta_z - f_m \cdot \cos\theta_z \cdot \sin\theta_z) \quad (27)$$

Las variables que definen el valor de  $t_z$  son fijas, respecto al diseño y operación de la zaranda, por lo que  $t_z$  será una constante en el proceso de cálculo y predicción de consumo energético. La masa de vibración será proporcional a la tasa de entrada del material  $Q_z$  en cualquier instante  $t$ , y por ende proporcional a la potencia eléctrica consumida.

### 3.3.4. Modelos matemáticos de servicios auxiliares en plantas de agregados pétreos

Los modelos matemáticos descritos en el capítulo anterior sirven adecuadamente para la configuración e implementación exitosa de procesos unitarios. La premisa básica en las aplicaciones de estos modelos ha sido que la operación se realizó en condiciones de estado estable. Sin embargo, en la práctica real, la condición de estado estable se altera fácilmente por cambios en las variables de operación cuando se ven afectados los modelos matemáticos.

Si se tomó una condición ideal de estado estacionario como la media de las variaciones y la desviación de la media determinada, y luego, con la instrumentación adecuada y equipos auxiliares que controlen el proceso de producción, es posible volver a la operación de estado estable [39].

#### B. Tecnologías de lavado

La arena y la grava a menudo se pueden lavar durante el proceso de selección, pero si el material transporta material no deseado, la lavadora debe preceder al proceso de selección. Cuando la piedra de la planta trituradora se recubre con arcilla u otras sustancias pegajosas, se pone a través de un lavador para limpiar la grava antes de que llegue a la zaranda [5]. Así mismo, la liberación de material particulado en el proceso de trituración y transporte del material debe ser controlado para evitar pérdidas considerables de producción y contaminación por emisiones atmosféricas[23].

Para estimar la potencia requerida en tiempo real por la bomba de agua, se necesitan en primer lugar, datos físicos y constantes en la operación de la bomba, tales como la diferencia de altura entre el punto de suministro y el punto de aplicación, densidad, etc. al tiempo que variables en tiempo real también modificarán el consumo energético, como muestra la ecuación a continuación:

$$P_{ba}(t) = \frac{Q_{ba} \cdot H_{ba} \cdot g \cdot \rho_{lav}}{\mu_{ba}} \quad (28)$$

## Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos

### C. Iluminación

El Método del Factor de utilización permite calcular el nivel medio de la iluminancia en una instalación de alumbrado general. Proporciona una iluminancia media con un error de  $\pm 5\%$  y nos da una idea muy aproximada de las necesidades de iluminación [40].

$$\Phi = \frac{E_M \cdot S}{C_u \cdot C_m} \quad (29)$$

La mayoría de las fuentes de luz emiten energía electromagnética distribuida en múltiples longitudes de onda. La energía eléctrica suministrada a una luminaria es usada para generar energía radiante. Esta energía radiante emitida por la lámpara por unidad de tiempo se llama potencia radiante o flujo radiante. Sólo una pequeña porción de esta potencia radiante se encuentra en la región visible: en la región entre 400 y 700 nm. El sentido de la vista depende tan sólo de la energía radiada visible o luminosa por unidad de tiempo. El flujo luminoso  $\Phi$  es la parte de la potencia radiante total emitida por una fuente de luz que es capaz de afectar el sentido de la vista.

De esta manera, el flujo luminoso requerido es proporcional a la potencia eléctrica que se suministra a un sistema de iluminación para cumplir con los niveles de iluminación requeridos para las actividades desarrolladas en la industria.

En [41] encontramos una relación de eficacia entre la potencia eléctrica y el flujo luminoso de distintas tecnologías de lámparas. Entre las cuales está la tecnología de Diodos Emisores de Luz (LED), la cuál será asumida para el desarrollo del modelo energético de la planta de agregados pétreos del presente proyecto:

Tabla 20. Eficacia lumínica de tecnologías de alumbrado[41]

Tecnología	Eficacia lumínica (lm/W)	
	Mínimo	Máximo
<b>Incandescente</b>	5	20
<b>Vapor de Mercurio</b>	20	50
<b>Fluorescente</b>	30	70
<b>Metal Halide</b>	45	95
<b>LED</b>	70	100
<b>Sodio (Alta presión)</b>	45	110

Teniendo en cuenta la eficacia lumínica de las tecnologías de iluminación más comunes en las instalaciones industriales, se puede evaluar cuál es el consumo eléctrico en el instante  $t$  según los requisitos y dimensiones de las plantas:

$$P_{lum}(t) = \frac{\Phi}{\mu_{lum}} \quad (30)$$



## Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos

### 3.3.5. Potencia y energía eléctrica de una planta de agregados pétreos obtenidas a partir de los modelos matemáticos

Con el objetivo de dimensionar el comportamiento energético de la planta de agregados pétreos, el modelo matemático debe entregar como resultados la potencia eléctrica consumida total por la planta a lo largo del tiempo y la energía total consumida por las instalaciones de la fábrica en el periodo de tiempo de interés del usuario del modelo.

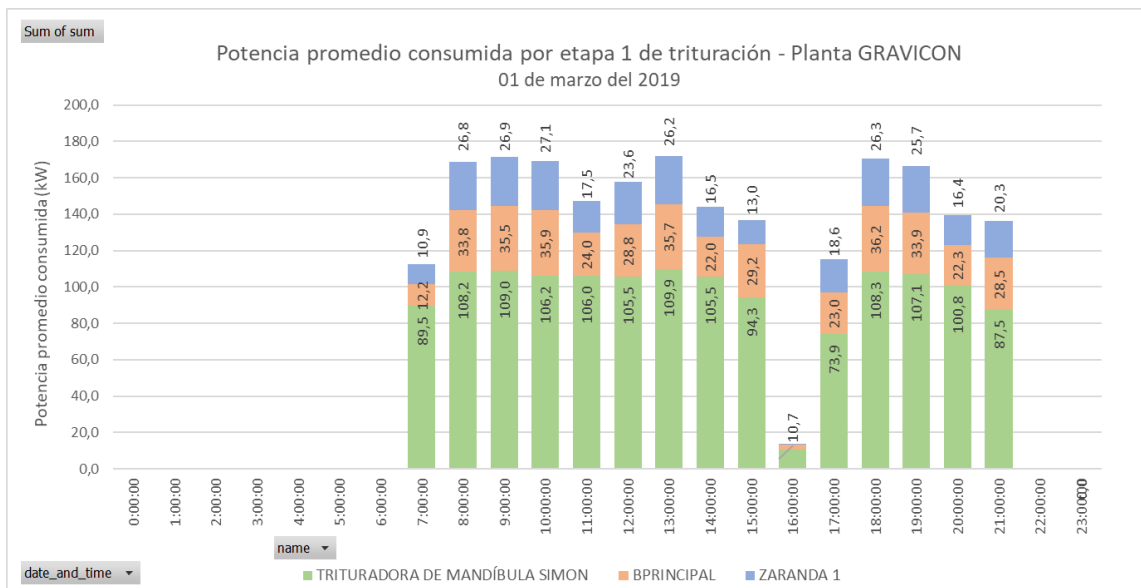
Para poder estimar el comportamiento completo de la planta, debemos agregar a la ecuación (10) del presente documento de la potencia demandada por las maquinarias del proceso de trituración, las potencias estimadas en las ecuaciones (28) y (30) de los servicios auxiliares en el instante  $t$  y potencias adicionales por equipos de uso ocasional en las instalaciones, como se refleja en la ecuación 31:

$$P_{PT}(t) = P_T(t) + P_{ba}(t) + \frac{P_{lum}(t)}{1000} + P_{Ad}(t) \quad (31)$$

Una vez se tienen en cuenta todos los equipos eléctricos de la operación de la planta y los distintos factores que pueden afectar su consumo eléctrico para cada instante  $t$ , se deben conocer cuáles son los consumos de energía de dicha planta, con el fin de relacionar la producción con el uso energético y obtener indicadores energéticos que permitan evaluar el comportamiento unitario de la planta con otros modelos de producción de la planta y obtener procesos óptimos de consumo energético unitario.

$$E_{PT} = \int_0^T P_{PT}(t) \cdot dt \quad (32)$$

La figura 19 muestra el consumo de energía eléctrica de una banda transportadora en la planta de trituración Gravicon durante el día 01 de marzo del 2019, según los datos aportados por la empresa Vertebrata Soluciones. Esta gráfica se representa con los valores de potencia eléctrica a lo largo del tiempo de medición  $T$  de 24 horas.



## **Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos**

---

*Figura 20. Consumo eléctrico de la primera etapa de la planta Gravicon, datos aportados por Vertebra Soluciones*

De la figura 20, podemos realizar un ejemplo del análisis descrito durante esta sección. La potencia eléctrica consumida por la primera etapa de trituración de la planta Gravicon, es la suma en cada instante  $t$  de la trituradora de mandíbula Simon, la denominada banda principal y la zaranda 1 de la planta; en este caso, la mayor potencia es consumida a las 13h del día 1 de marzo del 2019, con una potencia demandada de 172 kW. Por otro lado, la energía eléctrica consumida por la primera etapa de trituración es la suma de la potencia eléctrica en cada instante  $t$  a lo largo del día, en este caso, la energía acumulada de la primera etapa de trituración para el 1 de marzo del 2019 son 2130 kWh.

### **3.3.6. Definición del material pétreo de alimentación como variable aleatoria dentro del proceso de trituración**

En la sección 2.4.1. del presente documento enunciamos la variable del tamaño del material pétreo de entrada en la planta como una variable de entrada en nuestro modelo que definirá la potencia requerida de distintos equipos a lo largo de las etapas de trituración, según la cantidad de material que se distribuye desde las zarandas vibratorias o cualquier otro proceso de selección y distribución del material. Así mismo, el tamaño del material de entrada a cada máquina de triturado definirá el esfuerzo mecánico, y por ende la energía, requerida para realizar el proceso de trituración del material.

Definir el tamaño de cada una de las partículas pétreas que entran en la planta se convierte en una tarea inviable, por lo que se usará el método de Monte Carlo para simular las distribuciones de tamaño del material pétreo, según los estudios que haya realizado cada planta sobre su material (ej: tamaño máximo de las piedras) y estudios de distribución de material pétreo particulado en una cantera. Se han formulado varias relaciones empíricas para linealizar los datos para que la interpolación y la extrapolación de los datos sean más precisas. Uno de estos métodos es reescribir el análisis de pantalla calculando la cantidad acumulada retenida o pasando por un tamiz particular. Siguiendo estos lineamientos para la experimentación de distribución de partículas, algunos estudios han encontrado que el tamaño de una muestra de material pétreo cumple de manera casi uniforme una distribución log-normal, como se muestra en un ejemplo como el de la figura 21.

## Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos

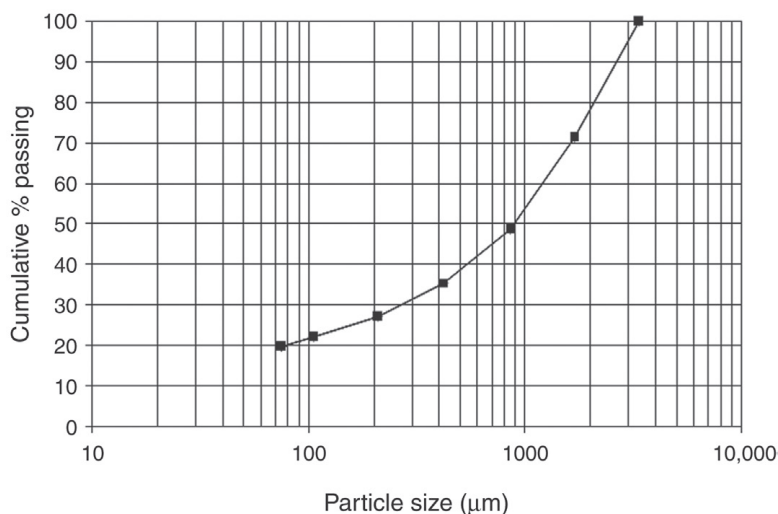


Figura 21. Gráfica log-normal del tamaño de las muestras vs el paso de material acumulado por tamices [27].

Siguiendo las tendencias de distribución log-normales del material pétreo estudiado, se puede obtener una tabla que resume el comportamiento de distribución de material solo con el tamaño máximo de las rocas en la muestra:

Tabla 21. Formato de distribución de material log-normal para material pétreo de canteras

Apertura (mm)	Masa (%)	Porcentaje de masa retenida acumulada	Porcentaje de masa filtrada acumulada
<b>D<sub>max</sub> = 9500</b>	0	0	100%
<b>4750</b>	20,9%	20,9%	79,1%
<b>2360</b>	21,1%	42,0%	58%
<b>1180</b>	20,9%	62,9%	37,1%
<b>590</b>	10,3%	73,2%	26,8%
<b>300</b>	15,7%	88,9%	11,1%
<b>150</b>	4,3%	93,2%	6,8%
<b>75</b>	2,3%	95,5%	4,5%
<b>-75</b>	4,5%	100%	0%

El usuario de nuestro modelo requiere únicamente suministrar la información del material de mayor tamaño  $D_{max}$  registrado estadísticamente en su cantera de alimentación de material a la planta de trituración. Con este dato, el modelo aplicará toda una cadena de simulaciones con el método de Monte Carlo para encontrar las veces que sea necesario una repartición aleatoria de material de entrada al proceso de trituración con una tendencia de distribución como el de la tabla 21.

### **3.4. DISEÑO DEL MODELO MATEMÁTICO EN SOFTWARE DE SIMULACIÓN**

#### **3.4.1. Software de simulación matemática: MatLab**

MatLab es un lenguaje de alto desempeño diseñado para realizar cálculos técnicos y matemáticos. Integra el cálculo, la visualización y la programación en un ambiente fácil de utilizar donde los problemas y las soluciones se expresan en una notación matemática.

- Este lenguaje de programación se utiliza ampliamente en:
- Cálculos numéricos.
- Desarrollo de algoritmos.
- Modelado, simulación y prueba de prototipos.
- Análisis de datos, exploración y visualización.
- Representación gráfica de datos con fines científicos o de ingeniería.
- Desarrollo de aplicaciones que requieran de una interfaz gráfica de usuario (GUI, Graphical User Interface).

Una de las principales ventajas de MatLab, tanto en aplicaciones académicas como industriales, es el uso de familias de comandos de áreas específicas llamadas scripts. Los scripts son grupos de comandos de MatLab (archivos .m) que extienden el ambiente del software para resolver problemas de áreas específicas de la ciencia e ingeniería, como en procesamiento de señales, sistemas de control o, como en este caso, para representación y simulación de modelos matemáticos.

##### **3.4.1.1. Simulink**

Simulink es un entorno de programación visual, que funciona sobre el entorno de programación Matlab. Es un entorno de programación de más alto nivel de abstracción que el lenguaje interpretado Matlab (archivos con extensión .m). Simulink genera códigos de interfaz visual llamados modelos, usados para simulación e implementación matemática (archivos .mdl).

Simulink viene a ser una herramienta de simulación de modelos o sistemas, con cierto grado de abstracción de los fenómenos físicos involucrados en los mismos. Se hace hincapié en el análisis de sucesos, a través de la concepción de subsistemas dentro de un sistema de operación principal.

#### **3.4.2. Creación de los modelos de las máquinas eléctricas**

En el desarrollo del modelo energético de las plantas de agregados pétreos, los subsistemas se utilizarán para definir mediante código de Matlab y bloques matemáticos de Simulink las ecuaciones que representan el comportamiento energético de cada uno de los equipos, al tiempo que las variables de entrada y salida de cada equipo que se relacionan con la operación general de la planta o con otros equipos, se vincularán de manera externa al sub-sistema para conectarse con los demás sub-sistemas de cada equipo, como se muestran en las figuras 22 y 23, en las que se muestra el desarrollo del modelo de la trituradora de mandíbula del capítulo 3.3.2. del presente documento,

## Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos

como un subsistema dentro de Simulink para interconectar con otros elementos de una planta de agregados pétreos, según la configuración de cada usuario:

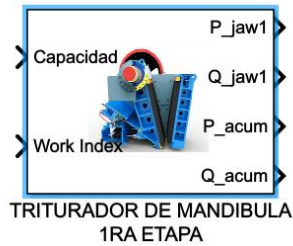


Figura 22. Vista de bloque del subsistema de una trituradora de mandíbula desarrollada en Simulink para aplicación del proyecto

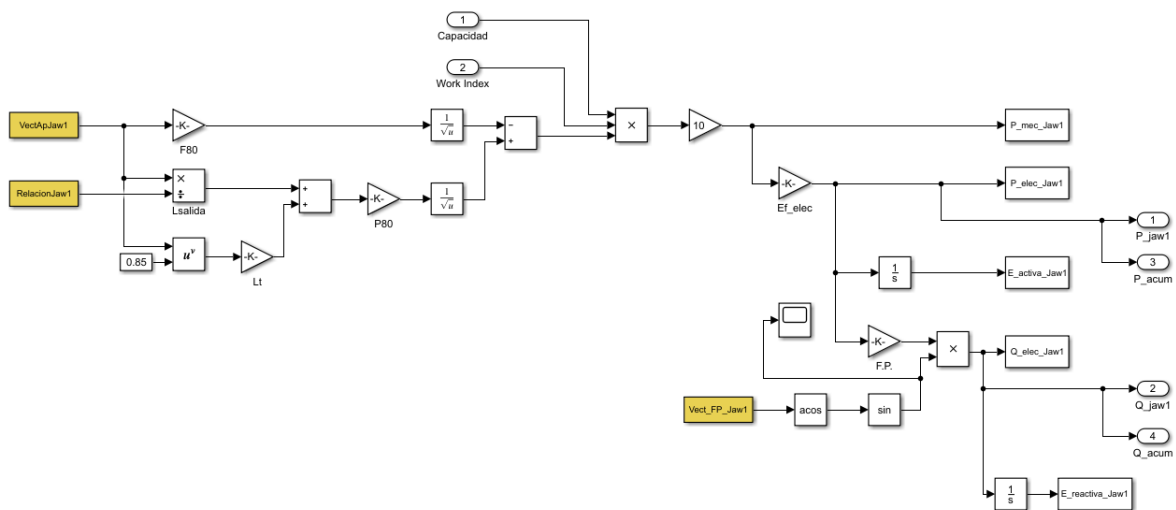


Figura 23. Vista interna del sub-sistema de la trituradora de mandíbula de la figura 22.

El sistema de cada una de las máquinas eléctricas que se utilizan en el modelo será alimentado con las variables de entrada que se estudiaron en el capítulo 3.3.3. del trabajo. Estas variables dentro del software de simulación se clasifican en dos grupos:

- **Variables físicas:** Estas variables son estables, vienen definidas por la configuración de la planta y las características de fabricación de cada uno de los equipos, su forma de instalación e interconexión con los demás equipos de la planta, o de las propiedades físicas del material pétreo. Estas variables que el usuario deberá diligenciar de cada uno de los equipos se encontrarán en la documentación técnica de la planta: fichas técnicas, planos mecánicos y eléctricos, diagramas operativos, etc.

La figura 24 muestra un ejemplo de la información que suministra la ficha técnica de una trituradora tipo como marca Metso utilizada en la planta de trituración de Gravicon, en la cual se pueden encontrar los datos que el modelo en MatLab va a solicitar al usuario, como se muestra en la figura 25.

## Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos

Dimensiones				
	A	B	C	D
HP3	2 778 mm	2 146 mm	2 475 mm	2 817 mm
HP4	2 955 mm	2 250 mm	2 156 mm	2 549 mm
HP6	3 854 mm	3 062 mm	3 522 mm	3 953 mm

Características técnicas				
	Apertura de alimentación	Potencia máxima recomendada	Peso del molino	Peso del molino completo*
HP3	220 mm	220 kW	13 040 kg	17 600 kg
HP4	252 mm	315 kW	19 810 kg	25 800 kg
HP6	330 mm	450 kW	33 000 kg	45 400 kg

\* Peso del molino completo : Molino + soporte, soporte de motor, protecciones, tolvas de alimentación y descarga.

Cámaras de trituración						
Cámara	HP3		HP4		HP6	
	Reglaje Mínimo mm	Abertura de Alimentación mm	Reglaje Mínimo mm	Abertura de Alimentación mm	Reglaje Mínimo mm	Abertura de Alimentación mm
Extra Gruesa	25	200	28	237	30	328
Gruesa	20	183	25	203	25	279
Media	15	156	16	158	20	196
Fina	11	95	10	116	13	106
Extra Fina	8	18	8	67	9	52

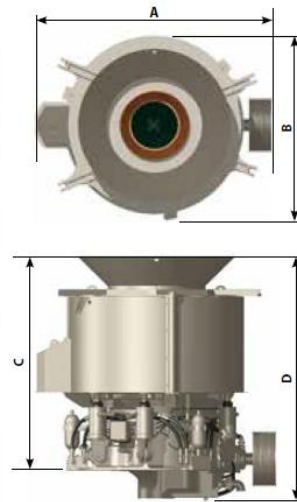


Figura 24. Datos suministrados por la ficha técnica de una trituradora tipo cono marca Metso [42].

```

%-----CARACTERÍSTICAS TRITURADORA TIPO CONO-----%
%-----%

%Los datos solicitados a continuación pueden encontrarse en la ficha
%técnica del equipo, en caso de no tenerlos, puede usar los valores
%predeterminados

%Introduzca en "AperturaCone3", las dimensiones de apertura de su
%trituradora en metros
AperturaCone3 = 0.237; %m

%Introduzca en "XCone3", la relación de trituración X:1 de la trituradora
XCone3 = 237/28;

%Introduzca la eficiencia eléctrica del motor de la trituradora según datos
%de la placa del motor o ficha técnica
Efic_Elec_Cone3 = 0.9;

%Introduzca la eficiencia eléctrica del motor de la trituradora según datos
%de la placa del motor o ficha técnica
FP_Cone3 = 0.86;
    
```

Figura 25. Captura del modelo de simulación - Ingreso de datos de una trituradora tipo cono.

- Variables operativas:** Estas variables van a depender de los requisitos de producción de la planta simulada, son variables que cambian con el tiempo y definirán el esfuerzo de cada uno de los equipos eléctricos en cada uno de los instantes de operación. Estas variables pueden ser definidas por el usuario, como la cantidad de material que se espera producir por hora, la velocidad de operación de las bandas transportadoras, la relación de trituración de cada etapa, etc., o por otro lado pueden ser estimadas por modelos predictivos según tendencias de comportamiento y la configuración de la planta, como el tamaño del material que ingresa y sale en cada etapa o las condiciones ambientales en las que se encuentra operando la planta.

## Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos

Las variables operativas que son definidas por el usuario serán llenadas en archivos de Excel que permitan al usuario del modelo de simulación ingresar los valores previstos por hora como muestra el ejemplo de la figura 26:

Las bandas en azul corresponden al proceso del ciclo 1 si la planta trituradora es de ciclo abierto						Las bandas en azul corresponden al proceso del ciclo 1 si la planta trituradora es de ciclo abierto					
BANDA TRITURADORA 1 - ZARANDA 1		BANDA ENTRADA - TRITURADORA 1		BANDA RESIDUAL ZARANDA 1		BANDA ZARANDA ENTRADA - TRIT 1		BANDA ZARANDA ENTRADA - ZARANDA 1		BANDA ZARANDA 1 - TRITURADORA 1	
Hora	Vel (m/s)	Hora	Vel (m/s)	Hora	Vel (m/s)	Hora	Vel (m/s)	Hora	Vel (m/s)	Hora	Vel (m/s)
1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0
3	0	3	0	3	0	3	0	3	0	3	0
4	0	4	0	4	0	4	0	4	0	4	0
5	0	5	0	5	0	5	0	5	0	5	0
6	0	6	0	6	0	6	0	6	0	6	0
7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5
8	5	8	5	8	5	8	5	8	5	8	5
9	5	9	5	9	5	9	5	9	5	9	5
10	5	10	5	10	5	10	5	10	5	10	5
11	5	11	5	11	5	11	5	11	5	11	5
12	5	12	5	12	5	12	5	12	5	12	5
13	5	13	5	13	5	13	5	13	5	13	5
14	4,5	14	5	14	5	14	5	14	5	14	5
15	3	15	3	15	3	15	3	15	3	15	3
16	1	16	1	16	1	16	1	16	1	16	1
17	1	17	1	17	1	17	1	17	1	17	1
18	0	18	0	18	0	18	0	18	0	18	0
19	0	19	0	19	0	19	0	19	0	19	0
20	0	20	0	20	0	20	0	20	0	20	0
21	0	21	0	21	0	21	0	21	0	21	0
22	0	22	0	22	0	22	0	22	0	22	0
23	0	23	0	23	0	23	0	23	0	23	0
24	0	24	0	24	0	24	0	24	0	24	0

Figura 26. Captura de las tablas en Excel sobre los datos operativos de bandas transportadoras del modelo.

### 3.4.3. Integración de los subsistemas y desarrollo del modelo general de la planta

Con la creación de los subsistemas de cada una de las máquinas que operan en una planta de agregados pétreos, el software de simulación debe integrar cada uno de estos subsistemas de forma tal, que operen de acuerdo con la configuración y características operativas que el usuario necesite.

Para esto, el software debe ir armando el modelo paso a paso desde los valores generales de configuración de la planta hasta los detalles operativos de cada uno de los equipos. Los datos físicos, técnicos y operativos que el software solicitará se utilizarán para simular un día completo de operación de una planta de agregados pétreos con las características escogidas por el usuario.

### 3.4.4. Consideraciones especiales

Algunas variables del modelo matemático pueden ser simplificadas sin afectar el análisis ni los resultados que entregue el modelo de simulación en MatLab, con el fin de evitar condiciones de programación que dificulten o prolonguen el uso del modelo para el usuario.

Entre las consideraciones principales que se hicieron, se resaltan:

- Todas las bandas transportadoras que existan entre dos equipos de la planta se van a representar como una única banda, sumando sus longitudes y haciendo un promedio de su inclinación.
- Las zarandas vibratorias se considerarán con un único filtro de tamaño. Si la zaranda en un caso real tiene más de un filtro, el modelo lo podrá simular como dos zarandas con operación en serie.

### **3.4.5. Resultado del diseño del modelo matemático en el software de simulación**

Se ha ejecutado una secuencia de scripts modulares que se irán generando a medida que el usuario va ingresando los datos de configuración y operación de la planta. De esta manera, el modelo irá creando un script para cada máquina de la planta, permitiendo operar de forma modular, y de esta manera, lograr cualquier configuración de planta que el usuario posea.

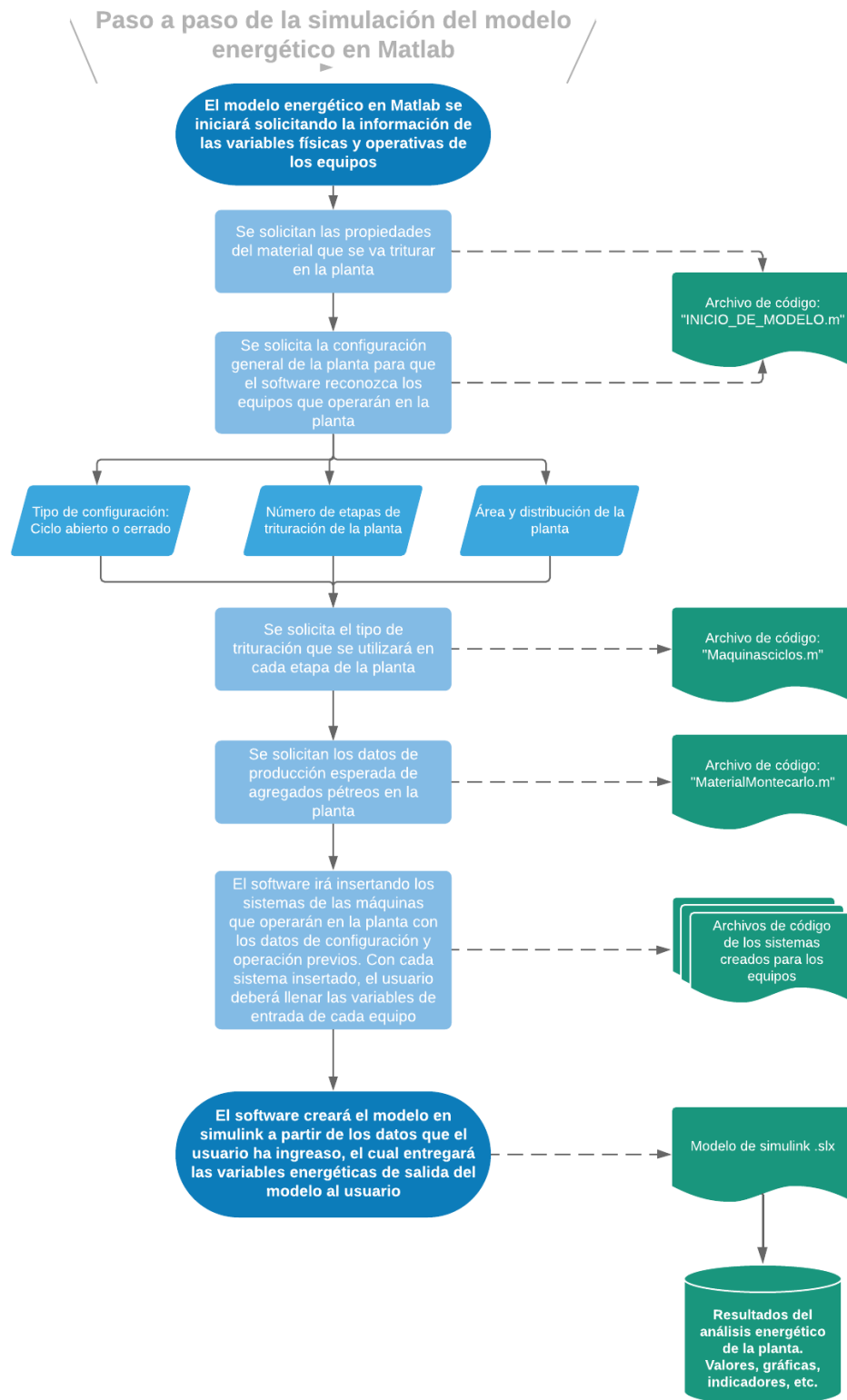
Así mismo, los modelos en Simulink crearán subsistemas de modelos por cada máquina eléctrica de la planta que conectarán sus variables en un modelo externo general.

El código y los modelos de Simulink que implementan el modelo de predicción energética se pueden encontrar adjuntos al presente trabajo en el Anexo 1.

Finalmente, la secuencia del algoritmo que seguirá el software de simulación para crear el modelo se describe en el diagrama a continuación:



# Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos



### **3.5. RESUMEN DEL CAPÍTULO**

Con el fin de que el modelo matemático pudiera ser de utilidad para cualquier usuario con una planta de fabricación de áridos, se ha realizado un levantamiento unitario de los modelos energéticos existentes de las principales máquinas de las diferentes etapas en el proceso de trituración y producción de áridos estudiadas en el capítulo 2 para crear de forma modular un modelo que se ajuste a cualquier condición de operación. De esta forma, se han obtenido los modelos matemáticos de mayor validez para los principales equipos, se han estandarizado para obtener las mismas variables de salida y se han estudiado cada una de las condiciones de operación internas y externas de una planta que puedan implicar factores de eficiencia para la operación de una máquina eléctrica desde su operación inicial nominal hasta su integración y conexión con un sistema de operación complejo y vinculante.

Por otra parte, este modelo ha sido llevado al software de simulación MatLab, con el fin de realizar la integración adecuada de variables con las características entregadas durante el desarrollo del modelo teórico. Este software tiene la posibilidad de simular las diferentes configuraciones de conexión y operación que puedan ser planteadas por el usuario, el cual tendrá que ingresar únicamente características de cada uno de sus equipos y de la operación productiva de la planta para obtener diferentes datos sobre el consumo energético de sus procesos de operación.

## **CAPÍTULO 4. VALIDACIÓN Y APLICACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO PARA PROCESOS DE OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA**

### **4.1. INTRODUCCIÓN AL CAPÍTULO**

Con el modelo matemático desarrollado en el software matemático MatLab, se debe comprobar que los resultados de las simulaciones del modelo son válidos para el uso de esta herramienta para la predicción de consumo energético de una planta trituradora en operación.

Para esto, se debe comparar el modelo matemático con casos reales en los que se pueda contar con toda la información de variables de entrada como de salida, entre mayor sean los datos que se puedan obtener de las condiciones de operación del caso real, mejores resultados comparables se van a poder obtener. Para esto, en primer lugar, se describirán los datos de entrada con los que se cuenta para poder simular el modelo, y en una segunda parte, se van a comparar y analizar los resultados obtenidos del modelo con los datos del caso real.

### **4.2. VALIDACIÓN DEL MODELO ENERGÉTICO CON LOS DATOS RECOLECTADOS DE LA PLANTA DE TRITURACIÓN CAÑAVERAL**

Con el fin de garantizar que los resultados del modelo físico de predicción de consumo energético que se ha desarrollado a lo largo del capítulo 3 para plantas de agregados pétreos es válido para predecir y diseñar las mejores rutinas de operación diaria, se han tomado datos de consumo energético y producción de las plantas de Gravicon, descritas en el capítulo 2.5, y se utilizarán para simular dos tipo de días diferentes: un día de producción habitual, sin interrupciones y con más de 10 horas de operación, y por otro lado, un día con horas de operación inferiores a 10 horas de trabajo y una producción limitada.

Los resultados de ambas simulaciones serán comparados con días reales de consumo que cumplan estas características para realizar un análisis completo de la simulación del modelo.

#### **4.2.1. Descripción de las etapas de medición energética y recolección de datos**

La empresa Vértebra Soluciones ha puesto a disposición del presente proyecto equipos de medición energética, tanto de medición local como equipos de comunicación remota en tiempo real con el centro de control de la empresa (Las fichas técnicas de estos equipos se encuentran en el Anexo 1 del presente informe).

Vertebra Soluciones ha desarrollado desde mayo del 2018 un proyecto de monitoreo y gestión energética con la empresa Gravicon S.A.S. en la que, como parte del proyecto, se pondrá a disposición de Gravicon, el modelo energético con base en los datos de las máquinas de la planta de Cañaveral. Para esto, se han elaborado diferentes etapas de mediciones energéticas para tener un detalle suficiente de la distribución de energía en la planta para la simulación de consumo:

## Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos

### 4.2.1.1. Medición general de las instalaciones de Gravicon

Como se describió en el capítulo 2.5, las instalaciones de Gravicon en Acacias, departamento del Meta en Colombia, cuentan con tres plantas de trituración. Cada una de estas plantas cuentan con una subestación propia para el suministro y distribución energética de sus operaciones [28].

Así, actualmente la distribución de las subestaciones se realiza de la siguiente manera:

Tabla 22. Distribución de subestaciones Gravicon

Subestación	Descripción	Planta alimentada
Subestación 1	1 MVA 34500V/440V	Planta Cañaveral
Subestación 2	500 kVA 34500V/440V	Planta Guayuriba
Subestación 3	75 kVA 34500V/440V	Planta Móvil

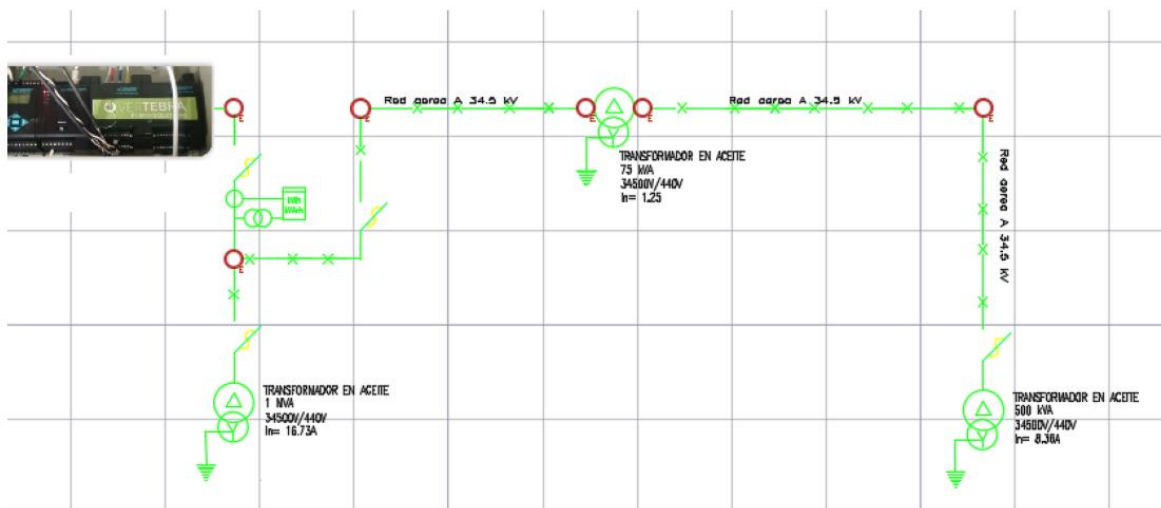


Figura 27. Diagrama unifilar de las subestaciones de Gravicon [28].

Pero, como se muestra en la figura 27, las instalaciones de Gravicon cuentan con un único punto de medición energética para la facturación de consumo de energía, es decir, el comercializador de energía entrega un único valor de consumo energético por las tres plantas de trituración.

Vertebra Soluciones ha determinado en primer lugar el consumo energético de cada una de las plantas y cuál es su participación en el consumo total de las instalaciones de Gravicon, tomando mediciones en tiempo real en cada una de las subestaciones desde el 25 de enero hasta el 25 de marzo del 2019.

## Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos

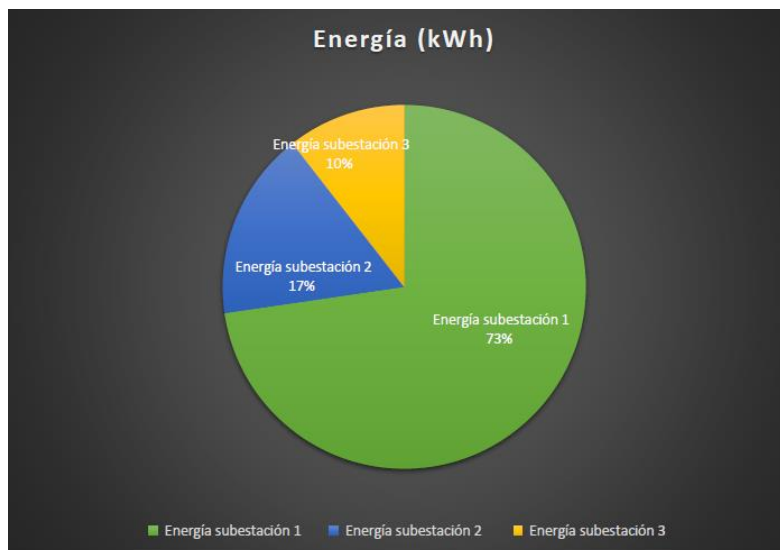


Figura 28. Participación en el consumo de energía total de las instalaciones por subestación [28].

Como se observa en la figura 28, la subestación 1, correspondiente a la alimentación de la planta Cañaverl, consume el 73% de la energía total de la planta durante el análisis de los dos meses. En el momento de realizar la comparativa de los resultados del modelo energético con las mediciones hechas por el comercializador de energía, se debe tener en cuenta el porcentaje de participación diaria que debe tener la planta de Cañaverl respecto al porcentaje total.

La empresa comercializadora de energía con la cual tiene contrato Gravicon, ofrece en su página web acceso a las mediciones de energía por hora de las instalaciones de Gravicon. Vertebra Soluciones tiene acceso a estas mediciones para poder realizar su gestión de ahorro, las cuales serán usadas para la validación del modelo con el fin de comparar el resultado de consumo total de la planta del modelo con las mediciones del consumo de la empresa comercializadora y el comportamiento de producción de las plantas.

### 4.2.1.2. Medición específica de cargas eléctricas en la planta Cañaverl

Una segunda etapa de mediciones consiste en detallar el consumo de la planta Cañaverl: conocer la proporción de consumo de las principales máquinas eléctricas usadas para la trituración de piedra.

Vertebra Soluciones ha instalado desde el 20 de mayo del 2019, cinco medidores de energía para cargas puntuales que ayuden a validar los consumos entregados de cada una de estas cuatro máquinas simuladas en el modelo, operando bajo los parámetros de producción de un día conocido dentro de la planta de Cañaverl.

## Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos

Las cuatro cargas que tienen monitoreo energético en tiempo real en la planta de Cañaverál son:

Tabla 23. Cargas eléctricas monitoreadas por Vertebra Soluciones en la planta Cañaverál

Cargas monitoreadas	Etapas
Trituradora de mandíbula Lippman	1
Banda principal	1
Zaranda 1	1
Trituradora tipo cono Simmons	2

### 4.2.1.3. Producción de las plantas de trituración de Gravicon

Así como el modelo de predicción energética, requiere los datos de mediciones reales de energía de los equipos de la planta de Cañaverál para poder comparar los resultados de predicción del modelo, este también requiere conocer los datos de la variable de entrada del modelo que determina el comportamiento energético de la planta, es decir, la producción de material pétreo.

La dirección de la planta de Gravicon ha provisto mensualmente a Vertebra Soluciones los datos de producción diaria de cada una de las tres plantas de la empresa. Esta información se entrega en volumen y peso del material que entra a la planta para ser triturada.

A pesar de que la planta de trituración de Cañaverál tiene tres tipos de productos de salida de diferentes etapas, Gravicon solamente lleva control del material que transportan desde el río Guayuriba hasta la entrada de la planta. Así mismo, para la validación de la simulación, el modelo en MatLab tendrá como variable de entrada el material que entra a la planta y la producción de cada uno de los productos de salida serán aleatorios (según la simulación aleatoria del tamaño del material realizada con el método de Montecarlo).

De esta manera, con los datos tanto de producción como de consumo energético diario de la planta de Cañaverál, se escogerán 2 días tipo para la validación del modelo.

### 4.2.2. Datos de producción y consumo energético reales de la planta Cañaverál

En primer lugar, se ha realizado un análisis del comportamiento del consumo energético de las instalaciones de Gravicon con diferentes modelos de producción. Entre los datos que la dirección de Gravicon envía de la producción realizada cada día, especifica el número de horas trabajadas.

Existen diferentes factores de mantenimientos, pausas y distribución de cargas dentro de la planta que, como consecuencia, hacen que los indicadores energéticos de la planta de Cañaverál, tenga variaciones como la que se muestra a continuación:

Tabla 24. Indicadores de consumo energético planta Cañaverál - Junio 2019

Consumo energético unitario en la planta Cañaverál – Junio 2019		
Consumo mínimo	Consumo promedio	Consumo máximo
2.6 kWh/m <sup>3</sup>	3.3 kWh/m <sup>3</sup>	4.2 kWh/m <sup>3</sup>

## Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos

La planta de Cañaverall tiene variaciones por encima del 50% en sus indicadores de producción, esto quiere decir que la cantidad de energía que se consume en dos días con la misma producción, pero cambiando únicamente las rutinas y métodos de operación, pueden cambiar drásticamente sus consumos.

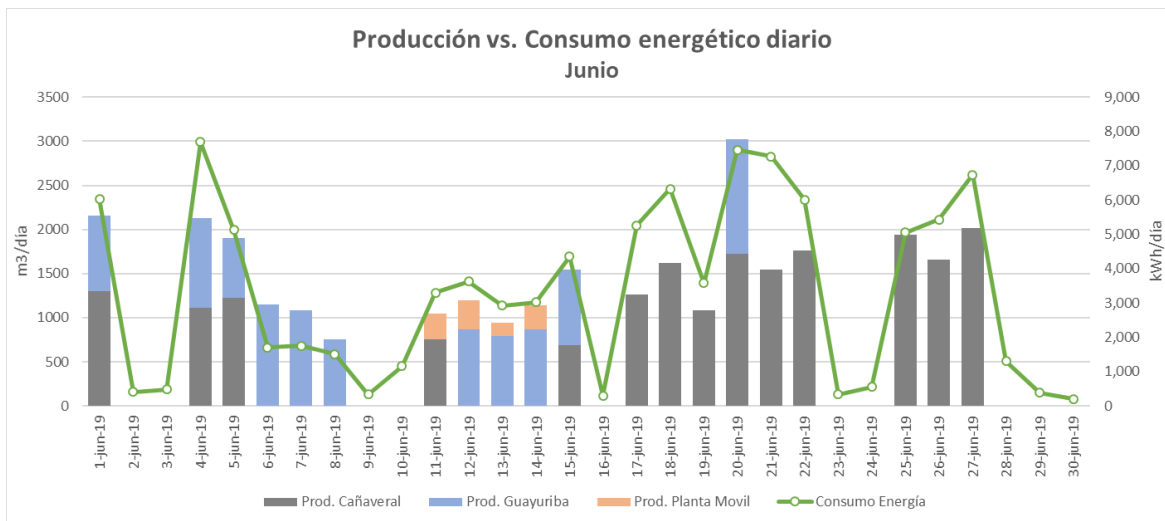


Figura 29. Producción vs. Consumo energético diario de las instalaciones de Gravicon en junio del 2019

Los principales factores que pueden afectar las diferencias de consumo de energía en los procesos de producción son:

- Número de horas trabajadas al día – pueden tener variaciones de 4 a 10 horas de trabajo según las condiciones climáticas y el pedido de material de los clientes.
- Tamaño promedio de la roca que llega a la planta – según los datos de Gravicon, depende de la sección del río desde la que se recoge la materia prima.
- Número de etapas que se habilitan para la trituración de la materia prima.

Con base en estos tres factores, se escogerán dos días tipo en los que puedan variar las condiciones de producción para corroborar los datos de predicción energética del modelo matemático. Todas las tablas de producción de la planta Cañaverall que Gravicon ha enviado para el desarrollo del presente proyecto se encuentran adjuntas en el anexo 3.

### 4.2.2.1. Jornada completa de operación continua

En primer lugar, se simulará un día habitual de producción ininterrumpida, la planta Gravicon considera como producción óptima los días con más de 1800 m<sup>3</sup> de material producido y en el que se pueden cumplir horarios de 10 horas o más de trabajo, según sus pedidos. El 3 de julio del 2019 ha tenido una de las operaciones más estables del segundo trimestre del año 2019 en la planta de Cañaverall, con alta producción y operación continua de hasta 10 horas.

Las características de la operación y producción de la planta durante el 3 de julio en la planta de Cañaverall se muestran en la tabla 25 y en la figura 30:

## Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos

Tabla 25. Características de operación de la planta Cañaverl - 3 de julio del 2019

Características de operación de la planta Cañaverl – 3 de julio del 2019					
Horas de operación	Producción obtenida		Energía activa consumida	Etapas operativas	Clima medio del día
11	1980 m <sup>3</sup>	3250 ton	4575 kWh	3	10°C – 28°C Clima seco

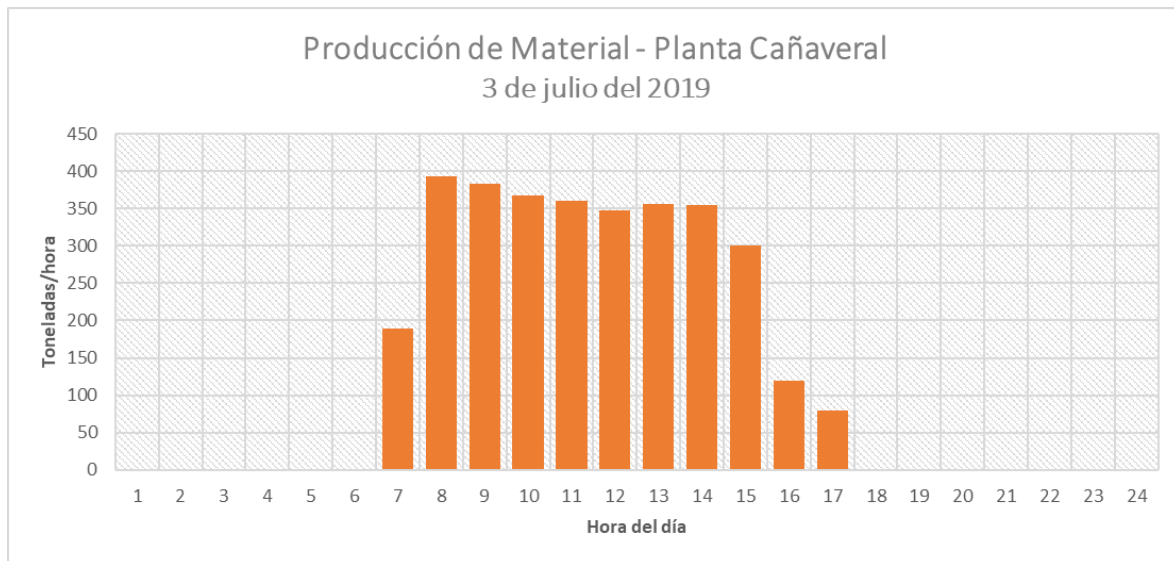


Figura 30. Producción de material en la planta Cañaverl - 3 de julio del 2019

Con estos datos de producción, se han recopilado los consumos energéticos de cada uno de los puntos monitoreados que se han especificado en el capítulo 4.1.1. del presente documento. La figura 31 muestra los consumos de energía por hora durante el 3 de julio.

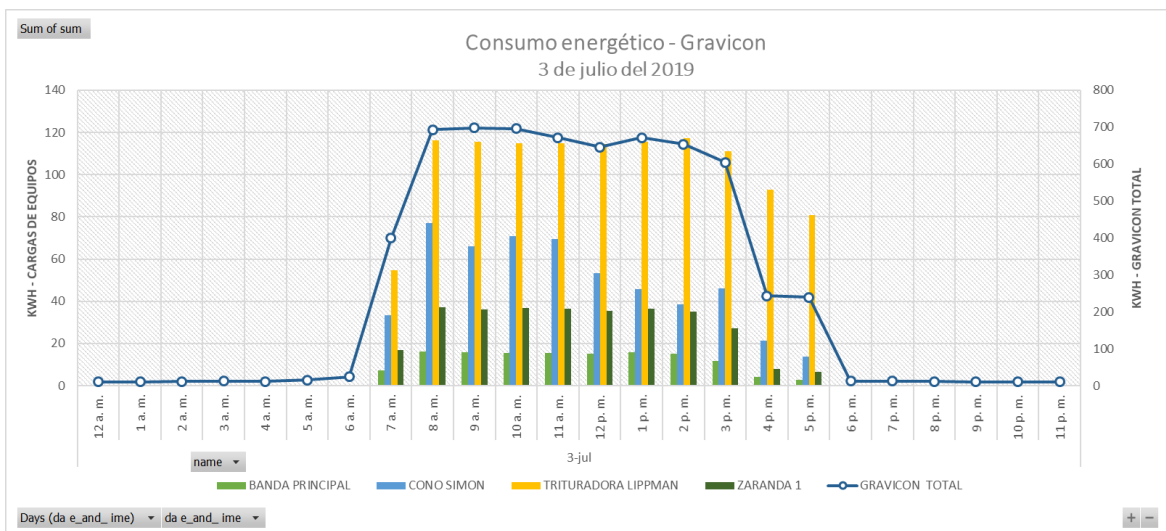


Figura 31. Consumos energéticos de las cargas monitoreadas de la planta Cañaverl - 3 de julio del 2019 [43].

Con la información de la tabla 25 y las figuras 30 y 31 de variables de entrada y de salida en un día de producción de la planta de Cañaverl, se realizarán un primer grupo de simulaciones del modelo



## Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos

matemático, teniendo en cuenta todos los datos técnicos de los equipos instalados, sus características físicas, mecánicas y eléctricas, y aproximaciones en las variables de entrada.

### 4.2.2.2. Jornada completa de operación baja

En una segunda ocasión, se simulará un día de menos horas de operación y una producción total menor a la de días óptimas (por encima de 1800 m<sup>3</sup>). El 21 de junio del 2019 ha contado con una operación más corta en número de horas y las máquinas no han llegado a sus valores nominales de operación, es decir, las horas que la planta estuvo trabajando, siempre mantuvo bajos niveles de material de entrada.

Las características de la operación y producción de la planta durante el 21 de junio en la planta de Cañaverl se muestran en la tabla 26 y en la figura 32:

Tabla 26. Características de operación de la planta Cañaverl – 21 de junio del 2019

Características de operación de la planta Cañaverl – 3 de julio del 2019					
Horas de operación	Producción obtenida		Energía activa consumida	Etapas operativas	Clima medio del día
9	1548 m <sup>3</sup>	2540 ton	3883 kWh	3	24°C – 40°C Clima seco

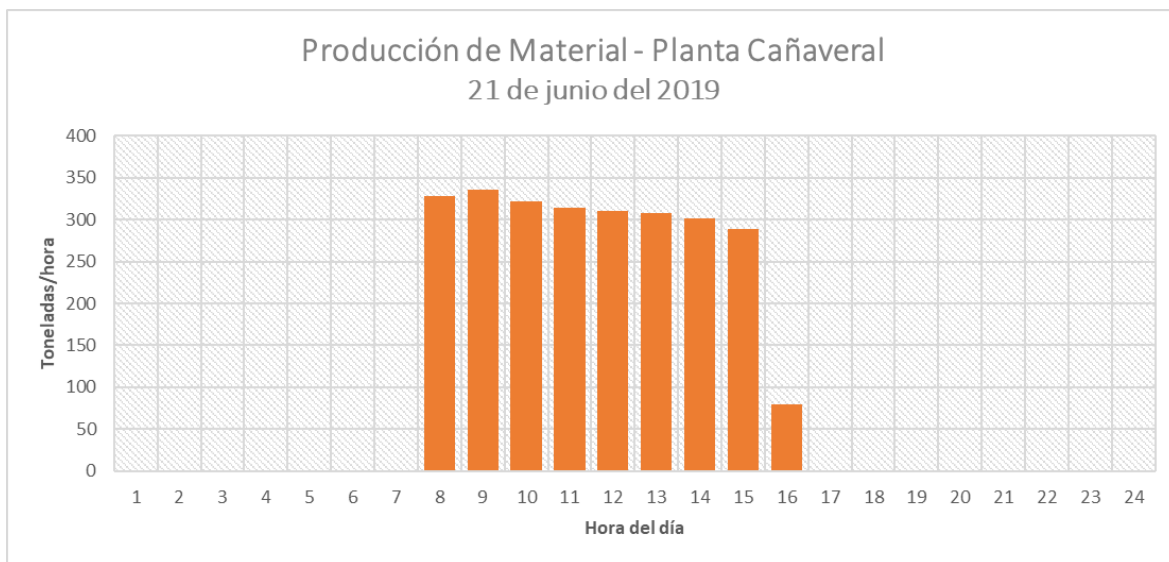


Figura 32. Producción de material en la planta Cañaverl - 21 de junio del 2019

Con estos datos de producción, se han recopilado los consumos energéticos de cada uno de los puntos monitoreados que se han especificado en el capítulo 4.1.1. del presente documento. La figura 33 muestra los consumos de energía por hora durante el 21 de junio.

## Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos

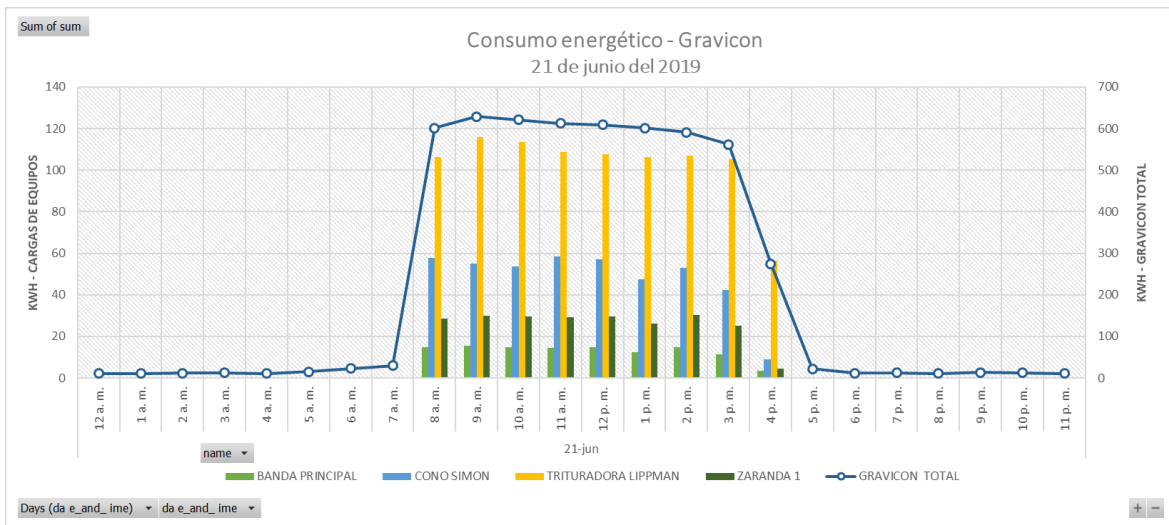


Figura 33. Consumos energéticos de las cargas monitoreadas de la planta Cañaverál - 3 de julio del 2019 [43].

Con la información de la tabla 26 y las figuras 32 y 33 de variables de entrada y de salida en un día de producción de la planta de Cañaverál, se realizarán un segundo grupo de simulaciones del modelo matemático, teniendo en cuenta todos los datos técnicos de los equipos instalados, sus características físicas, mecánicas y eléctricas, y aproximaciones en las variables de entrada.

A continuación, se realizarán las simulaciones de los dos casos de operación descritos en este capítulo.

### 4.2.3. Comparativa de resultados del modelo energético con los consumos reales

Con los datos de cada uno de los equipos de la planta de Cañaverál, se ha simulado la configuración y los equipos eléctricos con las características físicas del capítulo 2.5 y las características operativas del capítulo 4.2.2. para obtener los consumos horarios de cada máquina eléctrica y el consumo total de la planta.

A continuación, se realizará una comparativa de los resultados obtenidos con el modelo matemático de predicción energética respecto a los datos obtenidos de los medidores de energía de Vertebra Soluciones.

#### 4.2.3.1. Jornada completa de operación continua

En primer lugar, se simuló las condiciones operativas, de producción y ambientales de la planta Cañaverál en el día 3 de julio como se describe en el capítulo 4.2.2.1., obteniendo los siguientes resultados:

##### A. Consumo banda principal:

Todas las bandas transportadoras se encuentran controladas por variadores en paralelo, es decir, las variaciones de velocidad en todas las bandas van a ser proporcionales.

## Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos

Actualmente la planta de Cañaveral solo tiene 2 valores de variación de la velocidad: 60% de su velocidad nominal, que en el caso de la banda principal corresponden a 3m/s, y 100% de su velocidad nominal, que correspondería a 5m/s.

Los resultados de la simulación respecto al consumo de la banda principal se encuentran en la figura 34:

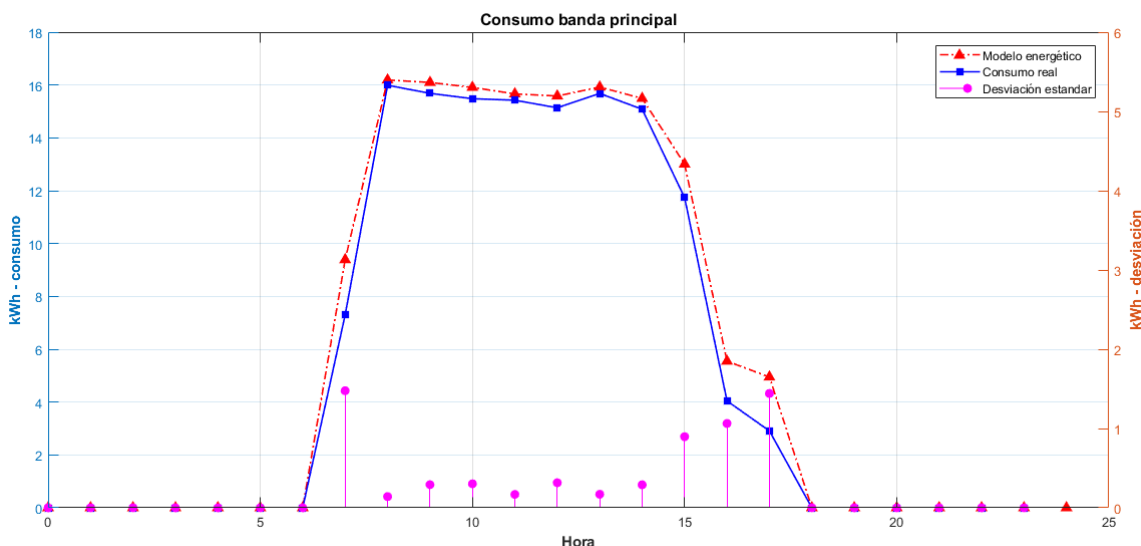


Figura 34. Comparativa de resultados del consumo energético de la banda principal para jornada continua.

Así mismo, una aproximación a los valores puntuales de consumo energético de la banda transportadora principal se encuentra en la tabla 27:

Tabla 27. Comparativa de valores energéticos de la banda principal para jornada continua.

Concepto		Valores medición GRAVICON	Valores modelo matemático	Desviación estándar
<b>Energía consumida</b>		134 kWh	143,8 kWh	6,43 kWh
<b>Consumo pico</b>	Hora	8:00		
	Valor	15,98 kWh	16,18 kWh	0,14 kWh
<b>Consumo mínimo</b>	Hora	17:00		
	Valor	2,90 kWh	4,94 kWh	1,44 kWh

Los valores de consumo de la banda transportadora en momento de baja producción (7:00 y 16:00 – 17:00) presentan las mayores desviaciones del consumo del modelo respecto a las mediciones reales de la máquina, mientras que en las horas de mayor producción (8:00 – 15:00) tienen desviaciones por debajo de 0,5 kWh. Un motor eléctrico trabajando cerca a su capacidad nominal tiene comportamientos más estables, las variables externas van a tener menor impacto sobre su consumo de energía frente a su velocidad de operación y el torque generado para sus tareas.

El consumo de energía total de la máquina resultado del modelo predictivo tiene una desviación menor al 5% del consumo total real de la planta.

## Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos

### B. Consumo trituradora de mandíbula primera etapa:

La trituradora de mandíbula controla el ritmo de operación de toda la planta de trituración Cañaveral, es la primera máquina eléctrica en recibir el material de entrada de la planta, dependiendo de su ritmo de operación y la relación de trituración de esta máquina, se ajustarán los valores operativos de los demás equipos.

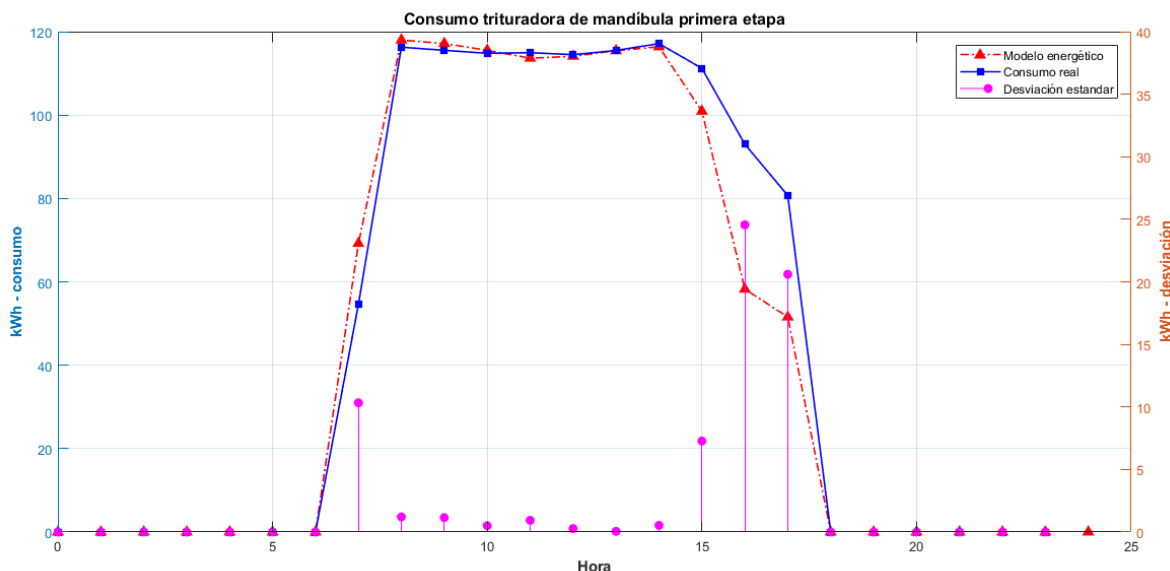


Figura 35. Comparativa de resultados del consumo energético de la trituradora de mandíbula del primer ciclo para jornada continua.

Así mismo, una aproximación a los valores puntuales de consumo energético de la trituradora de mandíbula principal se encuentra en la tabla 28:

Tabla 28. Comparativa de valores energéticos de la trituradora de mandíbula del primer ciclo para jornada continua.

Concepto		Valores medición GRAVICON	Valores modelo matemático	Desviación estándar
<b>Energía consumida</b>		1148 kWh	1090 kWh	41,02 kWh
<b>Consumo pico</b>	Hora		14:00	
	Valor	117,13 kWh	116,38 kWh	0,53 kWh
<b>Consumo mínimo</b>	Hora		17:00	
	Valor	80,70 kWh	51,56 kWh	20,6 kWh

El consumo energético total de la trituradora de mandíbula presenta desviaciones por debajo del 5%, con la observación de que los consumos reales de la máquina trituradora entre las 16:00 y 17:00 horas no coinciden con el comportamiento de producción de la planta ni de las demás máquinas eléctricas, además que es la única máquina que, durante estas horas, presenta un consumo mayor real que el arrojado por la simulación, superando una desviación del 10%; se ha consultado con la planta de Gravicon acciones de mantenimiento sobre la trituradora, pero no se han encontrado registros sobre esta.

## Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos

Por otra parte, el análisis de comportamientos durante las horas de operación nominal de la planta, arrojan como resultado del modelo desviaciones por debajo de 1kWh dando como resultado una alta confiabilidad en la predicción del modelo, mientras que, en las horas de bajo consumo, el modelo ha arrojado un resultado que se esperaría normal para la operación que tuvo la planta, pero que, en comparación con los consumos reales, han tenido desviaciones que superan los 20,6 kWh.

### C. Consumo zaranda vibratoria primera etapa:

La zaranda vibratoria tiene valores de operación constante, el valor operativo que determina el nivel de consumo energético de la máquina es el flujo de material de material pétreo que se distribuye a lo largo de la zaranda. Este valor depende de la operación de la banda transportadora principal, por lo que las curvas de consumo se pueden considerar proporcionales, como se muestra en la figura 36:

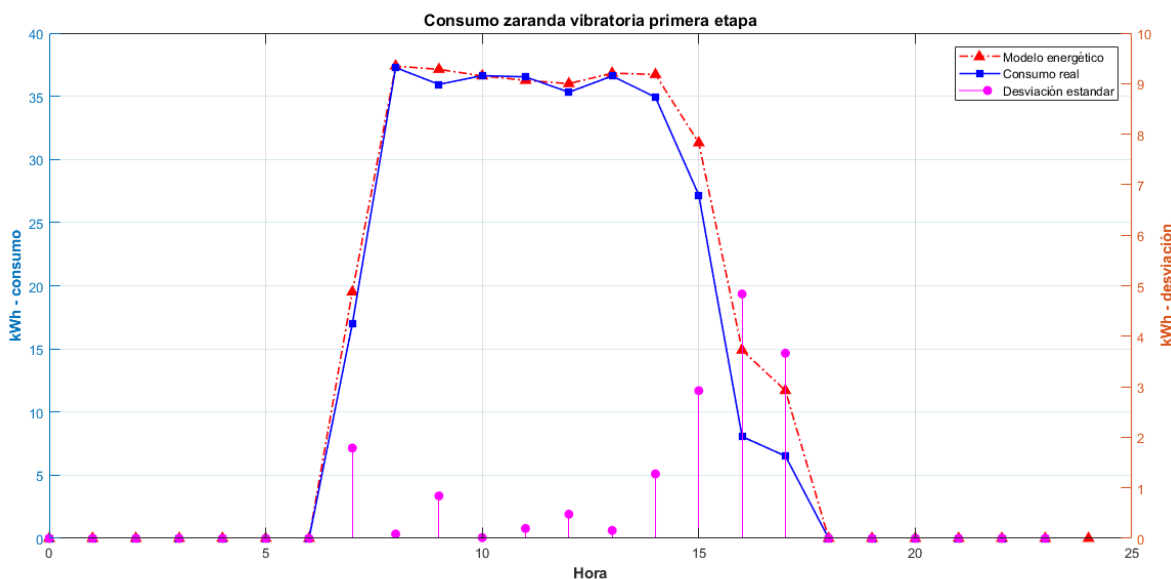


Figura 36. Comparativa de resultados del consumo energético de zaranda vibratoria del primer ciclo para jornada continua.

Así mismo, una aproximación a los valores puntuales de consumo energético de la zaranda se encuentra en la tabla 29:

Tabla 29. Comparativa de valores energéticos de la zaranda vibratoria del primer ciclo para jornada continua.

Concepto		Valores medición GRAVICON	Valores modelo matemático	Desviación estándar
<b>Energía consumida</b>		312 kWh	334 kWh	15,55 kWh
<b>Consumo pico</b>	Hora		8:00	
	Valor	37,26 kWh	37,39 kWh	0,08 kWh
<b>Consumo mínimo</b>	Hora		17:00	
	Valor	6,51 kWh	9,93 kWh	3,66 kWh

## Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos

Al igual que en la banda transportadora, los valores de consumo de la zaranda en momento de baja producción presentan las mayores desviaciones del consumo del modelo respecto a las mediciones reales de la máquina, mientras que el consumo energético total de la zaranda vibratoria tiene una desviación menor que la banda transportadora.

Los consumos en operación nominal tienen variaciones por debajo del 0,5 kWh, pero los resultados del modelo tienen menor flexibilidad ante la variación de la producción respecto al consumo real.

Finalmente, el consumo energético del modelo predictivo respecto al consumo real de la zaranda tiene una desviación estándar de 15 kWh, es decir, menor al 5% del valor real consumido por la máquina.

### D. Consumo trituradora tipo cono como segunda etapa:

La trituradora tipo cono es la única máquina eléctrica posterior a la zaranda vibratoria de la primera etapa que se está monitoreando para el presente proyecto, la cual se está midiendo para poder asociar el comportamiento de los valores aleatorios respecto a la producción real, en este caso se espera que haya mayores variaciones en la potencia instantánea de cada hora de la máquina, pero que el consumo energético se mantenga similar al finalizar el día. El consumo de energía de la máquina va a depender de la cantidad de material pétreo que pase por el filtro de la zaranda vibratoria, y por ende, no va a depender de los datos de entrada del usuario.

La cantidad de material pétreo que ingresa a la trituradora de la segunda etapa va a depender del tamaño del material pétreo que pasa por cada una de las etapas de trituración, tal como se describe en el capítulo 3.3.6., por lo que los consumos reales de la planta y los valores de simulación pueden tener importantes variaciones tras cada hora de simulación. A continuación, la figura 37 muestra las características de comportamiento de esta trituradora:

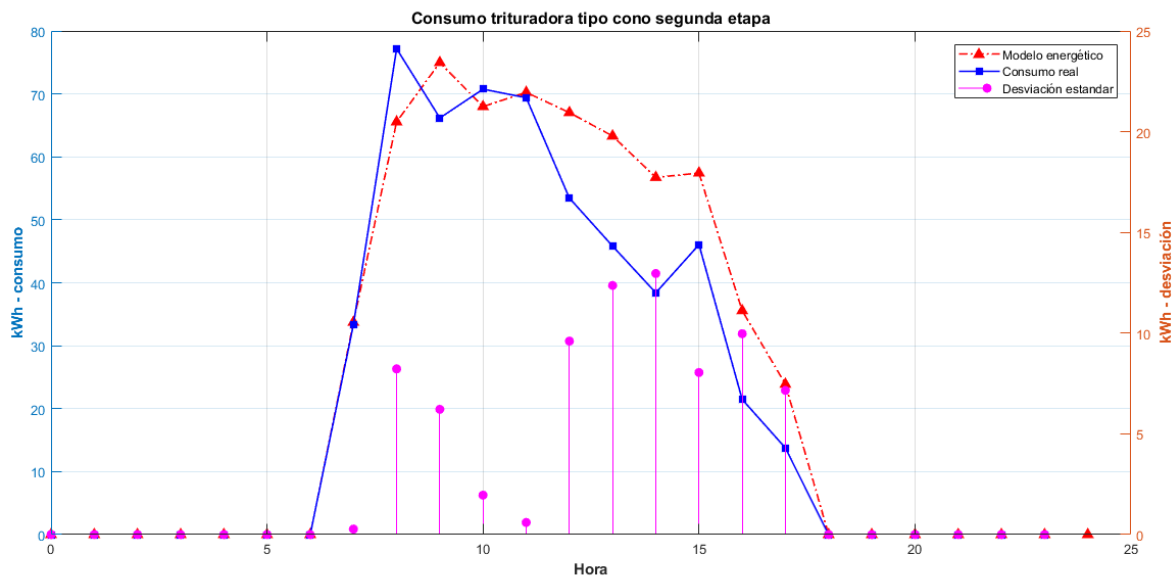


Figura 37. Comparativa de resultados del consumo energético de la trituradora tipo cono del segundo ciclo para jornada continua

## Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos

Así mismo, una aproximación a los valores puntuales de consumo energético de la trituradora tipo cono se encuentra en la tabla 30:

Tabla 30. Comparativa de valores energéticos de la trituradora tipo cono del segundo ciclo para jornada continua.

Concepto		Valores medición GRAVICON	Valores modelo matemático	Desviación estándar
<b>Energía consumida</b>		535,8 kWh	616,2 kWh	57,27 kWh
<b>Consumo pico</b>	Hora		8:00	
	Valor	77,17 kWh	65,55 kWh	8,22 kWh
<b>Consumo mínimo</b>	Hora		17:00	
	Valor	13,75 kWh	23,88 kWh	7,15 kWh

Los equipos y máquinas eléctricas a que se encuentran posterior a la primera zaranda vibratoria van a tener valores de consumos determinados no únicamente por los datos de entrada del usuario, como ocurre en la primera etapa.

A pesar de que el rango del tamaño de las rocas de alimentación ha sido obtenido a partir de estudios de la misma empresa Gravicon, los tamaños se encuentran como una aproximación de las características usuales del material. La simulación del comportamiento energético de la trituradora tipo cono tiene dos características que se pueden resaltar a partir de la simulación de este primer caso:

- El consumo energético de la trituradora tipo cono sigue una tendencia similar a la producción total de la planta, al igual que los equipos del primer ciclo.
- Por otra parte, en ambas curvas se observa que hasta las 11:00h, los consumos se mantienen estables, como en los equipos del primer ciclo, pero en ambas ocasiones, a partir de las 12:00h, ambas curvas empiezan a disminuir sus consumos (con pendientes diferentes) hasta las 16:00h en las que retoman los consumos usuales de los equipos anteriores.
- Los consumos pico de las dos curvas, a pesar de ubicarse en horas diferentes debido a los tamaños aleatorios, se encuentran con una diferencia menor a 3 kW, validando los límites de operación del modelo.

### E. Consumo total de la planta Cañaverál:

Las instalaciones de Gravicon, como se nombró en el capítulo 2.5. del presente informe, cuenta con tres plantas de trituración y un único punto de medición energética por parte del comercializador de energía.

A partir de varios estudios de Vertebra Soluciones de consumo, se considera el consumo energético de la planta Cañaverál como el 73% de la curva de consumo de energía de Gravicon, como se muestra en la figura 38, en la que el consumo teórico de la planta Cañaverál a partir de la curva real de consumo de Gravicon se muestra en línea segmentada, mientras que el consumo del modelo energético se encuentra en rojo:

## Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos

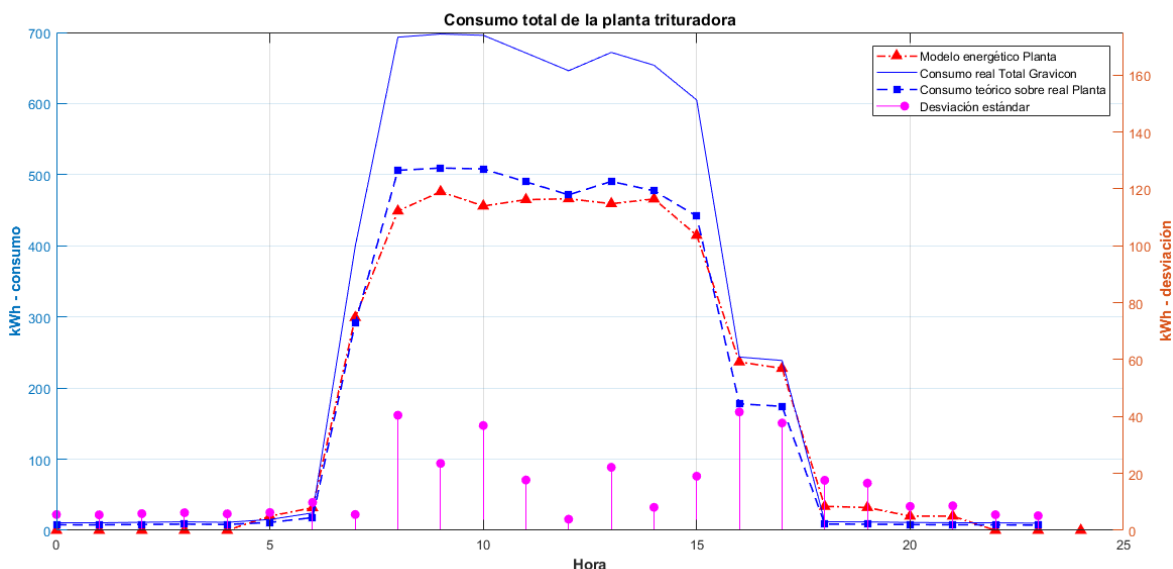


Figura 38. Comparativa de resultados del consumo energético de la planta Cañaverál para jornada continua.

Así mismo, una aproximación a los valores puntuales de consumo energético de la planta Cañaverál se encuentra en la tabla 31:

Tabla 31. Comparativa de valores energéticos de la planta Cañaverál para jornada continua.

Concepto		Valores medición GRAVICON	Valores modelo matemático	Desviación estándar
<b>Energía consumida</b>		4575 kWh	4567 kWh	5,65 kWh
<b>Consumo pico</b>	Hora		8:00	
	Valor	509,39 kWh	476,12 kWh	23,52 kWh
<b>Consumo mínimo</b>	Hora		17:00	
	Valor	174,34 kWh	227,70 kWh	37,72 kWh

La curva del consumo energético de la planta Gravicon va a tener mayores variaciones a las otras curvas de consumo debido a los valores aleatorios del tamaño de las rocas que se encuentran en cada una de las etapas de trituración. Este factor es el principal determinante de la cantidad de material que se filtran en las zarandas y, por ende, la cantidad de material que entra en cada una de las máquinas en la segunda y tercera etapa. Como hemos visto a lo largo de los capítulos 3 y 4, la cantidad de material es la principal variable que determinará el consumo de todas las máquinas del proceso de trituración y por ende sus valores cambiarán si cambia la cantidad de material en cada etapa.

Por otra parte, el valor que debe mantenerse constante es la energía consumida por la planta. Sin importar la distribución del material, la sumatoria del consumo de todas las máquinas deberá ser similar en la mayoría de las simulaciones que corra el programa. En este caso, el modelo muestra un consumo en el segundo ciclo con variaciones importantes respecto al comportamiento de



## Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos

producción, pero entre los tres ciclos conservan los comportamientos similares al del consumo real de la planta.

Finalmente, los consumos reales entre las 16:00h y 17:00h de la planta Cañaveral pueden ser mayores, debido a que, de las tres plantas, la planta móvil se encontraba fuera de operación desde las 15:00h, pero sin poder comprobar estas proporciones de consumo, las curvas deben mantener la proporción de 73% de consumo que se estudió en el capítulo 4.1.1.

### 4.2.3.2. Jornada completa de operación baja

En una segunda ocasión, se simularon las condiciones operativas, de producción y ambientales de la planta Cañaveral en el día 21 de junio como se describe en el capítulo 4.2.2.2., obteniendo los siguientes resultados:

#### A. Consumo banda principal:

Así como la planta en general muestra un comportamiento desacelerado en esta jornada, las bandas transportadoras no se van a enfrentar a sus valores máximos de carga ni tampoco tendrán la necesidad de trabajar en sus velocidades nominales. La figura 39 muestra el comportamiento de la banda principal con una carga máximo del 70%-80% de su capacidad nominal en las horas de mayor operación:

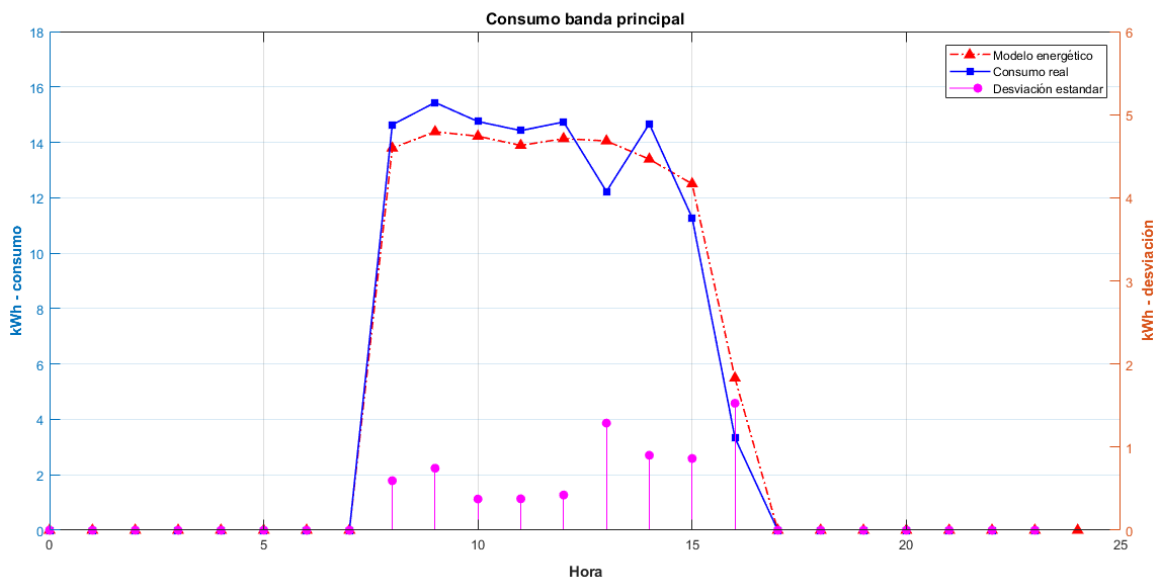


Figura 39. Comparativa de resultados del consumo energético de la banda principal para jornada baja.

Así mismo, una aproximación a los valores puntuales de consumo energético de la banda transportadora principal se encuentra en la tabla 32 para un día de jornada baja:

## Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos

Tabla 32. Comparativa de valores energéticos de la banda principal para jornada baja.

Concepto		Valores medición GRAVICON	Valores modelo matemático	Desviación estándar
<b>Energía consumida</b>		115,4 kWh	115,85 kWh	0,31 kWh
<b>Consumo pico</b>	Hora	9:00		
	Valor	15,43 kWh	14,38 kWh	0,74 kWh
<b>Consumo mínimo</b>	Hora	16:00		
	Valor	3,33 kWh	5,49 kWh	1,52 kWh

El primer detalle a observar en esta comparativa es el comportamiento de la banda transportadora a las 13:00h, la producción a esta hora se mantiene similar al de las horas de operación nominal, pero aún así se registra un descenso de 2,5 kWh en el consumo de la banda, seguramente por fallas, o pausas en la producción a esta hora, que no quedan registrados en la producción total y por ende, no se pueden predecir con el modelo.

En las demás horas de producción estándar de la planta (8:00h – 15:00h) la desviación estándar no supera 1 kWh; en el caso crítico, que es en la hora de mayor consumo (9:00h), la desviación estándar no supera el 5% del consumo nominal. Mientras que en las horas de cierre, cuando la producción se reduce por debajo del 20%, la desviación estándar vuelve a repetirse cercano a 1,5 kWh.

Finalmente, el consumo energético de un día de operación tuvo una desviación estándar menor a 0,5 kWh (0,3%), pero este valor puede deberse al comportamiento anormal de la banda transportadora a las 13:00h. Con un consumo similar al de las demás horas de producción, la desviación habría superado 1 kWh, siendo de igual forma un resultado muy cercano al valor real medido.

### **B. Consumo trituradora de mandíbula primera etapa:**

La trituradora de mandíbula, al ser el primer equipo en recibir el material de entrada, registra directamente menos material el cual reducir. Esta reducción puede verse reflejada en menos grupos de rocas por cada hora, o en cada grupo de descarga, menor material. En ambos casos, la reducción del material debe verse reflejada en la figura 40:

## Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos

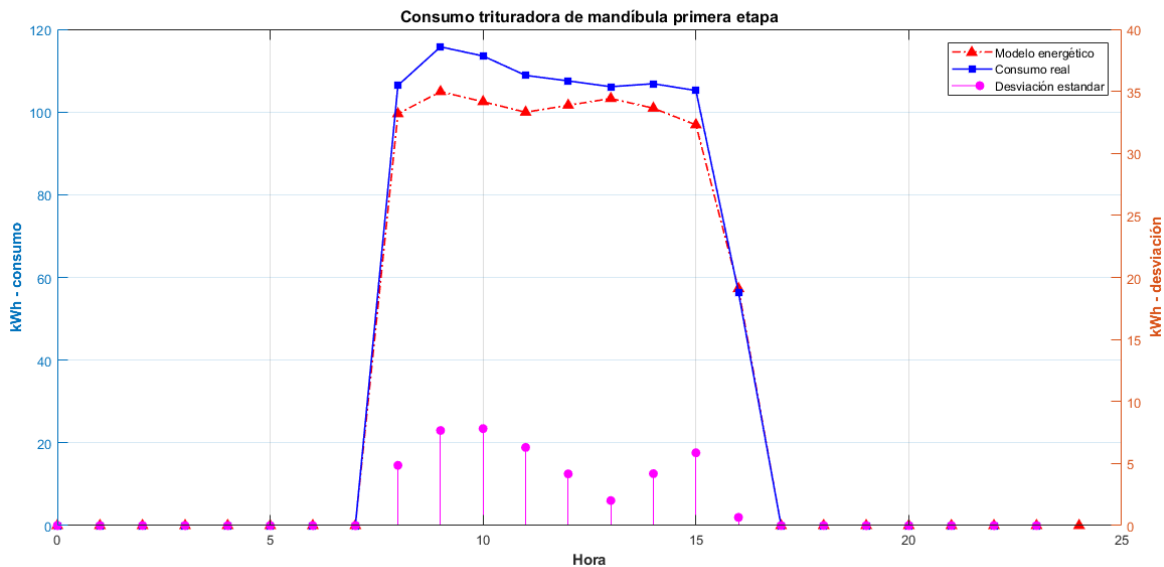


Figura 40. Comparativa de resultados del consumo energético de la trituradora de mandíbula del primer ciclo para jornada baja.

Así mismo, una aproximación a los valores puntuales de consumo energético de la trituradora de mandíbula principal de la jornada baja se encuentra en la tabla 33:

Tabla 33. Comparativa de valores energéticos de la trituradora de mandíbula del primer ciclo para jornada baja.

Concepto		Valores medición GRAVICON	Valores modelo matemático	Desviación estándar
<b>Energía consumida</b>		926 kWh	866 kWh	42,42 kWh
<b>Consumo pico</b>	Hora	9:00		
	Valor	115,75 kWh	104,91 kWh	7,66 kWh
<b>Consumo mínimo</b>	Hora	16:00		
	Valor	56,35 kWh	57,29 kWh	0,65 kWh

Al igual que en la simulación de jornada continua, el consumo energético real de la trituradora de mandíbula no muestra cambios proporcionales ante el cambio de producción, a pesar de que la producción disminuye un 20 a 30%, el consumo energético tiene disminuciones máximas del 15%, mientras que el modelo predictivo muestra una linealidad más directa con la producción.

En el caso anterior cuando la producción estaba cercana a su capacidad nominal, los consumos eran bastante próximos, mientras que, en un día de menor producción, la desviación estándar se eleva hasta un 5%.

Por otra parte en la hora de cierre de menor producción (17:00h), ambas curvas muestran una respuesta inferior al del resto de máquinas ante la baja producción de material. Es decir, la trituradora de mandíbula tiene consumos con menores pendientes de consumo energético respecto a la producción.

## Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos

Finalmente, la desviación estándar del consumo energético del día se mantiene en 42 kWh, al igual que el caso anterior, siendo nuevamente una desviación inferior al 5% del consumo total de la máquina.

### C. Consumo zaranda vibratoria primera etapa:

El valor operativo que determina el nivel de consumo energético de esta máquina es el flujo de material de material pétreo que se distribuye a lo largo de la zaranda. Este valor depende de la operación de la banda transportadora principal, la cual, en la figura 39, demostró tener un punto de consumo bajo en la curva real que no se esperaba, en la figura 41 de la zaranda, podremos comprobar el comportamiento de este consumo y validar la relación del consumo de la zaranda con la banda transportadora:

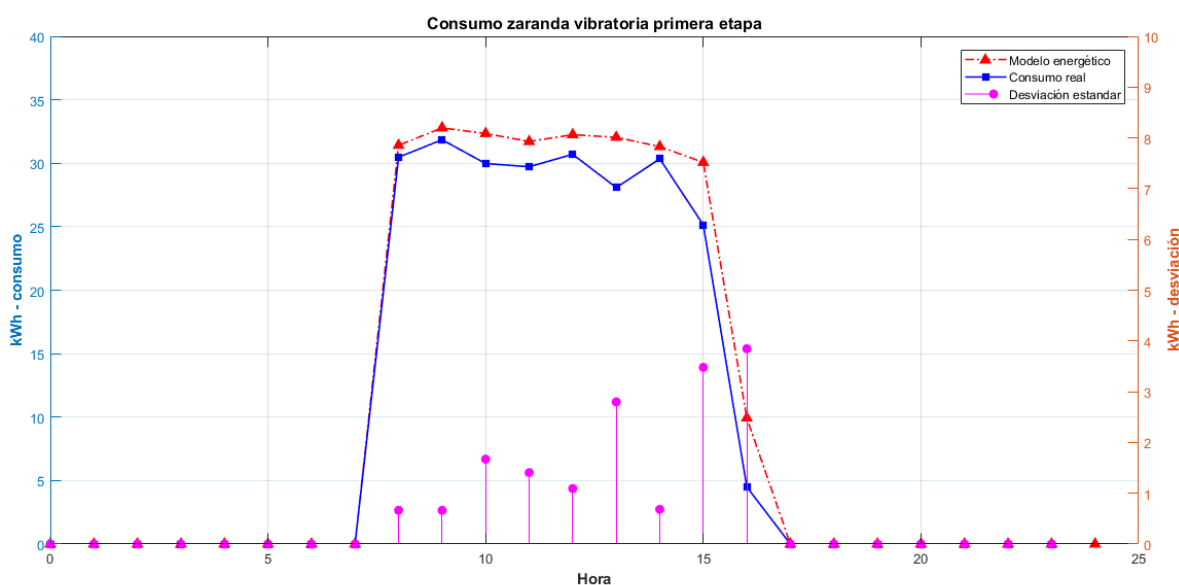


Figura 41. Comparativa de resultados del consumo energético de zaranda vibratoria del primer ciclo para jornada baja.

Así mismo, una aproximación a los valores puntuales de consumo energético de la zaranda en jornada baja se encuentra en la tabla 34:

Tabla 34. Comparativa de valores energéticos de la zaranda vibratoria del primer ciclo para jornada baja.

Concepto		Valores medición GRAVICON	Valores modelo matemático	Desviación estándar
<b>Energía consumida</b>		240,8 kWh	263,86 kWh	16,26 kWh
<b>Consumo pico</b>	Hora		9:00	
	Valor	31,85 kWh	32,79 kWh	0,66 kWh
<b>Consumo mínimo</b>	Hora		16:00	
	Valor	4,49 kWh	9,93 kWh	3,84 kWh

La zaranda vibratoria presenta una disminución en su consumo a las 13:00h al igual que en la banda transportadora, lo que muestra que no ha sido un error de medición en la banda sino un evento que ocurrió en la planta trituradora que no había sido reportada hasta el momento. Este es el único

## Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos

punto de desviación mayor a 2 kWh en las horas de operación nominal de la planta durante el 21 de junio.

En ambos casos, la zaranda vibratoria simulada en el modelo ha mostrado consumos por encima del consumo real medido cuando su operación no se encuentra en sus valores nominales. Es posible que las curvas de eficiencia que ha entregado Gravicon de la zaranda no correspondan al motor utilizado directamente en la zaranda.

Finalmente, la desviación estándar del consumo energético del día está en 16 kWh (similar a los 15 kWh del primer caso) y se mantiene, con un 7% de desviación, como la máquina eléctrica con mayor desviación porcentual en el consumo de energía de los equipos de la primera etapa de trituración.

### D. Consumo trituradora tipo cono segunda etapa:

En el primer caso de jornada continua en la figura 37, observamos que las mayores desviaciones del consumo energético de la trituradora se presentaban en los puntos de menor producción. En este caso, se usarán los datos de la jornada de baja producción para corroborar estos comportamientos como se muestra en la figura 42:

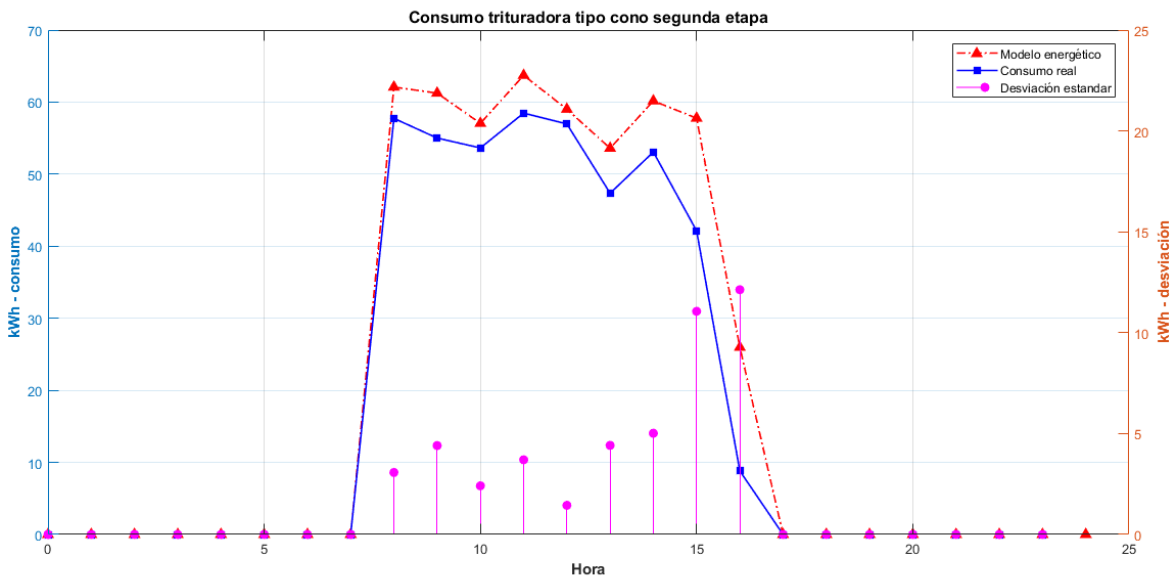


Figura 42. Comparativa de resultados del consumo energético de la trituradora tipo cono del segundo ciclo para jornada baja.

Así mismo, una aproximación a los valores puntuales de consumo energético de la trituradora tipo cono de la jornada baja se encuentra en la tabla 35:

## Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos

Tabla 35. Comparativa de valores energéticos de la trituradora tipo cono del segundo ciclo para jornada baja.

Concepto		Valores medición GRAVICON	Valores modelo matemático	Desviación estándar
<b>Energía consumida</b>		433,20 kWh	500,61 kWh	47,60 kWh
<b>Consumo pico</b>	Hora	11:00		
	Valor	58,47 kWh	63,70 kWh	3,70 kWh
<b>Consumo mínimo</b>	Hora	17:00		
	Valor	8,81 kWh	25,97 kWh	12,13 kWh

Al igual que en el primer caso, los consumos del modelo predictivo arrojan valores por encima del consumo real de la trituradora tipo cono cuando este no se encuentra operando en valores nominales.

En esta ocasión, el modelo vuelve a presentar un límite de consumo mínimo de 20 kW, aproximadamente un 25% de la capacidad nominal de la máquina, mientras que en los consumos reales, en esta ocasión llega hasta 8 kWh, por lo que las desviaciones estándar en valores de producción por debajo del 25% empiezan a alejarse del consumo de la trituradora.

Por otra parte, en ambos casos, el consumo energético de la trituradora de la segunda etapa tiene desviaciones estándar cercanas al 11%, el cuál tendría una influencia de hasta un 1% en el consumo total de la planta. En el siguiente caso del consumo total de la planta, se podrá analizar el consumo en conjunto de las diferentes etapas, según los eventos de ambos casos.

### **E. Consumo total de la planta Cañaverál:**

La planta Cañaverál, en este segundo caso, presenta menos horas de operación, las mayores diferencias en la simulación anterior se presentaron en las horas de menor consumo.

En esta ocasión, se presenta un día con solamente una hora de cierre y siete horas de operación nominal. El comportamiento final de las dos curvas de consumo se encuentra en la figura 43:

## Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos

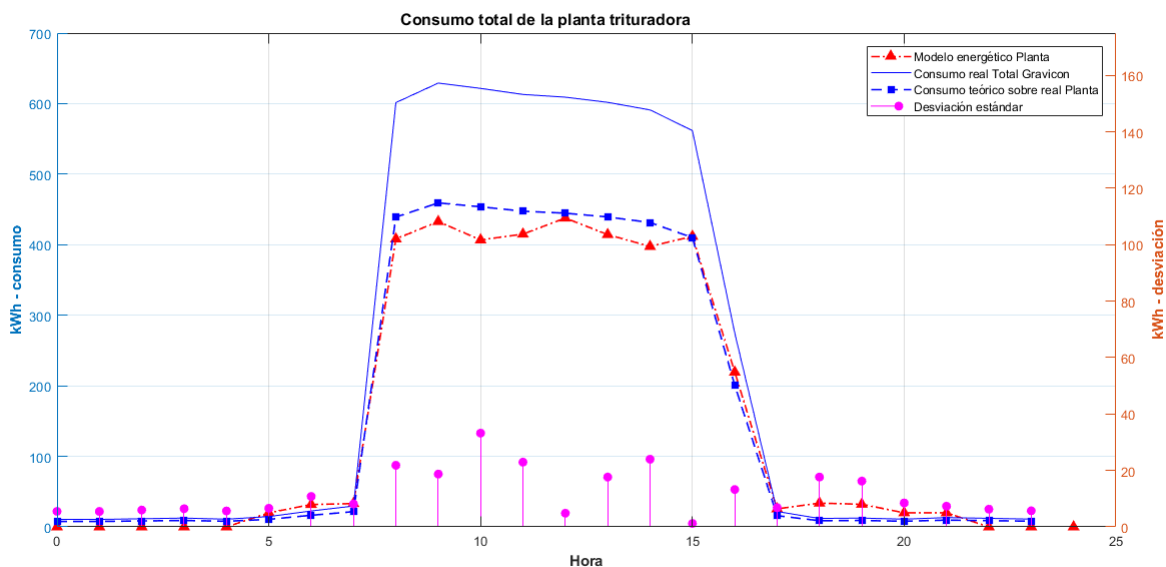


Figura 43. Comparativa de resultados del consumo energético de la planta Cañaverál para jornada baja.

Así mismo, una aproximación a los valores puntuales de consumo energético de la planta Cañaverál en jornada baja se encuentra en la tabla 36:

Tabla 36. Comparativa de valores energéticos de la planta Cañaverál para jornada baja.

Concepto		Valores medición GRAVICON	Valores modelo matemático	Desviación estándar
<b>Energía consumida</b>		3883 kWh	3759 kWh	87,68 kWh
<b>Consumo pico</b>	Hora	9:00		
	Valor	459,24 kWh	432,77 kWh	18,71 kWh
<b>Consumo mínimo</b>	Hora	17:00		
	Valor	200,62 kWh	219,35 kWh	13,24 kWh

Al igual que en el primer caso de simulación, los consumos simulados por el modelo en horas de producción tienden a tener una desviación del consumo de un 5% en promedio por debajo del consumo real de la planta. Este comportamiento se encuentra relacionado con los consumos de las bandas transportadoras y la trituradora de mandíbula, las cuales representan la mayoría de la carga energética de la planta, que presentan siempre consumos iguales o inferiores en la simulación del modelo que al consumo real.

Por otra parte, existen elementos de talleres de mantenimiento y oficinas que no se encuentran asociados en el modelo pero que representan cargas menores dentro de la planta y que pueden elevar el consumo respecto a los valores del modelo predictivo.

Como resultado de este análisis, es muy importante la validación de los datos de entrada al modelo que coincidan con las condiciones de operación de la planta, para asegurarse que sus resultados coincidan con la mayor precisión durante las tres etapas.

## Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos

### 4.2.3.3. Resumen de las simulaciones de consumo energético del modelo de predicción

A continuación, en la tabla 37 se presenta el resumen de las simulaciones energéticas y las diferencias principales que se encontraron entre los resultados de las simulaciones del modelo predictivo respecto al consumo real de cada uno de los equipos monitoreados y del total de la planta Cañaveral.

Tabla 37. Resumen de las simulaciones energéticas y su comparación con los consumos reales

Tipo de jornada	Consumo diario real	Consumo del modelo	Desviación de consumo diario		Máxima desviación durante el día		
			kWh	%*	kWh	%*	Hora
<b>Planta de trituración Cañaveral</b>							
<b>Jornada continua</b>	4575 kWh	4567 kWh	<b>5,65 kWh</b>	<b>0,12%</b>	41,61 kWh	23,39%	16:00
<b>Jornada baja</b>	3883 kWh	3759 kWh	<b>87,6 kWh</b>	<b>2,25%</b>	33,22 kWh	7,32%	10:00
<b>Banda transportadora principal</b>							
<b>Jornada continua</b>	134 kWh	143,8 kWh	<b>6,43 kWh</b>	<b>4,79%</b>	1,44 kWh	49,0%	17:00
<b>Jornada baja</b>	115,4 kWh	115,85 kWh	<b>0,31 kWh</b>	<b>0,26%</b>	1,52 kWh	45,6%	16:00
<b>Trituradora de mandíbula primera etapa</b>							
<b>Jornada continua</b>	1148 kWh	1090 kWh	<b>41,02 kWh</b>	<b>3,57%</b>	24,56 kWh	26,4%	16:00
<b>Jornada baja</b>	926 kWh	866 kWh	42,42 kWh	<b>4,58%</b>	7,81 kWh	6,87%	10:00
<b>Zaranda vibratoria primera etapa</b>							
<b>Jornada continua</b>	312 kWh	334 kWh	<b>15,55 kWh</b>	<b>4,98%</b>	4,83 kWh	59,9%	16:00
<b>Jornada baja</b>	240,8 kWh	263,86 kWh	<b>16,26 kWh</b>	<b>6,75%</b>	3,84 kWh	85,6%	16:00
<b>Trituradora tipo cono segunda etapa</b>							
<b>Jornada continua</b>	535,8 kWh	616,2 kWh	<b>57,27 kWh</b>	<b>10,68%</b>	13,21 kWh	34,3%	14:00
<b>Jornada baja</b>	433,20 kWh	500,61 kWh	47,60 kWh	<b>10,97%</b>	12,45 kWh	141%	16:00

\* Valor porcentual de la desviación estándar sobre el consumo real.

Cada una de las máquinas eléctricas que se utilizaron para la comparación de los resultados del modelo energético con los consumos reales de la planta Cañaveral en Gravicon han presentado características particulares que se han de tener en cuenta en el momento de utilizar el modelo de predicción energética en MatLab para conocer los consumos de una planta de fabricación de áridos.



## **Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos**

---

El modelo ha presentado, en el consumo energético total de la planta para los dos días simulados, resultados con una desviación que no supera el 3% respecto al consumo real. A partir de estos resultados, se puede confirmar que el modelo matemático puede considerarse confiable para conocer los consumos totales de un proceso de producción de áridos.

Por otra parte, el modelo tanto de la planta en su totalidad como de cada una de las máquinas eléctricas ha demostrado mejor precisión en las predicciones de consumo cuando la planta se encuentra operando cerca de su capacidad nominal. Cuando la planta empezaba a finalizar su producción diaria, se observaban las mayores desviaciones del consumo del modelo en ambas simulaciones. Esto puede asociarse a la operación estable que tienen los motores cerca de sus puntos de operación nominal, donde la eficiencia eléctrica del motor es estable y las pérdidas mecánicas y ambientales reducen su peso. Por otra parte, en punto de operación por debajo del 50%, los motores llegan al punto de máxima pendiente de su curva de eficiencia eléctrica, por lo que pueden presentar cambios fuertes en la potencia consumida con pequeñas variaciones del par requerido por la máquina.

Este factor se puede reducir ingresando en el modelo más puntos de la curva de eficiencia de los motores. Entre más puntos el modelo tenga para comparar sus valores, mejor será la predicción de eficiencia y, por ende, del consumo energético de los motores en cualquiera de sus puntos de operación.

En un caso real de consumo energético de una planta industrial, pueden existir distintos factores tanto internos como externos que puedan alterar los valores de consumo de las máquinas respecto al esperado por el modelo y que no pueden ser previstos por el modelo o resaltados por los operadores de la planta, como rutinas de mantenimiento, condiciones ambientales (lluvias, viento) o desgaste de piezas en los equipos.

Teniendo en cuenta las curvas de producción de los días simulados, se puede afirmar que los resultados del modelo para cada una de las cargas, y en especial para la planta en su totalidad, cumplen con el comportamiento esperado teniendo en cuenta la operación de las máquinas descritas en la sección 2.4.

Finalmente, se ha confirmado con estas simulaciones que las curvas resultantes de la predicción del modelo para las máquinas que se encuentran en la segunda y tercera etapa de trituración pierden precisión, aunque sus consumos se mantienen en un rango de predicción útil para el usuario. Esto se debe al nivel de precisión de los valores aleatorios del tamaño de las rocas que ingresan a la planta.

Al igual que las curvas de eficiencia de los motores, si se tienen más puntos de la curva característica de distribución del material de entrada por tamaño, van a mejorar las curvas de predicción de las máquinas en estas dos etapas.

## Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos

### 4.3. USO DEL MODELO ENERGÉTICO PARA RECOMENDACIONES ENERGÉTICAS CON UN CASO DE PRODUCCIÓN

Una vez que el modelo ha sido validado con los consumos reales de la planta Cañaveral de Gravicon, se conocen los puntos de mayor valor y precisión del modelo de predicción energética. Con el conocimiento adquirido de estas capacidades de predicción que tiene el modelo, se plantearán simulaciones de casos puntuales de operación que puede tener una planta de fabricación de áridos, en la que se use previamente el modelo para comparar opciones de producción que den como resultado las rutinas de producción más eficientes de la planta desde un punto de vista energético.

#### 4.3.1. Aplicación I - Velocidades variables en las bandas transportadoras

Como se observaba en la sección 3.3.3.3. del presente informe, una de las variables de mayor peso respecto al consumo de energía de una banda transportadora, es la velocidad de operación de dicha planta.

En un caso real, es difícil determinar las variaciones de velocidad de las bandas transportadoras cómo pueden afectar positiva o negativamente el consumo de energía de una planta de agregados pétreos, no solamente directamente en la operación de las bandas transportadoras, sino en el flujo de suministro de material a cada una de las demás máquinas eléctricas en el proceso de trituración y distribución.

Como observamos en la sección 4.2.3., el consumo energético de las zarandas vibratorias se encuentra ligado de forma proporcional a las velocidades de suministro de las bandas transportadoras que los alimentaban. A continuación, mostraremos la operación de una planta de áridos con características idénticas de configuración y operación, variando únicamente la velocidad de las bandas transportadoras:

1. **Caso 1:** bandas transportadoras sin variador de velocidad, la velocidad es constante al valor nominal del motor.
2. **Caso 2:** bandas transportadoras con un variador de velocidad, todas las bandas transportadoras van a variar en relación con el nivel de producción de la planta.

##### 4.3.1.1. Variables de entrada del modelo

Para este ejercicio, se utilizará una planta de fabricación de áridos de dos etapas con las siguientes características:

Tabla 38. Características de operación de la planta - simulación aplicación I.

	Etapa 1	Etapa 2
<b>Configuración de la planta</b>	Tipo abierto	
<b>Horario de operación</b>	8:00 – 17:00	
<b>Tamaño máx. piedra inicial</b>	1000 mm	
<b>Equipos de trituración</b>	Trituradora tipo cono	Molino de bolas
<b>Relación de trituración</b>	9:1	20:1
<b>No. Bandas transportadoras</b>	4 bandas transportadoras	5 bandas transportadoras

## Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos

Las características de altura y temperatura han sido simuladas de forma aleatoria, teniendo el mismo valor ambiental para ambos casos.

La figura 44 muestra la producción de la planta por horas, mientras que la figura 45 muestra la velocidad de operación de la planta para ambos casos.



Figura 44. Producción de material para la simulación de las aplicaciones I y II.

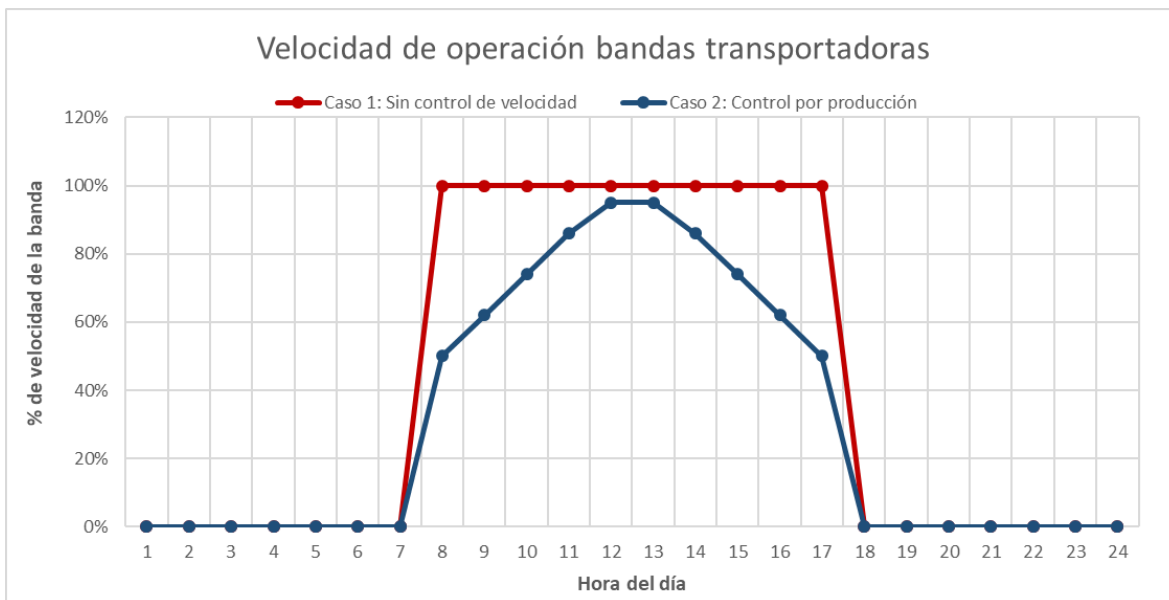


Figura 45. Velocidad de operación de las bandas transportadoras - Simulación aplicación I.

# Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos

## 4.3.1.2. Resultados de simulaciones del modelo

Ambos modelos se simularon con la única variación de la velocidad descrita en la sección anterior, a continuación, se realizará un análisis del comportamiento de la planta en general y de las principales máquinas involucradas en este cambio:

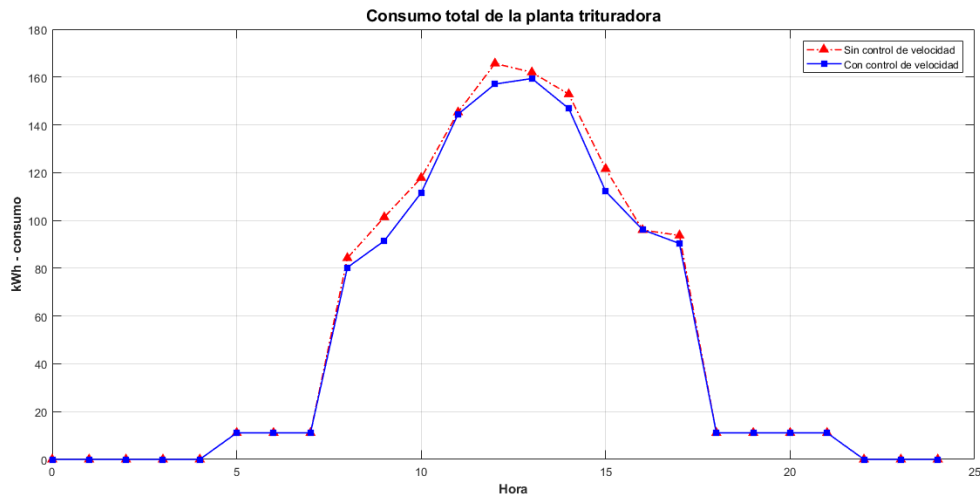


Figura 46. Resultado consumo energético planta total - simulación aplicación I.

Como se muestra en la figura 46, en el caso en el que la planta de áridos no cuenta con un sistema de control de velocidad, la curva de consumo energético de la planta tiene un comportamiento con una proporción directa únicamente al cambio de producción. Por otra parte, en el caso de que la planta cuenta con un sistema de control de velocidad, la planta tiene mayor flexibilidad de ajustar su consumo de energía dependiendo del punto de operación en el que se encuentre la máquina, la curva de consumo de energía puede amortizar los cambios de producción en curvas más eficientes especialmente en horas de bajo consumo.

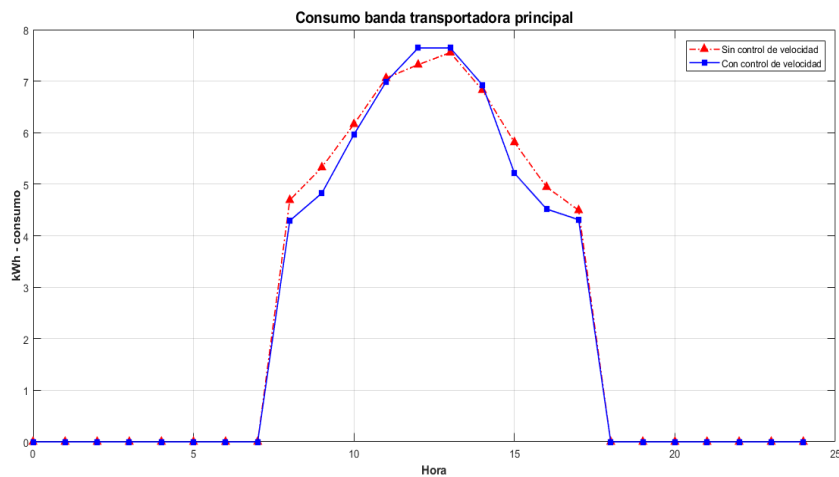


Figura 47. Resultado de consumo energético de banda transportadora principal – simulación aplicación I.

## Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos

De las diferentes máquinas de esta planta simulada, las curvas que más impacto tienen en sus curvas de crecimiento de consumo de energía son las bandas transportadoras, quienes tienen el impacto directo por el cambio de velocidad.

Las curvas confirman el comportamiento observado de la planta total en la figura 46, confirmando la importancia que tienen las bandas transportadoras en el consumo total de la planta al ser una gran cantidad de estos equipos que operan en la distribución del material.

Cuando la planta tiene baja producción de material, los operadores tienen mayor flexibilidad para programar la velocidad de operación de las bandas. En este caso, se observa que un buen control de velocidad evita incrementos de consumo de energía proporcionales al consumo de energía, optimizando el uso del recurso energético con las mismas condiciones de operación.

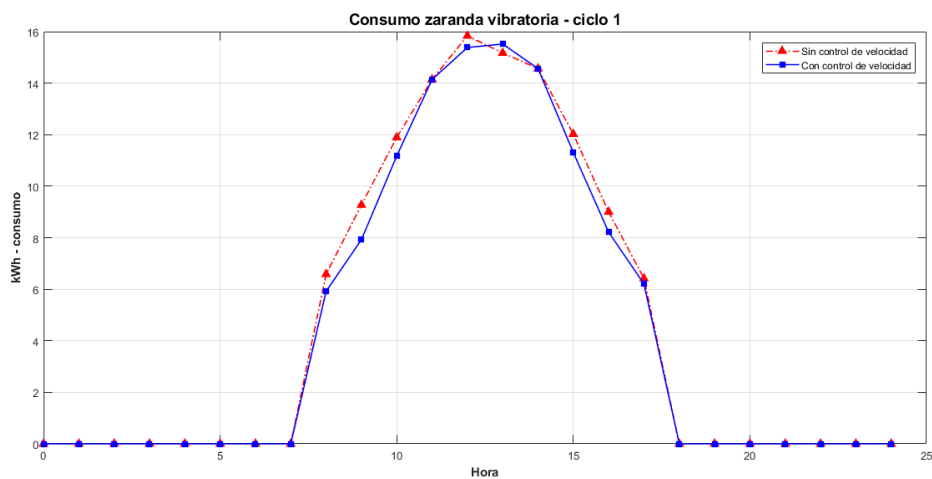


Figura 48. Resultados de consumo energético de la zaranda vibratoria del ciclo 1 - Simulación aplicación I.

Al igual que en los casos de validación del modelo, las zarandas vibratorias muestran proporcionalidad a la velocidad de las bandas transportadoras que las alimentan. Una mejor distribución del material pétreo que entra al equipo con velocidades controladas permite una mejor distribución del material evitando esfuerzos mecánicos puntuales y mejorando sus relaciones de consumo.

## Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos

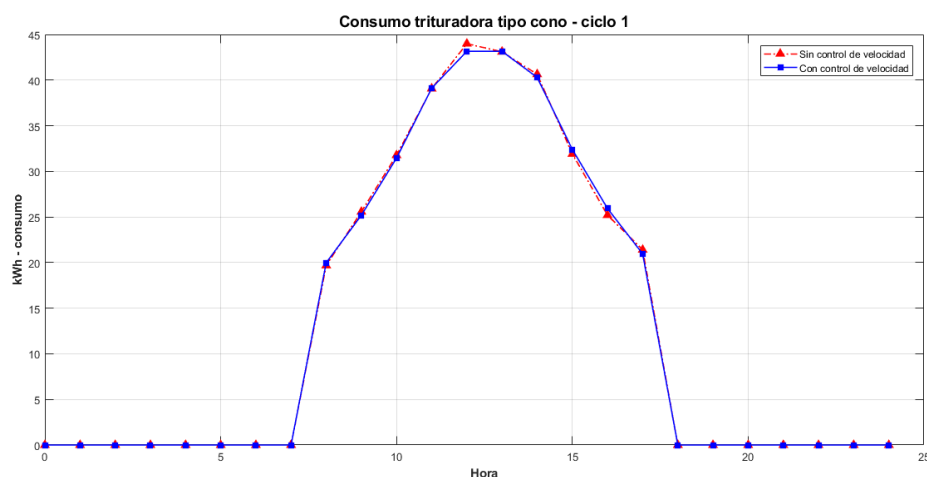


Figura 49. Resultados de consumo energético de la trituradora del ciclo 1 - Simulación aplicación I.

En este último caso, podemos confirmar la independencia del consumo energético de las máquinas trituradoras respecto al factor de velocidad de las bandas transportadoras. El factor determinante en estas máquinas, como se observó en la sección 3.3.3.1., es el tamaño de entrada del material y su relación de trituración, valores que no cambian durante la operación de la planta en estas dos condiciones. Las variaciones observadas en este caso se deben únicamente a los valores aleatorios de tamaño del material pétreo.

Tabla 39. Resumen resultados de consumos energéticos - Simulación aplicación I.

Máquina eléctrica	Consumo energético Caso 1 (kWh)	Caso energético Caso 2 (kWh)	Ahorro de energía diaria % Ahorro de energía diaria	
			kWh	%
<b>Banda transportadora principal</b>	60,19	57,92	2,26	3,87%
<b>Zaranda vibratoria ciclo 1</b>	114,90	110,35	4,55	3,96%
<b>Trituradora tipo cono ciclo 1</b>	322,31	321,60	0,70	0,22%
<b>Total de consumo de la planta</b>	1318,29	1269,48	<b>48,81</b>	<b>3,70%</b>

En este caso, se observa en la tabla 39 un ahorro proporcional entre las bandas transportadoras, la zaranda vibratoria y el consumo total de una planta de fabricación de áridos.

El modelo ha permitido conocer, a partir de las características particulares de una planta, el ahorro de energía al implementar una medida o recomendación de mejora energética directa para la planta.

Este valor de ahorro de hasta 50 kWh para el usuario del modelo, le permitiría hacer un estudio energético y económico de la reducción del consumo de energía a partir de las inversiones que requiera para un sistema de variadores de frecuencia para su sistema de bandas transportadoras.

### **4.3.2. Aplicación II - Cambios en las relaciones de trituración por etapas**

En las plantas de ciclo abierto se obtiene un material por cada etapa de trituración, en estos casos la relación de trituración de cada etapa de trituración es independiente de las demás etapas y dependerá de los productos áridos esperados.

Pero en las plantas de ciclo cerrado se obtiene un único producto final a través de las etapas de trituración, en el caso de las plantas con 2 o 3 etapas de trituración, se instalan y configuran las relaciones de los equipos de trituración para que logren obtener el material final esperado. En la mayoría de casos se conoce que la última etapa de trituración suele tener un mayor porcentaje de trabajo, debido a que es la única trituradora que está obligada a triturar el 100% del material que no cumpla con el tamaño final deseado, tal como se puede analizar en la figura 3 del presente trabajo. Entre los diferentes factores que existen para determinar la relación de trituración de estos equipos, el menor consumo de energía es uno de los factores más importantes de decisión.

Con el modelo de predicción energética se realizará el ejercicio de estimar qué configuración de trituración presenta mejores consumos energéticos:

1. Caso 1: Instalación y configuración de 3 máquinas trituradoras con relaciones de trituración similares en las 3 etapas.
2. Caso 2: Instalación y configuración de 3 máquinas trituradoras con relación de trituración alta en las etapas 1 y 2, para reducir el consumo de la etapa 3.

#### **4.3.2.1. Variables de entrada del modelo**

Para esta aplicación, se simulará una planta de tres etapas de ciclo cerrado, la cual utilizará las mismas curvas de producción de grava para la planta de la figura 44 en la sección 4.3.1.1.. Las características de configuración de la planta son:

## Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos

Tabla 40. Características de operación de la planta - Simulación aplicación II.

	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3
<b>Configuración de la planta</b>	Tipo cerrado		
<b>Horario de operación</b>	8:00 – 17:00		
<b>Tamaño máx. piedra inicial</b>	1600 mm		
<b>Equipos de trituración</b>	Trituradora de mandíbula	Trituradora tipo cono	Trituradora tipo cono
<b>Control de velocidad bandas</b>	Velocidad nominal de los equipos (200%)		
<b>No. Bandas transportadoras</b>	3 bandas transportadoras	3 bandas transportadoras	5 bandas transportadoras

Se han escogido estas máquinas trituradoras en cada etapa por la similitud de su operación, con el fin de considerar que el tipo de máquina en cada punto de altere esta simulación.

Por otra parte, la tabla 41 muestra las dos configuraciones de relación de trituración que se van a utilizar en las trituradoras y el tamaño del filtro de las zarandas vibratorias:

Tabla 41. Relaciones de trituración y tamaños de filtro - Simulación aplicación II.

		Entrada	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3
<b>Caso 1</b>	Relación de trituración	-	16:1	14:1	13:1
	Tamaño de filtro (mm)	200	100	40	20
<b>Caso 2</b>	Relación de trituración	-	20:1	20:1	13:1
	Tamaño de filtro	100	50	30	20

Las características de altura y temperatura han sido simuladas de forma aleatoria, teniendo el mismo valor ambiental para ambos casos.



# Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos

## 4.3.2.2. Resultados de simulaciones del modelo

Ambos modelos se simularon con la única variación de la relación de trituración de las máquinas trituradoras y el tamaño del tamiz de las zarandas vibratorias, a continuación, se realizará un análisis del comportamiento de la planta en general y de las principales máquinas involucradas en este cambio:



Figura 50. Resultados del consumo energético de la trituradora del primer ciclo - Simulación aplicación II.

El primer factor a tener en cuenta de estas simulaciones son los valores aleatorios del tamaño del material, por lo cual, los cambios de consumo no son directamente proporcionales al cambio en la relación de trituración durante cada hora, sino que a lo largo del día debe demostrar un comportamiento con consumo y picos de potencia más elevados, como se evidencia en la figura 50.



Figura 51. Resultados del consumo energético de la trituradora del segundo ciclo - Simulación aplicación II.

La segunda trituradora ha mostrado un comportamiento equilibrado en el consumo energético de los dos casos; a pesar de que su relación de trituración incrementó, el material que está llegando a esta trituradora es más pequeño, debido al nuevo tamaño de la zaranda del ciclo 1, y la nueva

## Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos

relación de trituración del triturador de la etapa anterior. Sus consumos siguen siendo lo mismo, aún mientras entrega material de menor tamaño a la zaranda vibratoria de esta segunda etapa.

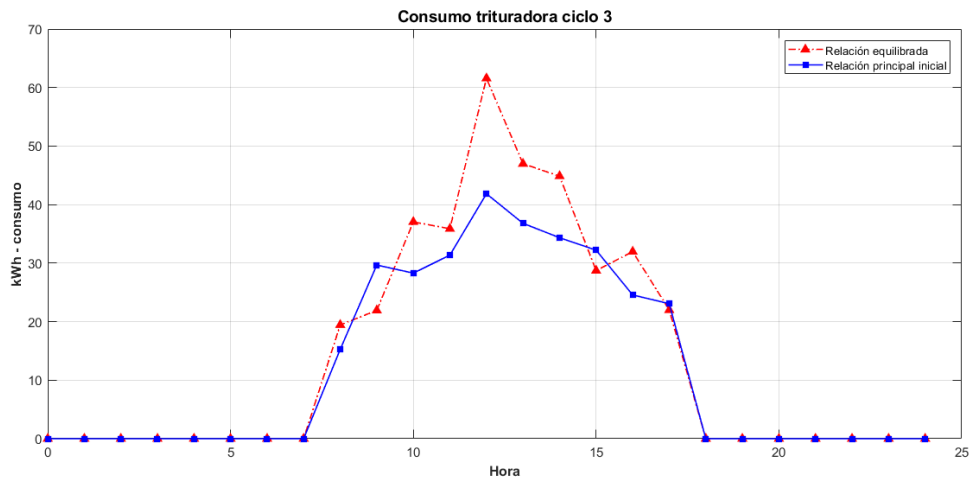


Figura 52. Resultados del consumo energético de la trituradora del tercer ciclo - Simulación aplicación II.

El objetivo del segundo caso de simulación era liberar de carga a la máquina trituradora de la tercera etapa. Al ser la única trituradora que debe garantizar el 100% de reducción del tamaño del material, el paso de material por este equipo es superior a los dos anteriores. En la figura 52 se demuestra que, al aumentar el trabajo de trituración de las dos máquinas de las etapas 1 y 2, la reducción en el consumo energético de la tercera etapa se hace evidente.

Finalmente, se debe considerar que todas las demás máquinas eléctricas que se conectan con estas trituradoras (bandas transportadoras y zarandas vibratorias) se ven afectadas por el tamaño y la cantidad de material que está pasando por cada etapa. Se considera que el cambio que ocurre en todos los equipos de cada etapa es proporcional al cambio del consumo de su máquina trituradora.

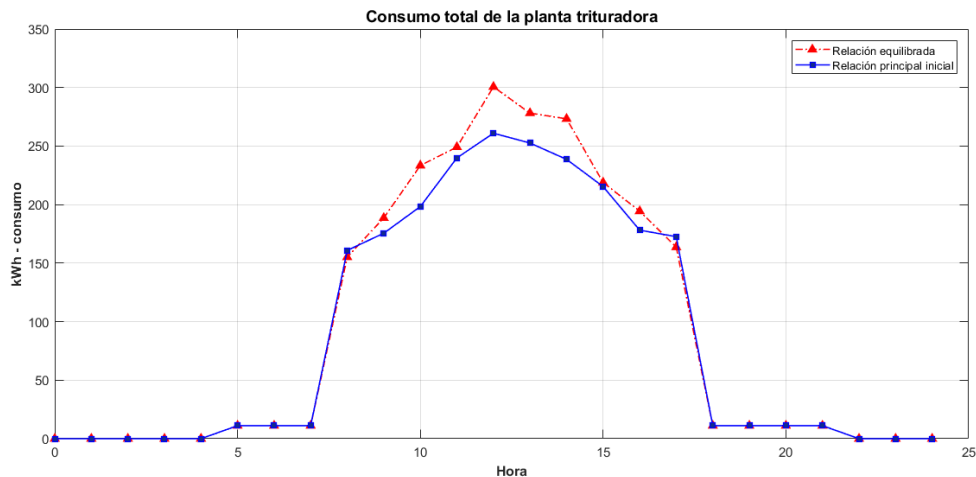


Figura 53. Resultados del consumo energético total de la planta - Simulación aplicación II.

## Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos

La figura 53, ha mostrado, gracias al modelo de predicción energética de la planta que, con una configuración del segundo caso, en el que la tercera etapa tiene una relación de trituración menor, sus consumos pueden disminuir significativamente.

Tabla 42. Resumen de resultados de la simulación aplicación II.

Máquina eléctrica	Consumo energético Caso 1 (kWh)	Caso energético Caso 2 (kWh)	Ahorro de energía diaria % Ahorro de energía diaria	
			kWh	%
<b>Trituradora ciclo 1</b>	335,96	343,62	-7,65	-2,28%
<b>Trituradora ciclo 2</b>	296,56	259,71	36,86	12,43%
<b>Trituradora ciclo 3</b>	350,38	297,41	52,97	15,12%
<b>Total de consumo de la planta</b>	2332,97	2170,73	<b>162,24</b>	<b>6,95%</b>

El modelo de predicción de energía permite, con información como la de la tabla 42, dar información al usuario acerca de las diferencias en el consumo de energía que va a tener dependiendo de los equipos de trituración que instale y sus relaciones de trituración en los que los configure, obteniendo el mismo producto final.

En usos como el de esta sección, el modelo va a permitir hacer ejercicios de optimización energética desde la etapa de planeación de este tipo de industrias.

### 4.4. RESUMEN DEL CAPÍTULO

Como se ha visto a lo largo de la sección 4.3., el modelo energético se puede aplicar en diferentes etapas de decisión de una planta, desde decisiones inmediatas de operación hasta en etapas de planeación o estudios económicos para viabilidades de implementación. A continuación, en la tabla 43 el autor del presente trabajo ha realizado un listado de algunas de las aplicaciones para las cuales podría ser utilizado el modelo energético con base en los resultados que entrega:

## Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos

Tabla 43. Aplicaciones del modelo predictivo de energía para plantas de fabricación de áridos.

Tipo de aplicación	Aplicaciones del modelo de predicción energética
Aplicaciones en planeación a largo plazo	Comparación de tecnologías en el estudio adquisición de equipos
	Análisis de consumos de reactivas para compensación de estas cargas
	Clasificación de indicadores de consumo energético según el tipo de producto final obtenido para plantas de ciclo abierto
Aplicaciones operativas de corto plazo	Planeación de producción horaria con base en beneficios económicos por el precio de la energía por horas
	Detección de cambios en los consumos por condiciones ambientales como indicador de productividad
	Detección de oportunidades de ahorro energético con rutinas de uso de los equipos
	Detección de puntos de consumo inconsistente – comparativa de consumo teórico respecto a mediciones de consumo real para encontrar fallas operativas.

## **CAPÍTULO 5. RESUMEN Y CONCLUSIONES**

### **5.1. CONCLUSIONES**

El presente trabajo tenía como objetivo el desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo de energía para plantas industriales de producción de áridos. Además, pretendía realizar una simulación de este modelo en un software matemático para su aplicación en casos reales de este tipo de plantas. A partir de los primeros pasos en el levantamiento de información sobre las características de operación de este tipo de plantas, se ha encontrado múltiples configuraciones que puede tener una planta de fabricación de áridos a partir de conceptos como: el tipo de trituración que se va a realizar según el material de entrada, la configuración de ciclo abierto o cerrado según los requisitos del material de salida, el número de ciclos según la relación de reducción de tamaño esperada y la elección de distintos tipos de máquinas trituradoras para tales fines. Todos estos factores en la configuración de una planta de agregados pétreos han generado múltiples configuraciones para el modelo, por lo que se han asumido conceptos básicos que no afectan la simulación de este tipo de plantas, como se ha explicado en la sección 3.4. del presente trabajo, con el fin de crear un software de simulación más sencillo de utilizar para el usuario.

El modelo ha sido utilizado para modelizar una instalación real de una planta de fabricación de áridos en Colombia y se han contrastado los valores obtenidos del modelo con los consumos reales de la operación de esta planta, como se muestra durante la sección 4.2.. Como resultado, el modelo de predicción energética ha obtenido resultados de máximo 2,25% de desviación estándar en el consumo diario de energía que el modelo predice respecto a los consumos reales de la planta estudiada. El nivel de precisión de la predicción energética del modelo es el resultado de incluir factores del comportamiento de eficiencia y pérdidas eléctricas de las máquinas, a diferencia de los modelos encontrados durante la sección 3.3.2., al igual que los factores ambientales de la ubicación y condiciones climáticas en los que se encuentra operando la planta.

El principal aporte de este trabajo ha sido lograr la integración de las diferentes máquinas que participan en distintas plantas de fabricación de áridos, diferentes estudios y bibliografías previas a este trabajo habían abordado la operación de cada máquina y su relación energética de manera individual, mientras que actualmente, al finalizar este trabajo, se cuenta con una herramienta que relaciona todas las variables de las diferentes máquinas de una planta según su forma de conexión, configuración y operación, evitando cálculos individuales por cada equipo, en los que no se tenía claridad sobre los valores de entrada para cada punto. Actualmente los diferentes modelos matemáticos que existen de manera individual para cada equipo se han logrado integrar para brindar una herramienta a los operarios de una planta de fabricación de áridos, en la que no tengan que realizar múltiples cálculos matemáticos para conocer el comportamiento energético de toda su fábrica a partir de datos básicos de sus equipos y sus rutinas de operación.

Por otra parte, la experiencia de utilizar el modelo ha dado como una de las observaciones más importantes el número de datos de entrada que este requiere. De esta manera, el modelo puede tener clasificarse en dos formas de uso:

## **Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos**

---

- Para los usuarios industriales que van a usar el modelo de forma continua para múltiples aplicaciones, se recomienda llenar todos los datos detallados de cada máquina la primera vez y con la mayor cantidad de datos en tablas y curvas, con el fin obtener resultados más confiables respecto a las simulaciones que quiera realizar; un gran porcentaje de los datos de entrada es información de fábrica de los equipos que no requieren modificarse a partir de la primera programación.
- Para los usuarios del programa de un solo uso, se ha configurado el modelo de predicción de tal manera que pueda utilizar datos generales para varios equipos, o reproducir información de alguna máquina particular en otras con configuraciones similares. Esto disminuye la precisión del consumo energético entregado por el modelo, pero puede ser utilizado para estudios generales de comportamiento que no requieran valores de alta confiabilidad.

Dentro de los resultados de predicción del modelo, se ha encontrado que los rangos de operación con baja producción, tanto la operación real del motor como las variables de simulación del modelo pueden variar en un mayor rango, las fuertes variaciones en la eficiencia de un motor en pequeños cambios de carga cuando se encuentran por debajo del 50% de su operación nominal son factores que vuelven complejo su comportamiento energético, como se puede observar en el capítulo 3.3.2.2. del presente informe. Por otra parte, el modelo ha demostrado que el consumo energético total de cada equipo y de la planta en su totalidad, no se ve afectado por las operaciones bajas de las máquinas.

Finalmente, después de realizar las primeras pruebas de utilización del modelo de predicción energética en un cliente comercial, se ha llegado a la conclusión que se ha creado una herramienta de predicción energética para un sector industrial importante, a nivel de Colombia y del mundo, que puede ser utilizado por cualquier usuario que cuente con los datos suficientes de sus equipos eléctricos en este tipo de plantas. A pesar de que el modelo no entrega directamente recomendaciones energéticas, este permite realizar de forma fácil y confiable, comparativas entre diferentes opciones de operación o configuración de estas plantas, en las que se puedan evidenciar y cuantificar los ahorros o mejoras energéticas sin necesidad de hacer inversiones de tiempo y dinero previos a implementar estas medidas de ahorro.

### **5.2. TRABAJOS FUTUROS**

Este modelo predictivo desarrolla actualmente predicciones y análisis del comportamiento de plantas de fabricación de áridos desde un punto de vista únicamente energético únicamente. Con las opciones ofrecidas por MatLab y con una investigación adicional, se puede incluir un factor económico o ambiental al modelo que permitan no solo conocer los consumos energéticos, sino optimizar los costes de este consumo por horarios de uso, desgaste de las máquinas y demás factores que se puedan considerar determinantes en el momento de tomar la decisión de cuáles rutinas de producción son óptimas desde un punto de vista energético y económico.

## **Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos**

---

Así mismo, este modelo ha sido desarrollado con base en el mercado energético colombiano, el cual no cuenta con diferencias de tarifas horarias (es la misma tarifa energética sin importar la hora del día en la que se consume la energía), el acceso del modelo no solo a los consumos energéticos totales de las plantas, sino a las curvas de comportamiento de este consumo, puede permitir en futuros estudios, vincular al modelo análisis de consumos en horarios valle y pico, además de la reducción de consumos pico como gestión de demanda.

Finalmente, el modelo queda abierto a integrar nuevas máquinas trituradoras, hidrociclones o cualquier otra máquina eléctrica que sea utilizada en estas plantas de agregados pétreos para cubrir más usuarios que puedan utilizar este modelo.

## **BIBLIOGRAFÍA**

- [1] U. de P. M. E. de Colombia, “Boletín Estadístico de Minas y energía 2012 – 2016,” 2016.
- [2] U. de P. M. E. de Colombia, “PROYECCIÓN DE DEMANDA DE ENERGÍA ELÉCTRICA Y POTENCIA MÁXIMA EN COLOMBIA,” vol. Revisión d, 2018.
- [3] Ministerio de Minas y Energía de Colombia, “Explotación de materiales de construcción: Canteras y material de arrastre,” *Minist. Minas y Energ.*, p. 56, 2013.
- [4] G. empresarial Argos, “Modelo de gestión energética 2014-2017,” pp. 2–5, 2017.
- [5] C. Pollution and C. Board, “Comprehensive Industry Document Stone Crushers Central Pollution Control Board Parivesh Bhawan East Arjun Nagar, Shahdara Delhi-110 032 www.cpcb.nic.in,” no. February, 2009.
- [6] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, “NTC - ISO 50001,” no. 571, 2012.
- [7] Instituto Nacional de Vías de Colombia, “Normas de ensayo para materiales de carreteras. Sección 100,” *Normas y Especificaciones 2012 Invias*, p. 798, 2013.
- [8] Ministerio de Minas y Energía de Colombia, “RETIE: Reglamento técnico de instalaciones eléctricas,” *Resoluc. 90708*, pp. 1–211, 2013.
- [9] Ministerio de Minas y Energía de Colombia, “Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado RETILAP,” p. 229, 2010.
- [10] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, “Código Eléctrico Colombiano: NTC 2050,” *Código Eléctrico Colomb.*, p. 847, 1998.
- [11] METSO, “Basics in Minerals Processing Handbook.” p. 334, 2018.
- [12] D. F. Olguin de la Mora and F. Monroy Miranda, “Proceso de Producción de Agregados Pétreos y su Control de Calidad,” 2016.
- [13] M. O. Fernández Pérez, “Metodología para la determinación indirecta del índice de Bond en tamaños de partícula ultrafinos,” Universidad de Oviedo, 2012.
- [14] A. Gupta and D. Yan, “Size Reduction and Energy Requirement,” in *Mineral Processing Design and Operations*, 2016, pp. 71–121.
- [15] W. J. Lau and A. Pérez de los Ríos, “Disintegration, Agglomeration, and Size Separation of Particulate Solids,” in *Chemical Process Equipment*, vol. 41, no. 2, Elsevier, 2005, pp. 359–395.
- [16] M. Johansson, M. Bengtsson, M. Evertsson, and E. Hulthén, “A fundamental model of an industrial-scale jaw crusher,” *Miner. Eng.*, vol. 105, pp. 69–78, 2017.
- [17] A. Gupta and D. Yan, “Jaw Crusher,” in *Mineral Processing Design and Operation*, 2016, pp. 99–127.



## Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos

---

- [18] A. Gupta and D. Yan, "Tubular Ball Mills," in *Mineral Processing Design and Operation*, 2016, pp. 161–211.
- [19] A. Gupta and D. Yan, "Gyratory and Cone Crusher," *Miner. Process. Des. Oper. - 2nd Ed.*, pp. 128–141, 2016.
- [20] A. Gupta and D. Yan, "Screening," in *Mineral Processing Design and Operations - 2nd Edition*, 2016, pp. 357–419.
- [21] J. Yan, C. Liu, L. Zhao, and J. Li, "Parameters Optimum Design for Linear Vibrating Screen," in *2010 International Conference on Computational and Information Sciences*, 2010, pp. 413–415.
- [22] Q. He, D. Dong, Z. He, and D. Du, "Analytical model between power and idler spacing of belt conveyor," *ICCMS 2010 - 2010 International Conference on Computer Modeling and Simulation*, vol. 3. pp. 8–10, 2010.
- [23] N. B. R. Monteiro and E. A. da Silva, "Environmental licensing in Brazilian's crushed stone industries," *Environ. Impact Assess. Rev.*, vol. 71, pp. 49–59, Jul. 2018.
- [24] G. y C. Grupos de Investigación: Kishurim, Tecnice, Tecnimat, Griduc, *El modelamiento matemático en la formación del ingeniero*, Primera Ed. Bogotá D.C.: Universidad Central de Colombia, 2013.
- [25] J. I. Illana, "Métodos Monte Carlo," *Dep. Física Teórica y del Cosm.*, pp. 1–52, 2013.
- [26] Palisade Risk and Decision Analysis, "Monte Carlo Simulation : What Is It and How Does It Work ?," 2016. [Online]. Available: [https://www.palisade.com/risk/monte\\_carlo\\_simulation.asp](https://www.palisade.com/risk/monte_carlo_simulation.asp).
- [27] A. Gupta and D. Yan, "Particle Size Estimation and Distributions," in *Mineral Processing Design and Operation*, 2016, pp. 32–62.
- [28] Vertebra Soluciones, "Análisis de consumo energético - plantas Gravicon," Acacias, Colombia, 2018.
- [29] A. Gupta and D. Yan, "Tubular Rod Mills," in *Mineral Processing Design and Operations - 2nd Edition*, 2016, pp. 212–233.
- [30] F. Zeng and Q. Wu, "A prediction model for the energy consumption of a belt conveyor system based on neural network," in *2015 IEEE International Conference on Information and Automation*, 2015, pp. 1865–1870.
- [31] S. J. Chapman, *Máquinas eléctricas*, 5th ed. McGraw-Hill, 2011.
- [32] WEG S.A., "Hoja de Datos - Motor Trifásico Jaula de Ardilla - 15kW," 2015.
- [33] WEG S.A., "Motores Eléctricos - Guía de Especificación," *Mot. Eléctricos*, p. 67, 2016.
- [34] V. Monov, B. Sokolov, and S. Stoenchev, "Grinding in ball mills: Modeling and process control," *Cybern. Inf. Technol.*, vol. 12, no. 2, pp. 51–68, 2012.
- [35] D. 22101, *Continuous conveyor – Belt conveyors for loose bulk materials Basics for calculation and dimensioning*, no. 0017. Germany, 2002.

## Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos

---

- [36] Dongil Rubber Belt Company, "Conveyor belt catalog." pp. 1–18, 2017.
- [37] C. S.P.A., "Conveyor and process belts - Technical datasheet," 2014.
- [38] Sinfonia Technology Company, "Vibrating Screens Catalog," *Catalog 2015*, 2015.
- [39] A. Gupta and D. Yan, "Process Control," in *Mineral Processing Design and Operations - 2nd Edition*, 2016, pp. 763–816.
- [40] C. Cabanes, B. Giménez, M. Antón, and P. Villa, "LUMINOTECNIA: Cálculo según el método de los lúmenes," *Construcciones Arquít.*, vol. 1, p. 10, 2007.
- [41] C. B. Smith and K. E. Parmenter, "Lighting Management," in *Energy Management Principles*, Elsevier, 2016, pp. 189–218.
- [42] METSO, "Nueva generación de molinos de cono HP3 , HP4 y HP6." Folleto No. 2640-09-13-ESBL, p. 8, 2013.
- [43] Vertebra Soluciones, "Metabase - Plataforma de análisis de datos energéticos." [Online]. Available: <http://45.33.113.68:3000/>.

**PRESUPUESTO DEL TFM**

# Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos

---

## ÍNDICE

ÍNDICE.....	1
ÍNDICE DE TABLAS .....	3
1. INTRODUCCIÓN AL PRESUPUESTO.....	4
2. PRESUPUESTO DURANTE EL ESTADO DEL ARTE: LEVANTAMIENTO DE CARGAS EN GRAVICON 4	
2.1. Primera visita a Gravicon – levantamiento de cargas.....	4
2.2. Segunda visita a Gravicon – levantamiento de cargas.....	5
2.3. Gastos totales del levantamiento de cargas en Gravicon.....	6
3. PRESUPUESTO DEL DESARROLLO DEL MODELO MATEMÁTICO: SOFTWARE MATEMÁTICO DE SIMULACIÓN.....	6
3.1. Instalación del software MatLab.....	6
3.2. Capacitación del software MatLab.....	6
3.3. Gastos totales del uso del software de simulación.....	7
4. VALIDACIÓN DEL MODELO ENERGÉTICO: INSTALACIÓN DE MEDIDORES ENERGÉTICOS.....	7
4.1. Adquisición de los medidores energético Linyang.....	7
4.2. Instalación y puesta en marcha de los medidores energéticos en la planta Cañaveral .	9
4.3. Gastos totales de la instalación y puesta en marcha de los medidores energéticos....	10
5. ESTUDIO DEL MODELO ENERGÉTICO .....	10
6. RESUMEN DEL PRESUPUESTO PARA EL DESARROLLO DEL TFM .....	10

# Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos

---

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Coste de personal - primera visita Gravicon.....	5
Tabla 2. Coste de dieta y viajes - primera visita Gravicon.....	5
Tabla 3. Coste de personal - segunda visita Gravicon.....	5
Tabla 4. Coste de dieta y viajes - segunda visita Gravicon.....	6
Tabla 5. Coste de personal - Capacitación del software MatLab.....	6
Tabla 6. Coste de uso de equipos - medición energética Gravicon.....	8
Tabla 7. Materiales eléctricos para la conexión de medidores energéticos.....	8
Tabla 8. Coste de adquisición de medidores Linyang.....	9
Tabla 9. Coste de personal – instalación de medidores energéticos.....	9
Tabla 10. Coste de plan de datos para medición en tiempo real.....	10
Tabla 11. Coste de la realización del modelo matemático.....	10
Tabla 12. Resumen del presupuesto total del TFM.....	11

# **Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos**

---

## **1. INTRODUCCIÓN AL PRESUPUESTO**

Durante el desarrollo del proyecto de modelación matemática de predicción del consumo energético de plantas de fabricación de áridos como tesis final de máster, se han presentado diferentes gastos correspondientes a cada una de las etapas del proyecto.

Cada etapa ha contado con eventos de inversión económica con fines específicos que se han visto reflejados a lo largo del informe de la memoria como resultados gracias a estas inversiones. En las siguientes secciones.

## **2. PRESUPUESTO DURANTE EL ESTADO DEL ARTE: LEVANTAMIENTO DE CARGAS EN GRAVICON**

El proyecto que se ha desarrollado junto a Vértebra Soluciones ha sido posible gracias a la disposición de la empresa Gravicon, que ha permitido la recolección de información para la creación del modelo que posteriormente será usado en sus instalaciones.

Con el fin de poder conocer en detalle la operación de la industria de fabricación de áridos y conocer la información de las máquinas eléctricas que operaban en las plantas de trituración de la empresa Gravicon, se han realizado dos visitas a las plantas trituradoras, ubicadas en la población de Acacias, estado del Meta, Colombia.

La primera visita a la planta, realizada entre los días 22 y 23 de enero del 2019, se hizo con el fin de conocer los equipos que operaban en las tres plantas de trituración, las formas en que se conectaban entre ellas y los sistemas de control con los que eran operados. De esta visita se agregaron datos del caso real de operación que se describieron a lo largo del segundo capítulo de la memoria, y en la sección 3.3 del tercer capítulo.

La segunda visita a la planta, realizada entre los días 17 y 18 de mayo del 2019, en la que se definió la planta Cañaveral de Gravicon como la planta en la cual se basarían las demostraciones de los resultados del modelo matemático, se hizo con el fin de levantar la información operativa de la planta, el número de empleados, los horarios de operación y los criterios para definir la producción diaria de la planta fueron adquiridos en esta visita.

Ambas visitas presentaron costes de transporte y hospedaje para el autor del documento, y de la disposición de un técnico electricista que acompañó la visita para registro de mediciones mecánicas y eléctricas de la planta. A continuación, se detallarán los gastos de las visitas:

### **2.1. Primera visita a Gravicon – levantamiento de cargas**

Los gastos de la visita técnica a la planta se separan en gastos de personal y gastos de dietas y viajes, ambos costes se analizarán según las recomendaciones establecidas por la UPV.

## Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos

### 2.1.1. Coste de personal

Un técnico eléctrico hizo el acompañamiento de una jornada completa de trabajo a las instalaciones. Siguiendo el resumen de gastos y teniendo en cuenta que sus servicios son pagados en pesos colombianos (COP), se tiene que,

$$\text{Coste de personal (€)} = \text{Coste horario (COP/h)} \times \text{Dedicación de horas (h)} \times \text{tasa de cambio (€/COP)}$$

Tabla 1. Coste de personal - primera visita Gravicon

Descripción	Concepto	Fecha	Valor unitario	Cantidad	Valor total	Valor euros
Visita enero a las plantas Gravicon para levantamiento de equipos	Horas de trabajo - técnico eléctrico	22/01/2019	COP 130.000	6	COP 780.000	€ 202,80

### 2.1.2. Coste de dietas y viajes

Para la visita, se realizó un desplazamiento desde la ciudad de Bogotá, donde se encuentran las oficinas de Vértebra Soluciones, hasta Acacias, visita que duró dos días calendario.

Tabla 2. Coste de dieta y viajes - primera visita Gravicon

Descripción	Concepto	Fecha	Valor unitario	Cantidad	Valor total	Valor euros
Visita enero a las plantas Gravicon para levantamiento de equipos	Transporte del personal a la planta	22/01/2019	COP 205.000	2	COP 410.000	€ 106,60
	Hospedaje del personal en Acacias	22/01/2019	COP 260.000	1	COP 260.000	€ 67,60

## 2.2. Segunda visita a Gravicon – levantamiento de cargas

Los gastos de la segunda visita técnica a la planta igualmente se separan en gastos de personal y gastos de dietas y viajes, analizados según las recomendaciones establecidas por la UPV.

### 2.2.1. Coste de personal

Un técnico eléctrico hizo el acompañamiento de media jornada de trabajo a las instalaciones debido a que no eran necesarias mediciones en sitio, sino una capacitación del personal de Gravicon sobre sus operaciones. Siguiendo el resumen de gastos y teniendo en cuenta que sus servicios son pagados en pesos colombianos (COP), se tiene que,

$$\text{Coste de personal (€)} = \text{Coste horario (COP/h)} \times \text{Dedicación de horas (h)} \times \text{tasa de cambio (€/COP)}$$

Tabla 3. Coste de personal - segunda visita Gravicon

Descripción	Concepto	Fecha	Valor unitario	Cantidad	Valor total	Valor euros
Visita mayo a las planta Cañaveral para rutinas de producción	Horas de trabajo - técnico eléctrico	17/05/2019	COP 130.000	4	COP 520.000	€ 135,20

### 2.2.2. Coste de dietas y viajes

Para la visita, se realizó un desplazamiento desde la ciudad de Bogotá, donde se encuentran las oficinas de Vértebra Soluciones, hasta Acacias, visita que duró dos días calendario.

## Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos

Tabla 4. Coste de dieta y viajes - segunda visita Gravicon

Descripción	Concepto	Fecha	Valor unitario	Cantidad	Valor total	Valor euros
Visita mayo a las planta Cañaveral para rutinas de producción	Transporte del personal a la planta	17/05/2019	COP 205.000	2	COP 410.000	€ 106,60
	Hospedaje del personal en Acacias	17/05/2019	COP 260.000	1	COP 260.000	€ 67,60

### 2.3. Gastos totales del levantamiento de cargas en Gravicon

Reuniendo los gastos de las dos visitas, tanto del personal técnico que hizo acompañamiento al sitio, como del transporte y hospedaje a la ciudad de Acacias en ambas ocasiones, esta primera etapa del proyecto tuvo un coste total de **€ 686,40**.

## 3. PRESUPUESTO DEL DESARROLLO DEL MODELO MATEMÁTICO: SOFTWARE MATEMÁTICO DE SIMULACIÓN

Como parte principal del desarrollo del proyecto, el modelo matemático que se ha obtenido a lo largo de las secciones 3.2 y 3.3 de la memoria del TFM debe ser implementado en un software matemático que permita simular los comportamientos de las máquinas eléctricas y de la planta de trituración a partir de ecuaciones matemáticas con variables de entrada que el usuario del modelo pueda ingresar.

### 3.1. Instalación del software MatLab

El software de simulación MatLab se usó para esta finalidad, la cantidad de herramientas, bibliografía y recursos del software eran ideales para la creación del modelo, pero este software requiere una licencia de uso que, para el caso de estudiantes universitarios, tienen un coste fijo anual de UDS 29 que, a tasa de cambio del 20 de agosto del 2019, representaría **€ 26,10**.

### 3.2. Capacitación del software MatLab

Con el fin de poder implementar todos los modelos físicos de las máquinas eléctricas de una planta de fabricación de áridos y relacionarlos con sus variables de entrada, se realizó una lista de requisitos de MatLab y se hizo una consulta a un ingeniero de sistemas de la empresa Vértebra Soluciones con experiencia en el software para solucionar e implementar los requisitos listados.

El acompañamiento del ingeniero de sistemas se realizó pagando las horas de trabajo que se emplearon para solucionar los requisitos, nuevamente se desarrolla la ecuación para el coste de personal:

Tabla 5. Coste de personal - Capacitación del software MatLab.

Descripción	Concepto	Fecha	Valor unitario	Cantidad	Valor total	Valor euros
Capacitación de software MatLab	Horas ingeniería	19/02/2019	COP 125.000	5	COP 625.000	€ 162,50



## **Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos**

---

### **3.3. Gastos totales del uso del software de simulación**

Finalmente, el software de MatLab se utilizó para el desarrollo del modelo predictivo de plantas de fabricación de áridos gracias a las inversiones descritas, por un valor total de **€ 188,60**.

## **4. VALIDACIÓN DEL MODELO ENERGÉTICO: INSTALACIÓN DE MEDIDORES ENERGÉTICOS**

Para poder comprobar que los resultados entregados por el modelo de predicción energética, simulado en el software matemático MatLab, eran coherentes al consumo de una planta de fabricación de áridos, se realizó la instalación de 4 tele medidores energéticos de la marca Linyang.

Los datos recolectados en tiempo real por estos medidores fueron usados a lo largo del capítulo 4 de la memoria del TFM para ser comparados con los resultados del software que simulaba las condiciones de producción de los días monitoreados de la planta Cañaveral.

### **4.1. Adquisición de los medidores energético Linyang**

#### **4.1.1. Compra de los medidores Linyang SM300**

El primer paso para realizar la comprobación energética en sitio es adquirir los medidores de tiempo real Linyang, usados por la empresa Vértebra Soluciones para su operación, los cuales serán instalados en cargas puntuales de la planta de Cañaveral de Gravicon.

Los dos primeros meses de datos de los medidores instalados serán usados principalmente para el desarrollo del modelo de predicción energética. Posteriormente, estos datos quedarán a disposición de Vertebra Soluciones y Gravicon para el seguimiento a la gestión energética entre las dos empresas.

Por esta razón, solamente se adjudicarán al presente proyecto, la fracción del coste de los medidores correspondientes al tiempo de uso en el proyecto frente a su tiempo total de uso, siguiendo las recomendaciones de presupuestos de la UPV.

$$\text{Costo del uso de equipos} = (A/B) \times C \times D$$

donde:

A = número de meses que el equipo se va a usar en el proyecto, después de la fecha de compra.

B = periodo de amortización, que varía según la naturaleza del bien.

C= coste del equipo.

D= porcentaje de uso del equipo en el proyecto.

Cada equipo de medición energética es adquirido por la empresa Vértebra Soluciones por un valor de USD 240 (C) en el último lote del segundo trimestre del año.

## Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos

Estos equipos serán usados dos meses para finalidades del proyecto del TFM (A) y se usarán dos años más en las instalaciones de Gravicon para el monitoreo energético de la planta (B). Finalmente, cada equipo estará midiendo de forma constante sus cargas asignadas, por lo que el porcentaje de uso de cada medidor es del 100% (D).

Siguiendo estas ecuaciones, el costo unitario de cada equipo de medición para el TFM es de:

$$\text{Costo unitario medidor (USD)} = (2 \text{ meses} / 24 \text{ meses}) \times \text{USD } 240 \times 100\%$$

$$\text{Costo unitario medidor} = \text{USD } 13,33$$

Tabla 6. Coste de uso de equipos - medición energética Gravicon.

Descripción	Concepto	Fecha	Valor unitario	Cantidad	Valor total	Valor euros
Adquisición de los medidores de consumo energético Linyang	Medidores Linyang	15/02/2019	USD 13,33	4	USD 53,32	€ 47,99

### 4.1.2. Cofres metálicos IP 65 para medidores y materiales de conexión eléctrica – uso exterior

Así mismo, cada uno de los medidores utilizados debe incluir los cofres metálicos donde se van a instalar, y el material eléctrico (transformadores de corriente, cables, conectores, tubería) que será usado para la conexión de los medidores a los circuitos de las cargas que se desean monitorear.

Por otro lado, los cofres IP65 con las dimensiones para los medidores tienen un costo de COP 275.000 y se usarán de la misma manera que los medidores, por lo que el factor de uso A/B será el mismo. Finalmente obtenemos que:

$$\text{Costo unitario cofre eléctrico} = \text{COP } 22.916$$

Los materiales eléctricos utilizados para la conexión de los medidores a las cargas de la planta son de un único uso. A continuación, se hace un resumen del costo total de los materiales usados para esta conexión:

Tabla 7. Materiales eléctricos para la conexión de medidores energéticos

Elemento	Costo unitario	Cantidad	Costo total
Juegos de transformadores de corriente	COP 26.000	4 juegos	COP 104.000
Cable eléctrico calibre 14 AWG	COP 1.000	100 metros	COP 100.000
Tubería IMC de ¾"	COP 16.000	12 metros	COP 192.000
Conectores eléctricos	COP 500	24 unidades	COP 12.000
<b>TOTAL</b>			<b>COP 408.000</b>

## Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos

### 4.1.3. Coste total de adquisición de los medidores energéticos

Finalmente, el resumen del coste de este ítem para 4 medidores energéticos que serán instalados en Gravicon son:

*Tabla 8. Coste de adquisición de medidores Linyang.*

Descripción	Concepto	Fecha	Valor unitario	Cantidad	Valor total	Valor euros
Adquisición de los medidores de consumo energético Linyang	Medidores Linyang	15/02/2019	USD 13,33	4	USD 53,32	€ 47,99
	Cofres metálicos IP65	3/03/2019	COP 22.916	4	COP 91.664	€ 23,83
	Materiales eléctricos	3/03/2019	COP 408.000	1	COP 408.000	€ 106,08

## 4.2. Instalación y puesta en marcha de los medidores energéticos en la planta Cañaverál

Finalmente, para poder instalar los medidores, se requiere un proceso de transportar los materiales hasta el sitio y la mano de obra para instalar y programar los equipos en sitio para empezar las mediciones. A continuación, se muestra un resumen de estos costes.

### 4.2.1. Transporte de materiales a la planta Cañaverál

Todos los materiales adquiridos en la sección 4.1. son comprados y llevados a las oficinas de Vertebra Soluciones en Bogotá. El transporte de los equipos eléctricos hasta Acacias para la instalación se realiza con una empresa de mensajería, por un valor de COP 233.000 por el envío total que, a tasa de cambio del 20 de agosto del 2019, representa **€ 60,58**.

### 4.2.2. Coste del personal para la instalación

Dos técnicos eléctricos realizan la instalación de los 4 medidores energéticos el día 20 de junio del 2019, en dos jornadas de medio trabajo. Siguiendo el resumen de gastos y teniendo en cuenta que sus servicios son pagados en pesos colombianos (COP), se tiene para cada operador,

Coste de personal (€) = Coste horario (COP/h) x Dedicación de horas (h) x tasa de cambio (€/COP)

Finalmente, para el cálculo total del coste, se suman las horas de los dos operadores para obtener el valor total como muestra la tabla 9:

*Tabla 9. Coste de personal – instalación de medidores energéticos*

Descripción	Concepto	Fecha	Valor unitario	Cantidad	Valor total	Valor euros
Instalación en sitio y puesta en marcha de los medidores energético en la planta Cañaverál	Horas de trabajo - técnico eléctrico	20/06/2019	COP 130.000	16	COP 2.080.000	€ 540,80

## Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos

### 4.2.3. Coste de plan de datos para los medidores

Estos medidores Linyang funcionan con tecnología GSM para la comunicación de datos en tiempo real, cada medidor debe contar con un paquete de datos que le permita la transmisión de la información. El pago total del plan de datos para los 4 medidores se resume en la tabla 10:

Tabla 10. Coste de plan de datos para medición en tiempo real.

Descripción	Concepto	Fecha	Valor unitario	Cantidad	Valor total	Valor euros
Instalación en sitio y puesta en marcha de los medidores energético en la planta Cañaveral	Plan de datos mensual 3G para telemedición	20/08/2019	COP 38.000	2	COP 76.000	€ 19,76

### 4.3. Gastos totales de la instalación y puesta en marcha de los medidores energéticos

Finalmente, la adquisición e instalación de los medidores para obtener datos energéticos que permitan validar el modelo de predicción energética, tienen un coste total de **€ 799,04**.

## 5. ESTUDIO DEL MODELO ENERGÉTICO

Finalmente, el autor del presente trabajo ha tenido una dedicación por contrato y por condiciones del presente estudio, una dedicación aproximada de 300 horas de trabajo para el análisis, desarrollo, validación y final entrega del modelo predictivo de energía. Los gastos asociados a estas horas de trabajo se detallan de la siguiente forma:

Tabla 11. Coste de la realización del modelo matemático

Descripción	Concepto	Fecha	Valor unitario	Cantidad	Valor total	Valor euros
Realización del modelo matemático	Horas de trabajo - autor del proyecto	28/08/2019	COP 130.000	300	USD 39.000.000	€ 10.140,00

## 6. RESUMEN DEL PRESUPUESTO PARA EL DESARROLLO DEL TFM

Una vez se han desglosado y descrito los principales costes para el desarrollo adecuado del TFM, se obtiene que los materiales y actividades que se han realizado alrededor del proyecto han tenido un coste total de **€ 11.781**, como aparece en tabla 11 del resumen de los costes totales.

Estos costes hacen parte del desarrollo del proyecto de gestión energética que se lleva a cabo entre Vértebra Soluciones y Gravicon. Ambas empresas han ido siguiendo el avance del proyecto, tanto de la parte técnica y operativa (funcionalidad del modelo) como desde la parte económica, por lo que estos costes se han socializado de manera periódica con el equipo de Vértebra Soluciones.

## Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos

Tabla 12. Resumen del presupuesto total del TFM.

PRESUPUESTO DEL TRABAJO FINAL DE MÁSTER							
<b>TFM:</b>	Desarrollo de un modelo físico de predicción del consumo energético de una planta industrial dedicada a la fabricación de áridos						
<b>Estudiante:</b>	John Alexander Cardozo						
<b>Empresa responsable de los gastos del trabajo:</b>	Vertebra Soluciones						
<b>Tasas de cambio</b>							
<b>Fecha de la tasa de cambio</b>	<b>20/08/2019</b>	<b>Dólar (USD)</b>	€ 0,90	<b>Peso colombiano (COP)</b>	€ 0,00026		
Item	Descripción	Concepto	Fecha	Valor unitario	Cantidad	Valor total	Valor euros
<b>1. Levantamiento de cargas - Gravicon</b>							
1.1	Visita enero a las plantas Gravicon para levantamiento de equipos	Transporte del personal a la planta	22/01/2019	COP 205.000	2	COP 410.000	€ 106,60
		Hospedaje del personal en Acacias	22/01/2019	COP 260.000	1	COP 260.000	€ 67,60
		Horas de trabajo - técnico eléctrico	22/01/2019	COP 130.000	6	COP 780.000	€ 202,80
1.2	Visita mayo a las planta Cañaveral para rutinas de producción	Transporte del personal a la planta	17/05/2019	COP 205.000	2	COP 410.000	€ 106,60
		Hospedaje del personal en Acacias	17/05/2019	COP 260.000	1	COP 260.000	€ 67,60
		Horas de trabajo - técnico eléctrico	17/05/2019	COP 130.000	4	COP 520.000	€ 135,20
<b>2. Software de simulación matemática - MatLab</b>							
2.1	Instalación de software MatLab	Licencia estudiantil	5/01/2019	USD 29	1	USD 29	€ 26,10
2.2	Capacitación de software MatLab	Horas ingeniería	19/02/2019	COP 125.000	4	COP 500.000	€ 130,00
<b>3. Instalación de medidores energéticos - Vertebra Soluciones</b>							
3.1	Adquisición de los medidores de consumo energético Linyang	Medidores Linyang	15/02/2019	USD 13,33	4	USD 53,32	€ 47,99
		Cofres metálicos IP65	3/03/2019	COP 22.916	4	COP 91.664	€ 23,83
		Materiales eléctricos	3/03/2019	COP 408.000	1	COP 408.000	€ 106,08
3.2	Instalación en sitio y puesta en marcha de los medidores energético en la planta Cañaveral	Transporte de materiales	18/06/2019	COP 233.000	1	COP 233.000	€ 60,58
		Horas de trabajo - técnico eléctrico	20/06/2019	COP 130.000	16	COP 2.080.000	€ 540,80
		Plan de datos mensual 3G para telemedición	20/08/2019	COP 38.000	2	COP 76.000	€ 19,76
<b>4. Estudio del modelo</b>							
4.1	Realización del modelo matemático	Horas de trabajo - autor del proyecto	28/08/2019	COP 130.000	300	USD 39.000.000	€ 10.140,00
<b>TOTAL DEL PRESUPUESTO</b>							<b>€ 11.781,54</b>

**ANEXO 1.**  
**CÓDIGO DEL MODELO DE PREDICCIÓN EN MATLAB**

## **1. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL CÓDIGO**

El presente anexo presenta el código que se ha utilizado para modelar el comportamiento energético de las plantas de agregados pétreos. Este código presenta ciertas características que explicaremos a continuación para comprensión del usuario.

La lógica del código se divide en dos partes. Los scripts o módulos de código generados en MatLab (archivos .m) son diseñados para que el usuario pueda ingresar las características de operación de su planta y de cada una de sus máquinas, así mismo tomarán estas entradas del usuario y las transformarán en señales o variables de entrada aptas para el modelo. La segunda parte del código consiste en los modelos (archivos .mdl) generados en Simulink con las ecuaciones matemáticas e interpretaciones físicas necesarias para generar los consumos energéticos a lo largo del tiempo a partir de los datos entrada de los scripts ingresados en la primera parte. Esta segunda parte de Simulink va a generar finalmente las curvas de consumo energético de la planta y de cada uno de los equipos.

Por otra parte, cada máquina que haga parte del proceso de trituración de la planta generará su propio scripts con la información de entrada y un módulo de código dentro del modelo de Simulink, lo cual permite la modularidad del modelo para que pueda simular una planta con cualquier característica de entrada del usuario. Con base en las variables de entrada que se van generando en cada script, el código irá tomando la decisión de crear y generar códigos particulares para cada máquina.

## 2. SCRIPTS DE MATLAB

A continuación, se muestra algunos de los scripts que genera el programa para poder ingresar todos los valores de entrada de la planta de fabricación de áridos. Cada uno de estos scripts aparecerá de forma secuencial en el programa según la configuración inicial de la planta.

Cada uno de estos scripts puede repetirse según la cantidad de máquinas que haya del mismo tipo en la planta, por ejemplo, si en la planta existen catorce (14) bandas transportadoras, se generarán 14 scripts de tipo "Conveyor.m" con la información particular de cada banda.

Estos scripts se han diseñado con todos los comentarios necesarios para que el usuario pueda seguir paso a paso los datos que se están llenando para la creación del modelo.

### 2.1. INICIO\_DEL\_MODELO.m

Es el primer script que se debe abrir para poder dar inicio a la simulación del modelo. Con la información inicial que el usuario complete en este script, se generarán todos los demás módulos y modelos necesarios de la planta. Cuando el usuario desee simular el modelo, debe abrir este Script, y por lo demás, seguir las instrucciones que cada uno de estos módulos le entregue al usuario.

```
%-----VALORES INICIALES DE LA PLANTA DE TRITURADO:-----%
%-----CARACTERÍSTICAS GENERALES-----%
clear

%CARACTERÍSTICAS AGREGADOS%

%Introduzca en "Agregado" el nombre de su tipo de material:
Tipo_agregado = 'Grava';

%Introduzca el área superficial de la planta de agregados en m2:
AreaSup = 2500; %m2

%Introduzca el número de etapas de trituración tiene la planta:
Etapas = 3;

%Introduzca si la planta es de ciclo cerrado o abierto:
Tipo_ciclo = 'cerrado';

%Introduzca el tamaño de piedra máximo que en sus registros ingresa a la
%planta y sobre el cuál está diseñada la operación de la misma:

Size_max = 1600; %metros

%Introduzca la altura sobre el nivel del mar a la que se encuentra
ubicada
%la planta de trituración:

Altura_sndm = 1000; %metros

%Introduzca en el archivo de excel "Temperatura_Esperada" la curva de
%temperatura que se espera para el día de operación

%Llene en el archivo de excel "MaterialMontecarlo" el material de entrada
```



```

%esperada por cada hora en la planta en toneladas

%Al finalizar, corre este código ("run" en la parte superior)

%-----INICIO DEL CÓDIGO-----%
%-----%
Sheet1 = 1;
Sheet2 = 2;

%CONDICIONES AMBIENTALES DE LA PLANTA
Temp_dia = xlsread('Temperatura_Esperada',Sheet1,'B2:B25');

Cuadro_Ambiental =
xlsread('Cuadro_CondicionesAmbientales',Sheet1,'A:H');
Temp_cuadro = Cuadro_Ambiental(:,1);
H_cuadro_fila = Cuadro_Ambiental(1,:);
H_cuadro = H_cuadro_fila.';

[minimo,H_operacion]= min(abs(H_cuadro-Altura_sndm));

hora_temp = 1;
while (hora_temp < 25)
[minimo,Temp_operacion(hora_temp,:)] = min(abs(Temp_cuadro-
Temp_dia(hora_temp,:)));
Factor_amb(hora_temp,:) =
Cuadro_Ambiental(Temp_operacion(hora_temp,:),H_operacion);
hora_temp = hora_temp + 1;
end

%MATERIAL DE ENTRADA A OPERAR A LA PLANTA
Material_Entrada_Total =
xlsread('MaterialMontecarlo_Sim',Sheet1,'A2:B25');
[tiempo,vrt] = size(Material_Entrada_Total);
Factor_ambiental = [Material_Entrada_Total(:,1),Factor_amb];

%ÍNDICE DE TRABAJO DEL MATERIAL Wi

Stone =
{'Andesita';'Barita';'Arcilla';'Carbon';'Cobre';'Dolomita';'Oro';'Granito
';'Grafito';'Grava';'Magnetita';'Caliza';'Niquel';'Quarzo';'Silica';'Esta
ño';'Zinc'};
Wi =
[18.25;4.73;6.30;13.00;12.72;11.27;14.93;15.13;43.56;16.06;9.97;12.74;13.
65;13.57;14.1;10.9;11.56];
Density =
[2800;4480;2020;1600;8960;2600;19300;2750;2200;1690;4700;2200;8900;2700;2
650;7310;7140];
MaterialWi_TableProperties = table(Wi,'RowNames',Stone);

WiSelect = MaterialWi_TableProperties(Tipo_agregado,:);
WiCell = table2cell(WiSelect);

```

```

ValorWi = cell2mat(WiCell);

VectWi = [tiempo,ValorWi];

%DENSIDAD DEL MATERIAL

MaterialDensity_TableProperties = table(Density, 'RowNames', Stone);

DensitySelect = MaterialDensity_TableProperties(Tipo_agregado,:);
DensityCell = table2cell(DensitySelect);
ValorDensidad = cell2mat(DensityCell);

VectDensidad = [tiempo,ValorDensidad];

%PROPIEDADES DE LAS MÁQUINAS DE OPERACIÓN
if (Etapas == 1)
    open('Maquinas1ciclo.m');
elseif (Etapas == 2)
    open('Maquinas2ciclos.m');
else
    open('Maquinas3ciclos.m');
end

```

## 2.2. Maquinas3ciclos.m

Este es el ejemplo de uno de tres posibles scripts que se pueden generar según el número de etapas con las que cuente la planta que se hayan respondido en el script de INICIO\_DEL\_MODELO. Los otros dos scripts posibles son “Maquinas1ciclo.m” y “Maquinas2ciclos.m”.

```

%-----DEFINICIÓN DE MAQUINARIA: PLANTA DE 3 CICLOS-----%
%-----%

%Introduzca el tipo de máquina que opera en el primer y segundo ciclo de
%trituration('Mandíbula', 'Cono' o 'Molino'):

Maq_Trit_1ciclo = 'Mandíbula';
Maq_Trit_2ciclo = 'Cono';
Maq_Trit_3ciclo = 'Cono';

%Al finalizar, corre este código ("run" en la parte superior)

%-----INICIO DEL CÓDIGO-----%
%-----%

if strcmp(Tipo_ciclo, 'cerrado')
    Qent_VSI = Material_Entrada_Total;
    DistQent_VSI = xlsread('MaterialMontecarlo_Sim', Sheet1, 'C2:J25');
    open('VScreen_Inic.m');
else
    Qsal_trit1 = Material_Entrada_Total;
    DistSal_trit1 = xlsread('MaterialMontecarlo_Sim', Sheet1, 'C2:J25');

```

```

    if strcmp(Maq_Trit_1ciclo, 'Mandíbula')
        open('JawCrusher1.m');
    elseif strcmp(Maq_Trit_1ciclo, 'Cono')
        open('ConeCrusher1.m');
    else
        open('BallMill1.m');
    end
end
end

```

### 2.3. JawCrusher.m

Script generado para las características de cada trituradora de mandíbula que tenga la planta.

```

%-----CARACTERÍSTICAS TRITURADORA DE MANDÍBULA -----%
%-----%

%Los datos solicitados a continuación pueden encontrarse en la ficha
%técnica del equipo, en caso de no tenerlos, puede usar los valores
%predeterminados

%Introduzca en "AperturaJaw", las dimensiones de apertura de su
trituradora
%en metros
%Recuerde que este valor debe ser coherente con el tamaño máximo de la
roca
%que ingresó al inicio del programa
AperturaJaw1 = 1.7;%m

%Introduzca en "XJaw", la relación de trituración X:1 de la trituradora
XJaw1 = 1600/100;

%Introduzca la potencia nominal del motor eléctrico de la trituradora de
%mandíbula:
Pnom_jaw1 = 100; %kW

%Introduzca la curva de eficiencia eléctrica del motor de la trituradora
%según datos de la placa del motor o ficha técnica:
Tabla_factor_elec_jaw1 =
xlsread('curva_ef_trituradoras', 'sheet1', 'A3:B13');

%Introduzca la eficiencia eléctrica del motor de la trituradora según
datos
%de la placa del motor o ficha técnica:
FP_Jaw1 = 0.84;

%Al finalizar, corre este código ("run" en la parte superior)

```

```

%-----INICIO DEL CÓDIGO-----%
%-----%

%SIMULACIÓN DE LA TRITURADORA DE MANDÍBULA%

VectApJaw1 = [tiempo,AperturaJaw1];
RelacionJaw1 = [tiempo,XJaw1];

Vect_FP_Jaw1 = [tiempo,FP_Jaw1];

%CALCULOS PUNTUALES DE F80 Y P80%
F80_1 = AperturaJaw1*630; %mm

Lmin_Jaw1 = AperturaJaw1/XJaw1;
Lt_Jaw1 = (AperturaJaw1^0.85)*0.0502;

P80_1 = 700*(Lmin_Jaw1 + Lt_Jaw1); %mm

%MATERIAL SALIENTE DE LA TRITURADORA%

open('Conveyor1.m');

```

## 2.4. ConeCrusher.m

Script generado para las características de cada trituradora tipo cono que tenga la planta.

```

%-----CARACTERÍSTICAS TRITURADORA DE CONO -----%
%-----%

%Los datos solicitados a continuación pueden encontrarse en la ficha
%técnica del equipo, en caso de no tenerlos, puede usar los valores
%predeterminados

%Introduzca las dimensiones de apertura de su trituradora en metros
%Recuerde que este valor debe ser coherente con el tamaño máximo de la
roca
%que ingresó al inicio del programa
AperturaCone1 = 1.2;%m

%Introduzca la relación de trituración X:1 de la trituradora
XCone1 = 9;

%Introduzca la potencia nominal del motor eléctrico de la trituradora de
%cono:
Pnom_cone1 = 60; %kW

%Introduzca la curva de eficiencia eléctrica del motor de la trituradora
%según datos de la placa del motor o ficha técnica:

```

```

Tabla_factor_elec_cone1 =
xlsread('curva_ef_trituradoras','sheet1','A3:B13');

%Introduzca la eficiencia eléctrica del motor de la trituradora
FP_Cone1 = 0.84;

%Al finalizar, corre este código ("run" en la parte superior)

%-----INICIO DEL CÓDIGO-----%
%-----%

%SIMULACIÓN DE LA TRITURADORA DE MANDÍBULA%

VectApCone1 = [tiempo,AperturaCone1];
RelacionCone1 = [tiempo,XCone1];

Vect_FP_Cone1 = [tiempo,FP_Cone1];

%CALCULOS PUNTUALES DE F80 Y P80%
F80_1 = AperturaCone1*630; %mm

Lmin_Cone1 = AperturaCone1/XCone1;
Lt_Cone1 = (AperturaCone1^0.85)*0.0502;

P80_1 = 700*(Lmin_Cone1 + Lt_Cone1); %mm

open('Conveyor1.m');

```

## 2.5. BallMill.m

Script generado para las características de cada molino de bolas que tenga la planta.

```

%-----CARACTERÍSTICAS MOLINO DE BOLAS-----%
%-----%

%Los datos solicitados a continuación pueden encontrarse en la ficha
%técnica del equipo, en caso de no tenerlos, puede usar los valores
%predeterminados

%Introduzca en las dimensiones de longitud (largo) del molino de bolas en
%metros:
LongMolino2 = 3;%m

%Introduzca el diámetro interno del molino de bolas en metros:
Diam_Molino2 = 2.07; %m

%Introduzca en "XMill", la relación de trituración X:1 del molino
XMill2 = 20;

%Introduzca el porcentaje de carga de volumen al que está operando el
%molino principal:

```

```

Carga_Molino2 = 0.3;

%Introduzca el diámetro de las bolas de acero del molino en metros:
Diam_Bola2 = 0.18; %m

%Introduzca la velocidad de operación del molino, en porcentaje de la
%velocidad crítica de fábrica:
Vel_oper_molino2 = 0.8;

%Introduzca la potencia nominal del motor eléctrico de la trituradora del
%molino:
Pnom_molino2 = 90; %kW

%Introduzca la curva de eficiencia eléctrica del motor del molino
%según datos de la placa del motor o ficha técnica:
Tabla_factor_elec_molino2 =
xlsread('curva_ef_trituradoras','sheet1','D3:E13');

%Introduzca la eficiencia eléctrica del motor del molino:
FP_Molino2 = 0.84;

%-----INICIO DEL CÓDIGO-----%
%-----%

%Valores físicos del molino%

Vect_LongMolino2 = [tiempo,LongMolino2];
Vect_DiamMolino2 = [tiempo,Diam_Molino2];
Vect_CargaMolino2 = [tiempo,Carga_Molino2];
Vect_DiamBola2 = [tiempo,Diam_Bola2];

Volumen_cap_molino2 = (Diam_Molino2*Diam_Molino2)*2*pi*LongMolino2;
Volumen_carga_molino2 = Volumen_cap_molino2*Carga_Molino2;
Masa_carga_molino2 = Volumen_carga_molino2*ValorDensidad;

Vect_MasaMolino2 = [tiempo,Masa_carga_molino2];

Vect_VelMolino2 = [tiempo,Vel_oper_molino2];

Vect_FP_Molino2 = [tiempo,FP_Molino2];
%Valor Hcog

TabCarga = [0.05;0.10;0.15;0.20;0.25;0.30;0.35;0.40;0.45];
Hcog = [0.44;0.40;0.37;0.35;0.32;0.30;0.28;0.26;0.24];
TabHcog = [TabCarga, Hcog];

[minimo,position]= min(abs(TabCarga-Carga_Molino2));
Hcog_MB2 = Hcog(position);
Vect_Hcog_MB2 = [tiempo,Hcog_MB2];

%P80
MaxTrit1 = P80_1*2;
if (MaxTrit1 < Filtro_ZVI)

```

```

        P80_2 = (Filtro_ZVI/2)/XMill12;
else
        P80_2 = P80_1/XMill12;
end

open('Conveyor2.m');

```

## 2.6. Conveyor.m

Script generado para las características de cada banda transportadora que tenga la planta.

```

%-----CARACTERÍSTICAS BANDA TRANSPORTADORA-----%
%-----PRIMER CICLO-----%

%Esta banda transportadora corresponde a la banda que transporta el
%material entre la trituradora del primer ciclo y la zaranda vibratoria
%del
%primer ciclo.

%Los datos solicitados a continuación pueden encontrarse en la ficha
%técnica del equipo, en caso de no tenerlos, puede usar los valores
%predeterminados

%Introduzca la longitud de la banda transportadora en metros
Long_BT1 = 46; %m

%Introduzca el ángulo de inclinación de la banda en grados
Inc_BT1 = 15; %°

%Introduzca el ancho de la banda en metros
Width_BT1 = 1.5; %m

%Llene el archivo de excel "TablaVel_BT_Ciclo1" adjunto a este programa
%con la
%velocidad de la banda programada por hora
Vel_BT1 = xlsread('TablaVel_BT_Ciclo1',Sheet1,'A6:B29');

%Introduzca la potencia nominal del motor eléctrico de la banda del
%primer
%ciclo:
Pnom_BT1 = 12; %kW

%Introduzca la curva de eficiencia eléctrica del motor de la banda
%según datos de la placa del motor o ficha técnica:
Tabla_factor_elec_BT1 = xlsread('curva_ef_BT','Ciclo1','A6:B16');

%Introduzca la eficiencia eléctrica del motor de la banda principal

```

```

FP_BT1 = 0.84;

%Si conoce los valores, introduzca la unitaria de las partes rodantes
superiores
%"q_rc" e inferiores "q_ru" en kg/m
Q_rc = 0.52; %kg/m
Q_ru = 1.02; %kg/m

%Al finalizar, corre este código ("run" en la parte superior)

%-----INICIO DEL CÓDIGO-----%
%-----%

%SIMULACIÓN DE LA BANDA PRINCIPAL%

%Factor de Fricción%
FactFr_BT1 = Vel_BT1(:,2) * 0.005;
FactFriccion_BT1 = [Vel_BT1(:,1), FactFr_BT1];

%Propiedades físicas%
IncRad_BT1 = Inc_BT1*pi/180;
Ang_BT1 = [tiempo, cos(IncRad_BT1)];
%
H_BT1 = Long_BT1*sin(IncRad_BT1);
Altura_BT1 = [tiempo, H_BT1];
%
L_BT1 = Long_BT1*cos(IncRad_BT1);
Largo_BT1 = [tiempo, L_BT1];
%
Ancho_BT1 = [tiempo, Width_BT1];

%Coeficiente C%
TabLong = [80;100;150;200;300;400;500;600;700;800;900;1000;1500];
CoefC = [1.92;1.78;1.58;1.45;1.31;1.25;1.2;1.17;1.14;1.12;1.1;1.09;1.06];
TabCoefC = [TabLong, CoefC];

[minimo,position]= min(abs(TabLong-Long_BT1));
CoefCBanda = CoefC(position);

Vect_CoefC_BT1 = [tiempo, CoefCBanda];
VectQ_rc_BT1 = [tiempo, Q_rc];
VectQ_ru_BT1 = [tiempo, Q_ru];

Vect_FP_BT1 = [tiempo,FP_BT1];

open ('VScreen1.m');

```



## 2.7. VScreen.m

Script generado para las características de cada zaranda vibratoria que tenga la planta.

```
%-----CARACTERÍSTICAS ZARANDA VIBRATORIA-----%
%-----%

%Esta zaranda vibratoria corresponde a la zaranda encargada de clasificar
%el material que proviene a la salida del primer ciclo de trituración y
%redistribuirlo para las siguientes etapas

%Los datos solicitados a continuación pueden encontrarse en la ficha
%técnica del equipo, en caso de no tenerlos, puede usar los valores
%predeterminados

%Introduzca el tamaño de filtro de la tolva (diámetro de la piedra
%permitida) en mm
Filtro_ZV1 = 50; %mm

%Introduzca la amplitud de vibración en "AmpZVPrincipal" en mm.
AmpZVPrincipal = 9; %mm

%Introduzca la frecuencia de vibración en "FrecZVPrincipal" en r/min.
FrecZVPrincipal = 950; %rpm

%Introduzca el diámetro del rodamiento del equipo en "DrodZVPrincipal" en
m.
DrodZVPrincipal = 0.4; %m

%Introduzca el coeficiente de amortiguamiento en "CoefC_ZVPrincipal"
CoefC_ZVPrincipal = 0.14;

%Introduzca el coeficiente de fricción del rodamiento en
"CoefF_ZVPrincipal"
CoefF_ZVPrincipal = 0.028;

%Introduzca la potencia nominal del motor eléctrico de la zaranda
%vibratoria:
Pnom_ZV1 = 20; %kW

%Introduzca la curva de eficiencia eléctrica del motor de la zaranda
%según datos de la placa del motor o ficha técnica:
Tabla_factor_elec_ZV1 = xlsread('curva_ef_Zarandas','sheet1','A3:B13');

%Introduzca la eficiencia eléctrica del motor de la banda principal
FP_ZV1 = 0.84;

%Al finalizar, corre este código ("run" en la parte superior)

%-----INICIO DEL CÓDIGO-----%
%-----%
```

```

%SIMULACIÓN DE LA ZARANDA VIBRATORIA PRINCIPAL%

%Masa de la carga%
if strcmp(Tipo_ciclo, 'abierto')
    MasaZVPrincipal = Qsal_trit1(:,2)*6*1000/3600;
else
    MasaZVPrincipal = Qent_VSI(:,2)*6*1000/3600;
end
%Propiedades físicas de la zaranda para simulink%
Vect_FrecZV1 = [tiempo,FrecZVPrincipal];

if strcmp(Tipo_ciclo, 'abierto')
    Vect_MasaZV1 = [Qsal_trit1(:,1),MasaZVPrincipal];
else
    Vect_MasaZV1 = [Qent_VSI(:,1),MasaZVPrincipal];
end

Vect_AmpZV1 = [tiempo,AmpZVPrincipal];
Vect_CoefCZV1 = [tiempo,CoefC_ZVPrincipal];
Vect_CoefFZV1 = [tiempo,CoefF_ZVPrincipal];
Vect_DrodZV1 = [tiempo,DrodZVPrincipal];

Vect_FP_ZV1 = [tiempo,FP_ZV1];

%Separación de materiales%

size_stone_trit1 = P80_1*2;

if strcmp(Tipo_ciclo, 'abierto')

    columna_dist = 1;

    while (size_stone_trit1 > Filtro_ZV1) && (columna_dist < 8)
        columna_dist = columna_dist + 1;
        size_stone_trit1 = size_stone_trit1/2;
    end

    DistPaso_ZV1 = DistSal_trit1(:,columna_dist:8);
    if (columna_dist == 1)
        DistNoPaso_ZV1 = 0;
    else
        DistNoPaso_ZV1 = DistSal_trit1(:,1:(columna_dist-1));
    end
else
    columnas_NP = columna_dist-1;
    columnas_P = 8 - columnas_NP;
    columna_dist = 1;

    while (size_stone_trit1 > Filtro_ZV1) && (columna_dist < columnas_NP)
        columna_dist = columna_dist + 1;
        size_stone_trit1 = size_stone_trit1/2;
    end
end

```

```

DistPaso_ZV1_Tr1 = DistNoPaso_ZVI(:,columna_dist:columnas_NP);
if (columna_dist == 1)
    DistNoPaso_ZV1_Tr1 = zeros(24,1);
else
    DistNoPaso_ZV1_Tr1 = DistNoPaso_ZVI(:,1:(columna_dist-1));
end

columna_dist = 1;

while (size_stone_Ent > Filtro_ZV1) && (columna_dist < columnas_P)
    columna_dist = columna_dist + 1;
    size_stone_Ent = size_stone_Ent/2;
end

DistPaso_ZV1_ZVI = DistPaso_ZVI(:,columna_dist:columnas_P);
if (columna_dist == 1)
    DistNoPaso_ZV1_ZVI = zeros(24,1);
else
    DistNoPaso_ZV1_ZVI = DistPaso_ZVI(:,1:(columna_dist-1));
end

DistPaso_ZV1 = [DistPaso_ZV1_Tr1 , DistPaso_ZV1_ZVI];
DistNoPaso_ZV1 = [DistNoPaso_ZV1_Tr1 , DistNoPaso_ZV1_ZVI];
end

Vect_QPaso_ZV1 = sum(DistPaso_ZV1,2);
Vect_QNoPaso_ZV1 = sum(DistNoPaso_ZV1,2);

if strcmp(Tipo_ciclo, 'abierto')
    QPaso_ZV1 = [Qsal_trit1(:,1),Vect_QPaso_ZV1];
    QNoPaso_ZV1 = [Qsal_trit1(:,1),Vect_QNoPaso_ZV1];
else
    QPaso_ZV1 = [Qent_VSI(:,1),Vect_QPaso_ZV1];
    QNoPaso_ZV1 = [Qent_VSI(:,1),Vect_QNoPaso_ZV1];
end

if strcmp(Tipo_ciclo, 'cerrado')
    if (Etapas == 1)
        open('Conveyor_retr1.m');
    else
        open('Conveyor_PasoZV1.m');
    end
else
    open('Conveyor_resid1.m');
end

```

## 2.8. Iluminacion.m

Script generado para las características de la iluminación que tenga la planta.

```
%-----CARACTERÍSTICAS ILUMINACIÓN-----%
%-----%

%Los datos solicitados a continuación pueden encontrarse en la ficha
%técnica del equipo, en caso de no tenerlos, puede usar los valores
%predeterminados

%Introduzca la tecnología de la iluminación a usar en la planta de
agregados
Tecn_Iluminacion = 'Metal Halide';

%Llene el archivo de excel "TablaIluminacion" con '1' en las horas en las
%que se enciende la iluminación y '0' cuando están apagadas

HorasIluminacion = xlsread('TablaIluminacion');

%-----INICIO DEL CÓDIGO-----%
%-----%

%SIMULACIÓN DE LA ILUMINACIÓN DE LA PLANTA%

%Tecnología de iluminación%
Tipo_Lum = {'Incandescente';'Mercurio';'Fluorescente';'Metal
Halide';'Sodio';'LED'};
Efic_Lum = [5;20;30;45;45;70];
Eficiencia_Lum = table(Efic_Lum,'RowNames',Tipo_Lum);

LumSelect = Eficiencia_Lum(Tecn_Iluminacion,:);
LumCell = table2cell(LumSelect);
ValorLum = cell2mat(LumCell);

Vect_EficLum = [tiempo,ValorLum];
Area = [tiempo, AreaSup];

open('Bomba.m')
```

## 2.9. Bomba.m

Script generado para las características de la bomba de agua que suministra el recurso para los diferentes procesos de transporte y clasificación que tenga la planta.

Es la única máquina eléctrica que se considera como una única unidad total, sin diferenciar si en la planta de áridos tenga una o más de estas bombas. Sus características y capacidades se pueden agrupar tal como muestra el código.

El script de la bomba de agua será el último script generado para el ingreso de datos, una vez este script sea corrido, se abrirá un modelo de Simulink con todo el montaje y características de la planta.

```
%-----CARACTERÍSTICAS BOMBA DE RIEGO-----%  
%-----%  
%-----%
```

```
%Los datos solicitados a continuación pueden encontrarse en la ficha  
%técnica del equipo, en caso de no tenerlos, puede usar los valores  
%predeterminados
```

```
%Introduzca la diferencia de altura entre el punto de suministro y el  
punto  
%de aplicación en metros  
H_bomba = 28; %m
```

```
%Introduzca la densidad del líquido de lavado en kg/m3 (1000 kg/m3 para  
el  
%agua)  
Dens_bomba = 1000; %kg/m3
```

```
%Introduzca la eficiencia eléctrica del motor de la bomba de agua  
Efic_Elec_Bomba = 0.85;
```

```
%Introduzca la eficiencia eléctrica del motor de la bomba de agua  
FP_Bomba = 0.84;
```

```
%SIMULACIÓN DE LA BOMBA DE RIEGO%
```

```
Vect_Hbomba = [tiempo,H_bomba];  
Vect_Dbomba = [tiempo,Dens_bomba];  
Vect_Ebomba = [tiempo,Efic_Elec_Bomba];
```

```
Vect_FP_Bomba = [tiempo,FP_Bomba];
```

```
if (Etapas == 1)  
    if strcmp(Tipo_ciclo,'abierto')  
        if strcmp(Maq_Trit_1ciclo, 'Mandíbula')  
            open('Modelo1Etapa_Abierto_Jaw.slx')  
        else  
            open('Modelo1Etapa_Abierto_Cone.slx')  
        end  
    else  
        if strcmp(Maq_Trit_1ciclo, 'Mandíbula')  
            open('Modelo1Etapa_Cerrado_Jaw.slx')  
        end  
    end  
end
```

```

        else
            open('Modelo1Etapa_Cerrado_Cone.slx')
        end
    end
elseif (Etapas == 2)
    if strcmp(Tipo_ciclo, 'abierto')
        if strcmp(Maq_Trit_1ciclo, 'Mandíbula') &&
strcmp(Maq_Trit_2ciclo, 'Mandíbula')
            open('Modelo2Etapas_Abierto_Jaw_Jaw.slx')
        elseif strcmp(Maq_Trit_1ciclo, 'Mandíbula') &&
strcmp(Maq_Trit_2ciclo, 'Cono')
            open('Modelo2Etapas_Abierto_Jaw_Cone.slx')
        elseif strcmp(Maq_Trit_1ciclo, 'Cono') && strcmp(Maq_Trit_2ciclo,
'Cono')
            open('Modelo2Etapas_Abierto_Cone_Cone.slx')
        else
            open('Modelo2Etapas_Abierto_Cone_Mill.slx')
        end
    else
        if strcmp(Maq_Trit_1ciclo, 'Mandíbula') &&
strcmp(Maq_Trit_2ciclo, 'Mandíbula')
            open('Modelo2Etapas_Cerrado_Jaw_Jaw.slx')
        elseif strcmp(Maq_Trit_1ciclo, 'Mandíbula') &&
strcmp(Maq_Trit_2ciclo, 'Cono')
            open('Modelo2Etapas_Cerrado_Jaw_Cone.slx')
        elseif strcmp(Maq_Trit_1ciclo, 'Cono') && strcmp(Maq_Trit_2ciclo,
'Cono')
            open('Modelo2Etapas_Cerrado_Cone_Cone.slx')
        else
            open('Modelo2Etapas_Cerrado_Cone_Mill.slx')
        end
    end
end
else
    if strcmp(Tipo_ciclo, 'abierto')
        if strcmp(Maq_Trit_1ciclo, 'Mandíbula') &&
strcmp(Maq_Trit_2ciclo, 'Mandíbula') && strcmp(Maq_Trit_3ciclo, 'Cono')
            open('Modelo3Etapas_Abierto_Jaw_Jaw_Cone.slx')
        elseif strcmp(Maq_Trit_1ciclo, 'Mandíbula') &&
strcmp(Maq_Trit_2ciclo, 'Cono') && strcmp(Maq_Trit_3ciclo, 'Cono')
            open('Modelo3Etapas_Abierto_Jaw_Cone_Cone.slx')
        elseif strcmp(Maq_Trit_1ciclo, 'Cono') && strcmp(Maq_Trit_2ciclo,
'Cono') && strcmp(Maq_Trit_3ciclo, 'Molino')
            open('Modelo3Etapas_Abierto_Cone_Cone_Mill.slx')
        else
            open('Modelo3Etapas_Abierto_Jaw_Cone_Mill.slx')
        end
    else
        if strcmp(Maq_Trit_1ciclo, 'Mandíbula') &&
strcmp(Maq_Trit_2ciclo, 'Mandíbula') && strcmp(Maq_Trit_3ciclo, 'Cono')
            open('Modelo3Etapas_Cerrado_Jaw_Jaw_Cone.slx')
        elseif strcmp(Maq_Trit_1ciclo, 'Mandíbula') &&
strcmp(Maq_Trit_2ciclo, 'Cono') && strcmp(Maq_Trit_3ciclo, 'Cono')
            open('Modelo3Etapas_Cerrado_Jaw_Cone_Cone.slx')
        elseif strcmp(Maq_Trit_1ciclo, 'Cono') && strcmp(Maq_Trit_2ciclo,
'Cono') && strcmp(Maq_Trit_3ciclo, 'Molino')
            open('Modelo3Etapas_Cerrado_Cone_Cone_Mill.slx')
        else
    
```

```

        open('Modelo3Etapas_Cerrado_Jaw_Cone_Mill.slx')
    end
end
end

```

## 2.10. Analisis\_Resultados.m

Una vez el modelo de Simulink de la planta haya sido generado, el usuario podrá correr este script para generar gráficas e indicadores energéticos con el comportamiento que resultó de la simulación de la planta.

```

%-----ANÁLISIS DE RESULTADOS-----%
%-----%

%Banda Principal

P_real_BT_principal =
xlsread('Mediciones_Gravicon_21_jun',Sheet1,'B6:B29');
horas = P_real_BT_principal(:,1);

Curvas_BT = [P_elec_BT1(1:24),P_real_BT_principal];
desv_BT = std(Curvas_BT,0,2);

Grafica_BT_Principal = figure;
yyaxis left
plot(0:24,P_elec_BT1,'-.^r',0:23,P_real_BT_principal,'-sb');
title('Consumo banda principal');
xlabel('Hora');
ylabel('kWh - consumo');
yyaxis right
bar(0:23,desv_BT,'m');
legend('Modelo energético','Consumo real','Desviación estandar');
ylabel('kWh - desviación');
grid on;

%Trituradora de mandíbula

P_real_Jaw1 = xlsread('Mediciones_Gravicon_21_jun',Sheet1,'D6:D29');

Curvas_Jaw1 = [P_elec_Jaw1(1:24),P_real_Jaw1];
desv_Jaw1 = std(Curvas_Jaw1,0,2);

Gafica_Jaw1 = figure;
yyaxis left
plot(0:24,P_elec_Jaw1,'-.^r',0:23,P_real_Jaw1,'-sb');
title('Consumo trituradora de mandíbula primera etapa');
xlabel('Hora');
ylabel('kWh - consumo');
yyaxis right
bar(0:23,desv_Jaw1,'m');
legend('Modelo energético','Consumo real','Desviación estandar');
ylabel('kWh - desviación');
grid on;

```

### %Zaranda Vibratoria

```
P_real_ZV1 = xlsread('Mediciones_Gravicon_21_jun',Sheet1,'E6:E29');
```

```
Curvas_ZV1 = [P_elec_ZV1(1:24),P_real_ZV1];
```

```
desv_ZV1 = std(Curvas_ZV1,0,2);
```

```
Gafica_ZV1 = figure;
```

```
yyaxis left
```

```
plot(0:24,P_elec_ZV1,'-.^r',0:23,P_real_ZV1,'-sb');
```

```
title('Consumo zaranda vibratoria primera etapa');
```

```
xlabel('Hora');
```

```
ylabel('kWh - consumo');
```

```
yyaxis right
```

```
bar(0:23,desv_ZV1,'m');
```

```
legend('Modelo energético','Consumo real','Desviación estandar');
```

```
ylabel('kWh - desviación');
```

```
grid on;
```

### %Trituradora tipo cono

```
P_real_Cone2 = xlsread('Mediciones_Gravicon_21_jun',Sheet1,'C6:C29');
```

```
Curvas_Cone2 = [P_elec_Cone2(1:24),P_real_Cone2];
```

```
desv_Cone2 = std(Curvas_Cone2,0,2);
```

```
Gafica_Cone2 = figure;
```

```
yyaxis left
```

```
plot(0:24,P_elec_Cone2,'-.^r',0:23,P_real_Cone2,'-sb');
```

```
title('Consumo trituradora tipo cono segunda etapa');
```

```
xlabel('Hora');
```

```
ylabel('kWh - consumo');
```

```
yyaxis right
```

```
bar(0:23,desv_Cone2,'m');
```

```
legend('Modelo energético','Consumo real','Desviación estandar');
```

```
ylabel('kWh - desviación');
```

```
grid on;
```

### %Consumo Total

```
P_real_Total = xlsread('Mediciones_Gravicon_21_jun',Sheet1,'F6:F29');
```

```
P_real_Planta = P_real_Total*0.73;
```

```
Curvas_Total = [P_elec_Total(1:24),P_real_Planta];
```

```
desv_Total = std(Curvas_Total,0,2);
```

```
Gafica_Total = figure;
```

```
yyaxis left
```

```
plot(0:24,P_elec_Total,'-.^r',0:23,P_real_Total,'-b',0:23,P_real_Planta,'--sb');
```

```
title('Consumo total de la planta trituradora');
```

```
xlabel('Hora');
```

```
ylabel('kWh - consumo');
```

```
yyaxis right
```

```
bar(0:23,desv_Total,'m');
```



```
legend('Modelo energético Planta','Consumo real Total Gravicon','Consumo  
teórico sobre real Planta','Desviación estándar');  
ylabel('kWh - desviación');  
grid on;  
  
save('resultados3.mat','P_elec_Total','desv_Total','P_elec_Jaw1','desv_Ja  
w1','P_elec_BT1','desv_BT','P_elec_ZV1','desv_ZV1');
```

### **3. MODELOS DE SIMULINK**

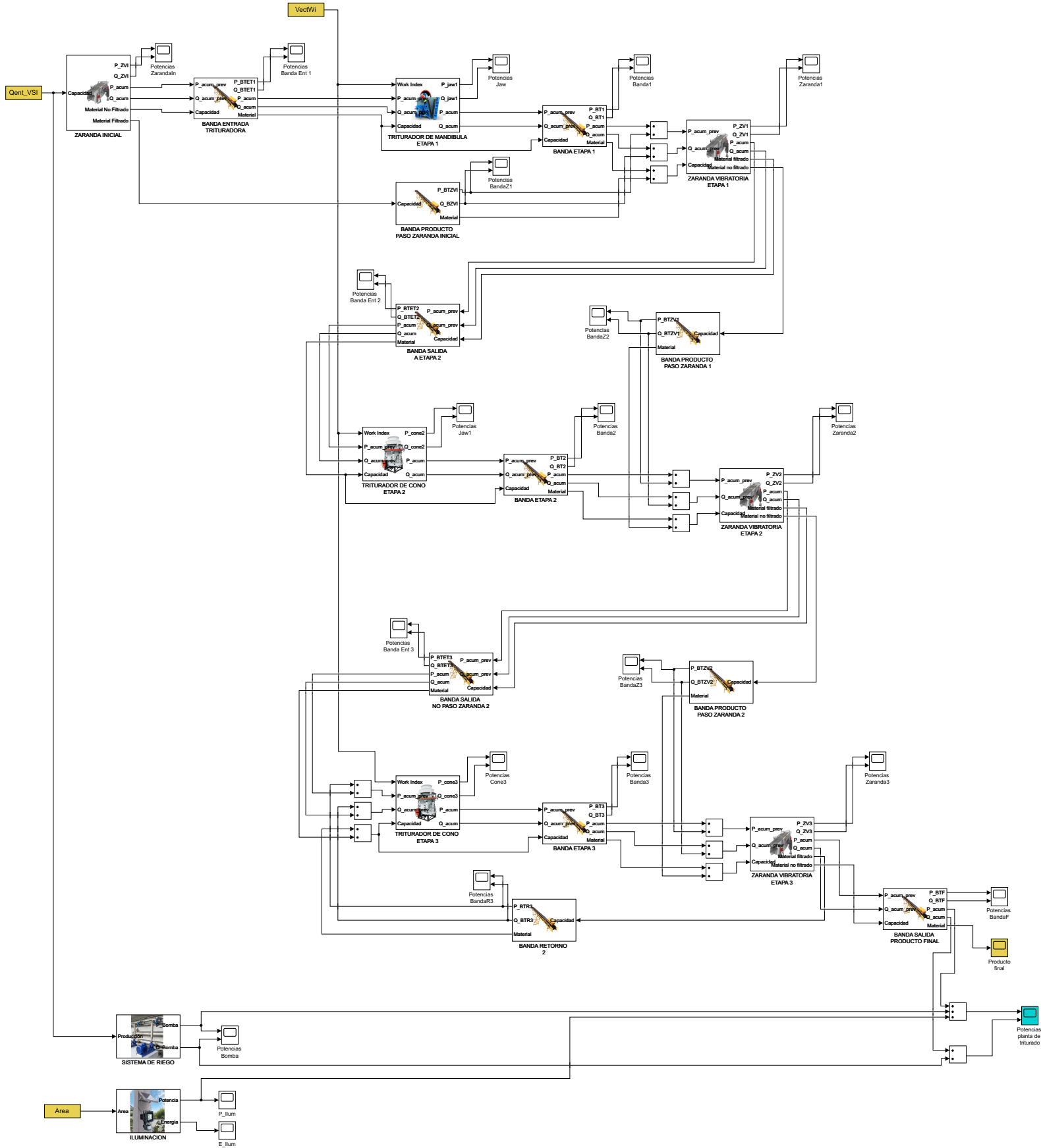
Estos modelos se crean a partir de la información suministrada por el usuario en los scripts, contiene un modelo gráfico de conexiones de cada una de las máquinas y sus variables de entrada y salida.

Este modelo va a generar un bloque o subsistema por cada máquina existente, con su propia diagramación de conexión, y externamente, establecerá la forma en que se comunican las variables de cada equipo.

Cada subsistema de las máquinas va a crear una variable de salida que será guardada para posterior análisis de información, al tiempo que sistemas de graficación en el mismo modelo que permitan una primera observación de resultados en tiempo real.

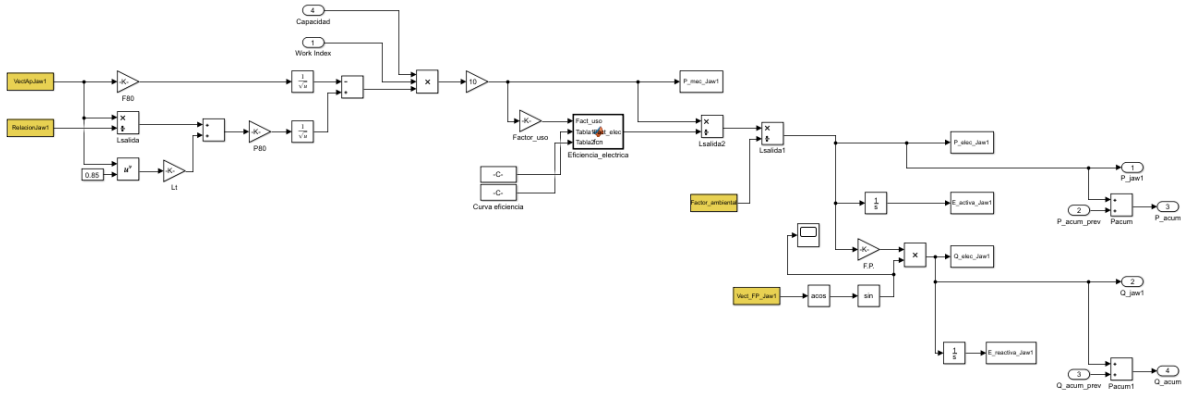
#### **3.1. Modelo de ejemplo: Planta de ciclo cerrado de tres etapas – Modelo3Etapas\_Cerrado\_Jaw\_Cone\_Cone.mdl**

Cuenta con diferentes subsistemas de cada una de las máquinas conectadas de forma que permita reconocer al usuario de manera sencilla los equipos de cada etapa con sus características generales. La figura a continuación muestra el ejemplo de modelo generado para una planta de 3 etapas de ciclo cerrado con una trituradora de mandíbula para la primera etapa y trituradoras tipo cono para la segunda y tercera etapa.



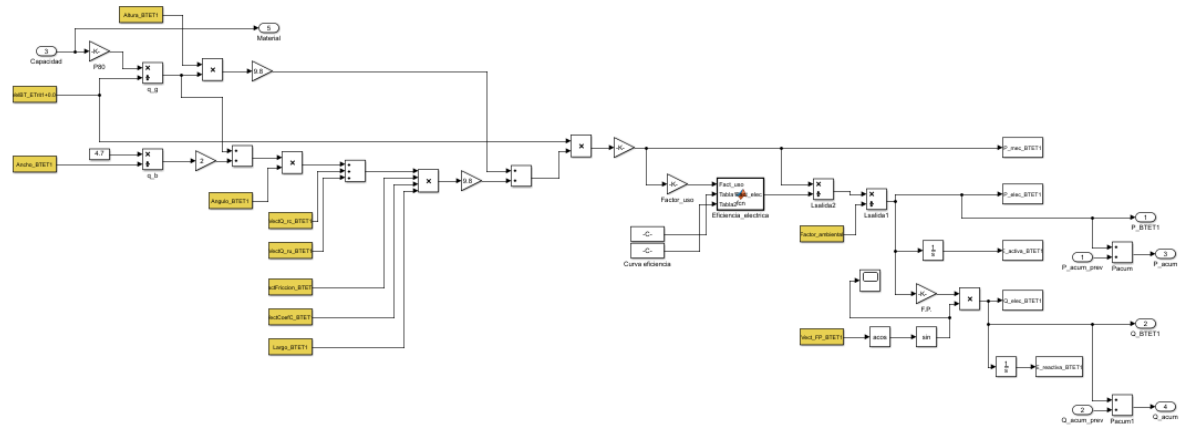
### 3.2. Modelo de una trituradora de mandíbula

Modelo generado de un subsistema del comportamiento de una trituradora de mandíbula.



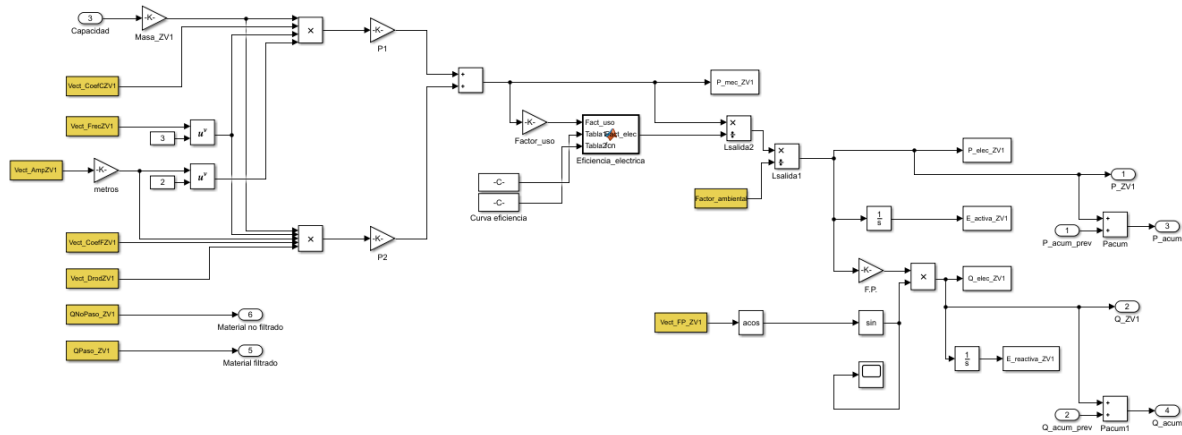
### 3.3. Modelo de una banda transportadora

Modelo generado de un subsistema del comportamiento de una banda transportadora.



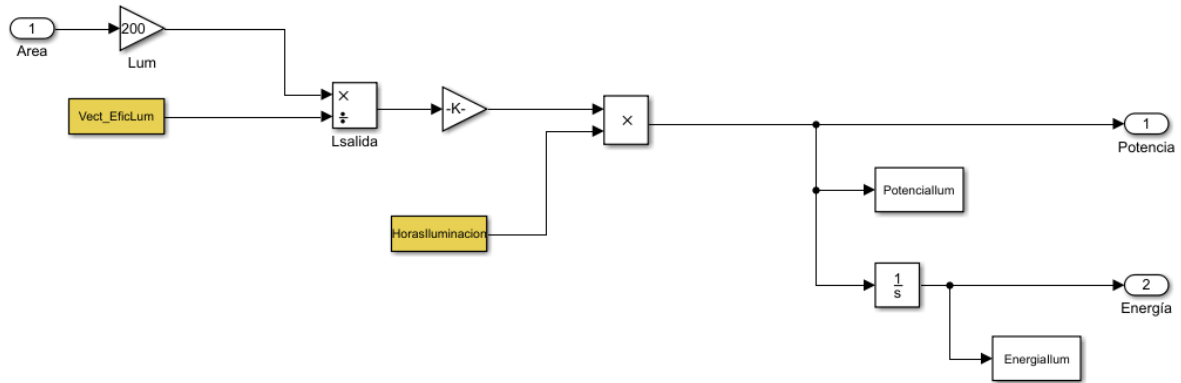
### 3.4. Modelo de una zaranda vibratoria

Modelo generado de un subsistema del comportamiento de una zaranda vibratoria.



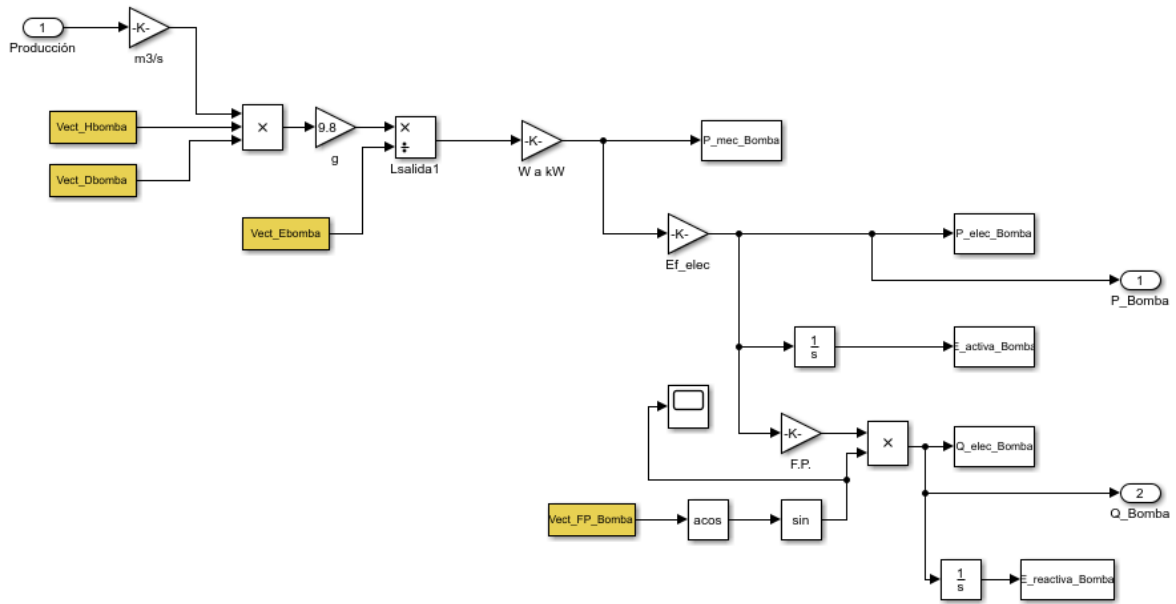
### 3.5. Modelo del sistema de iluminación

Modelo generado de un subsistema del comportamiento del consumo energético del sistema de iluminación de la planta.



### 3.6. Modelo del sistema de riego

Modelo generado de un subsistema del comportamiento del consumo energético del sistema de riego de la planta.



**ANEXO 2.**  
**REGISTRO FOTOGRÁFICO**  
**PLANTA CAÑAVERAL - GRAVICON**

## **1. INTRODUCCIÓN AL REGISTRO FOTOGRÁFICO**

Con el fin de visualizar las descripciones que se han realizado en la memoria del presente trabajo sobre las características operativas de la planta Gravicon y de cada una de las máquinas eléctricas que operan en la planta Cañaveral, se han agregado un registro de fotografías capturadas en las dos visitas que se han realizado a la planta de Gravicon en enero y mayo del año 2019.

Este registro puede ser utilizado para las características descritas en las secciones 2.6, 3.1 y 4.2 de la memoria del proyecto.



## 2. TRITURADORA DE MANDÍBULA LIPPMAN



### 3. TRITURADORA TIPO CONO SYMON – 2DA ETAPA



#### 4. TRITURADORA TIPO CONO METSO – 3RA ETAPA





## 5. ZARANDAS VIBRATORIAS



## 6. BANDAS TRANSPORTADORAS



## 7. INGRESO DEL MATERIAL A LA PLANTA





## 8. SALIDA DEL MATERIAL DE LA PLANTA



## 9. VISTA GENERAL





**ANEXO 3.**  
**TABLA DE PRODUCCIÓN PLANTA CAÑAVERAL BASES DE**  
**DATOS GRAVICON**

<b>dia</b>	<b>fecha</b>	<b>horas</b>	<b>produccion</b>	<b>planta</b>
<b>miercoles</b>	<b>1-may-19</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>cañaveral</b>
jueves	2-may-19	10	2124 m3	cañaveral
viernes	3-may-19	8	1764 m3	cañaveral
sabado	4-may-19	5,08	936 m3	cañaveral
<b>domingo</b>	<b>5-may-19</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>cañaveral</b>
lunes	6-may-19	8,5	1722 m3	cañaveral
martes	7-may-19	5,42	1206 m3	cañaveral
miercoles	8-may-19	8	1656 m3	cañaveral
jueves	9-may-19	9	1728 m3	cañaveral
viernes	10-may-19	3,25	648 m3	cañaveral
sabado	11-may-19	5,02	742 m3	cañaveral
<b>domingo</b>	<b>12-may-19</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>cañaveral</b>
lunes	13-may-19	9	1980 m3	cañaveral
martes	14-may-19	8,03	1692 m3	cañaveral
miercoles	15-may-19	8	1692 m3	cañaveral
jueves	16-may-19	6,08	1260 m3	cañaveral
viernes	17-may-19	3	504 m3	cañaveral
sabado	18-may-19	0	0	cañaveral
<b>domingo</b>	<b>19-may-19</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>cañaveral</b>
lunes	20-may-19	5,03	972 m3	cañaveral
martes	21-may-19	9,53	1944 m3	cañaveral
miercoles	22-may-19	9,53	2052 m3	cañaveral
jueves	23-may-19	4,67	972 m3	cañaveral
viernes	24-may-19	3	648 m3	cañaveral
sabado	25-may-19	6	1116 m3	cañaveral
<b>domingo</b>	<b>26-may-19</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>cañaveral</b>
lunes	27-may-19	9,05	1800 m3	cañaveral
martes	28-may-19	4,83	900 m3	cañaveral
miercoles	29-may-19	10	1512 m3	cañaveral
jueves	30-may-19	10,25	1764 m3	cañaveral
viernes	31-may-19	9	1944 m3	cañaveral

dia	fecha	horas	produccion	planta
sabado	1-jun-19	7	1296 m3	cañaveral
domingo	2-jun-19	0	0	cañaveral
lunes	3-jun-19	0	0	cañaveral
martes	4-jun-19	6	1116 m3	cañaveral
miercoles	5-jun-19	6	1224 m3	cañaveral
jueves	6-jun-19	0	0	cañaveral
viernes	7-jun-19	0	0	cañaveral
sabado	8-jun-19	0	0	cañaveral
domingo	9-jun-19	0	0	cañaveral
lunes	10-jun-19	0	0	cañaveral
martes	11-jun-19	4,67	756 m3	cañaveral
miercoles	12-jun-19	0	0	cañaveral
jueves	13-jun-19	0	0	cañaveral
viernes	14-jun-19	0	0	cañaveral
sabado	15-jun-19	4	684 m3	cañaveral
domingo	16-jun-19	0	0	cañaveral
lunes	17-jun-19	6	1260 m3	cañaveral
martes	18-jun-19	8	1620 m3	cañaveral
miercoles	19-jun-19	5,53	1080 m3	cañaveral
jueves	20-jun-19	9	1728 m3	cañaveral
viernes	21-jun-19	9	1548 m3	cañaveral
sabado	22-jun-19	9	1764 m3	cañaveral
domingo	23-jun-19	0	0	cañaveral
lunes	24-jun-19	0	0	cañaveral
martes	25-jun-19	9,75	1944 m3	cañaveral
miercoles	26-jun-19	8	1656 m3	cañaveral
jueves	27-jun-19	10,42	2016	cañaveral
viernes	28-jun-19	0	0	cañaveral
sabado	29-jun-19	0	0	cañaveral
domingo	30-jun-19	0	0	cañaveral
				cañaveral

<b>dia</b>	<b>fecha</b>	<b>horas</b>	<b>produccion</b>	<b>planta</b>
<b>lunes</b>	<b>1-jul-19</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>cañaver</b>
martes	2-jul-19	8,25	1656 m3	cañaver
miercoles	3-jul-19	9,17	1980 m3	cañaver
jueves	4-jul-19	8	1764m3	cañaver
viernes	5-jul-19	11	2171 m3	cañaver
sabado	6-jul-19	6,75	1224 M3	cañaver
<b>domingo</b>	<b>7-jul-19</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>cañaver</b>
lunes	8-jul-19			cañaver
martes	9-jul-19			cañaver
miercoles	10-jul-19			cañaver
jueves	11-jul-19			cañaver
viernes	12-jul-19			cañaver
sabado	13-jul-19			cañaver
<b>domingo</b>	<b>14-jul-19</b>			<b>cañaver</b>
lunes	15-jul-19			cañaver
martes	16-jul-19			cañaver
miercoles	17-jul-19			cañaver
jueves	18-jul-19			cañaver
viernes	19-jul-19			cañaver
sabado	20-jul-19			cañaver
<b>domingo</b>	<b>21-jul-19</b>			<b>cañaver</b>
lunes	22-jul-19			cañaver
martes	23-jul-19			cañaver
miercoles	24-jul-19			cañaver
jueves	25-jul-19			cañaver
viernes	26-jul-19			cañaver
sabado	27-jul-19			cañaver
<b>domingo</b>	<b>28-jul-19</b>			<b>cañaver</b>
lunes	29-jul-19			cañaver
martes	30-jul-19			cañaver
miercoles	31-jul-19			cañaver

**ANEXO 4.**  
**HOJAS DE DATOS DE MOTORES ELÉCTRICOS**  
**15KW A 300KW**  
**CURVAS DE EFICIENCIA**

## **1. INTRODUCCIÓN A LAS HOJAS DE MOTORES ELÉCTRICOS**

Con el fin de brindar herramientas de ayuda a los usuarios del modelo de predicción energética, se han recopilado datos de motores eléctricos de la empresa WEG con características generales de operación en un rango de 15 a 300 kW de operación nominal.

Estas hojas de datos de los motores a continuación, pueden brindar datos que pueden ser ingresados al modelo en caso que el usuario no cuente con la información necesaria de sus equipos pero cuyas máquinas tengan características nominales de operación a las de las fichas a continuación.

# HOJA DE DATOS



## Motor Trifásico de Inducción - Rotor de Jaula

Cliente	: Vertebra Soluciones				
Referencia del cliente	: Análisis energético				
Línea del producto	: W22 IE2 Trifásico		Código del producto :	12831990	
			Catalog # :	E01518EP3Y160LF3-W22	
Carcasa	: 160L		Tiempo de rotor bloqueado	: 18s (frío) 10s (caliente)	
Potencia	: 15 kW		Elevación de temperatura	: 80 K	
Polos	: 4		Régimen de servicio	: S1	
Frecuencia	: 60 Hz		Temperatura ambiente	: -20°C hasta +40°C	
Tensión nominal	: 460 V		Altitud	: 1000 m	
Corriente nominal	: 25.3 A		Grado de protección	: IP55	
Corriente de arranque	: 172 A		Método de refrigeración	: IC411 - TEFC	
Ip/In	: 6.8		Forma constructiva	: B3T	
Corriente en vacío	: 12.8 A		Sentido de giro <sup>1</sup>	: Ambos	
Rotación nominal	: 1770 rpm		Nivel de ruido <sup>2</sup>	: 64.0 dB(A)	
Resbalamiento	: 1.67 %		Método de Arranque	: Partida directa	
Torque nominal	: 8.25 kgfm		Masa aproximada <sup>3</sup>	: 134 kg	
Torque de arranque	: 260 %				
Torque máximo	: 320 %				
Clase de aislamiento	: F				
Factor de servicio	: 1.00				
Momento de inercia (J)	: 0.1255 kgm <sup>2</sup>				
Categoría	: N				
Potencia	25%	50%	75%	100%	
Rendimiento (%)	89.4	90.2	91.0	91.7	
Cos ?	0.37	0.62	0.75	0.81	
Fuerzas en la fundación					
Tracción máxima : 349 kgf					
Compresión máxima : 482 kgf					
		<u>Delantero</u>		<u>Trasero</u>	
Tipo de cojinete	:	6309 C3		6209 Z C3	
Sello	:	V'Ring		V'Ring	
Intervalo de lubricación	:	20000 h		20000 h	
Cantidad de lubricante	:	13 g		9 g	
Tipo de lubricante	:	Mobil Polyrex EM			
Notas					
Esta revisión substitui y cancela la anterior, la cual deberá ser eliminada. (1) Mirando la punta delantera del eje del motor. (2) Medido a 1m y con tolerancia de +3dB(A). (3) Masa aproximada sujetos a cambios después del proceso de fabricación. (4) Al 100% de la carga completa.			Los valores indicados son valores promedio con base en ensayos y para alimentación en red senoidal, sujetos a las tolerancias de la norma IEC 60034-1.		
Rev.	Resumen de los cambios		Ejecutado	Verificado	Fecha
Ejecutor					
Verificador				Pagina	Revisión
Fecha	08/08/2019			1 / 3	

# HOJA DE DATOS



## Motor Trifásico de Inducción - Rotor de Jaula

Cliente : Vertebra Soluciones  
Referencia del cliente : Análisis energético

### Protección térmica

ID	Aplicación	Tipo	Cantidad	Temperatura de Detección
1	Devanado	Termistor - 2 alambres	1 x Fase	155 °C

Rev.	Resumen de los cambios	Ejecutado	Verificado	Fecha
Ejecutor				
Verificador			Pagina	Revisión
Fecha	08/08/2019		2 / 3	



# CURVA DE DESEMPEÑO EN CARGA

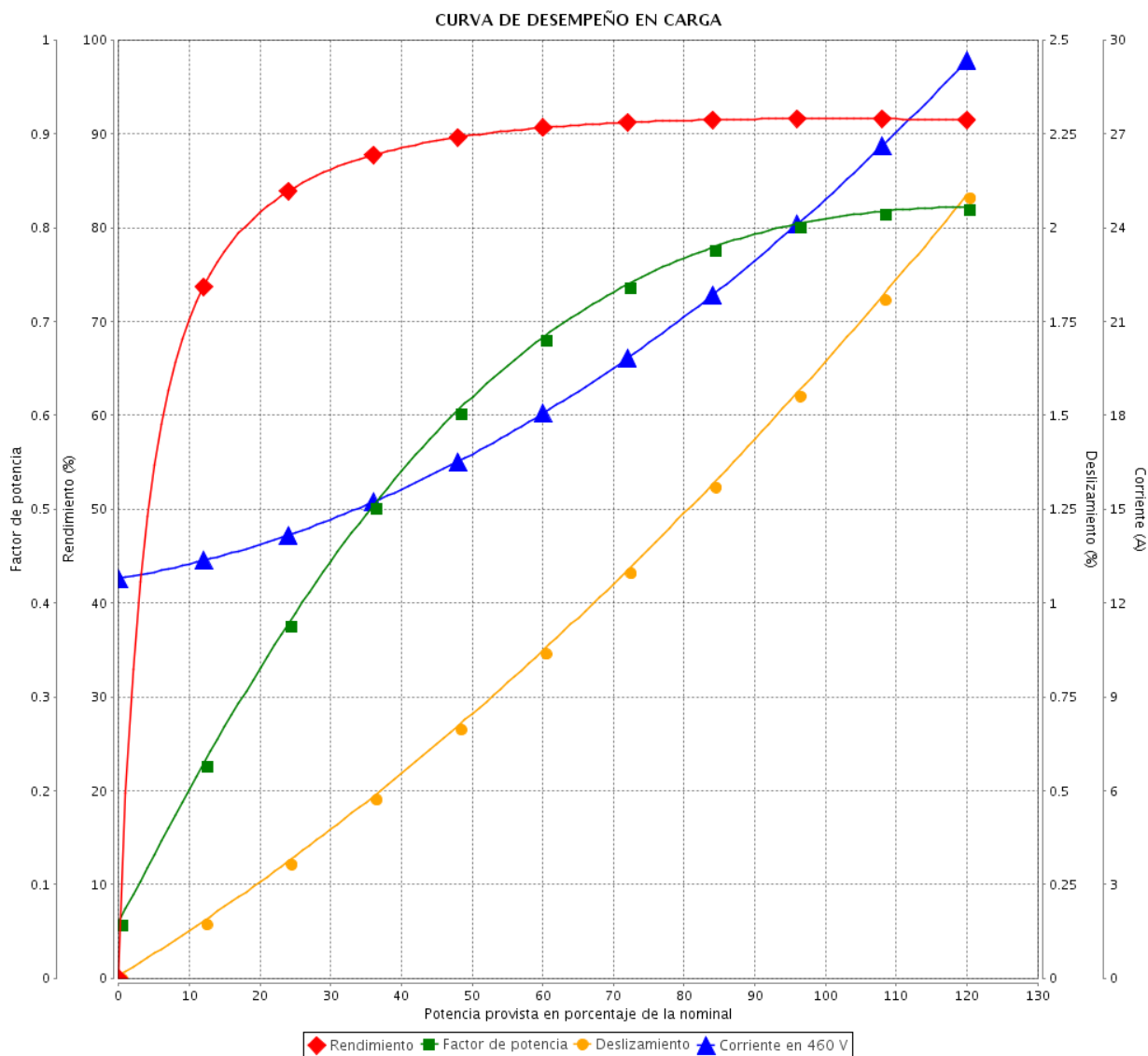


## Motor Trifásico de Inducción - Rotor de Jaula

Cliente : Vertebra Soluciones  
 Referencia del cliente : Análisis energético

Línea del producto : W22 IE2 Trifásico

Código del producto : 12831990  
 Catalog # : E01518EP3Y160LF3-W22



Desempeño : 460 V 60 Hz 4P

Corriente nominal : 25.3 A	Momento de inercia (J) : 0.1255 kgm <sup>2</sup>
Ip/In : 6.8	Régimen de servicio : S1
Torque nominal : 8.25 kgfm	Clase de aislamiento : F
Torque de arranque : 260 %	Factor de servicio : 1.00
Torque máximo : 320 %	Elevación de temperatura : 80 K
Rotación nominal : 1770 rpm	Categoría : N

Rev.	Resumen de los cambios	Ejecutado	Verificado	Fecha
Ejecutor			Página	Revisión
Verificador			3 / 3	
Fecha	08/08/2019			

# HOJA DE DATOS



## Motor Trifásico de Inducción - Rotor de Jaula

Cliente : Vertebra Soluciones Referencia del cliente : Análisis energético						
Línea del producto : W22 IE2 Trifásico	Código del producto : Catalog # :		14421482 E11018EP3Y315SMF3-W2			
Carcasa : 315S/M Potencia : 110 kW Polos : 4 Frecuencia : 60 Hz Tensión nominal : 460 V Corriente nominal : 167 A Corriente de arranque : 1253 A Ip/In : 7.5 Corriente en vacío : 67.5 A Rotación nominal : 1790 rpm Resbalamiento : 0.56 % Torque nominal : 59.8 kgfm Torque de arranque : 240 % Torque máximo : 260 % Clase de aislamiento : F Factor de servicio : 1.00 Momento de inercia (J) : 2.57 kgm <sup>2</sup> Categoría : N	Tiempo de rotor bloqueado : 46s (frío) 26s (caliente) Elevación de temperatura : 80 K Régimen de servicio : S1 Temperatura ambiente : -20°C hasta +40°C Altitud : 1000 m Gradu de protección : IP55 Método de refrigeración : IC411 - TEFC Forma constructiva : B3T Sentido de giro <sup>1</sup> : Ambos Nivel de ruido <sup>2</sup> : 75.0 dB(A) Método de Arranque : Partida directa Masa aproximada <sup>3</sup> : 887 kg					
Potencia	25%	50%	75%	100%	Fuerzas en la fundación	
Rendimiento (%)	92.4	93.0	94.5	95.0	Tracción máxima : 781 kgf	
Cos ?	0.46	0.72	0.84	0.87	Compresión máxima : 1668 kgf	
			<u>Delantero</u>	<u>Trasero</u>		
Tipo de cojinete	:		6319 C3	6316 C3		
Sello	:		WSeal	WSeal		
Intervalo de lubricación	:		11000 h	13000 h		
Cantidad de lubricante	:		45 g	34 g		
Tipo de lubricante	:		Mobil Polyrex EM			
Notas						
Esta revisión substitui y cancela la anterior, la cual deberá ser eliminada. (1) Mirando la punta delantera del eje del motor. (2) Medido a 1m y con tolerancia de +3dB(A). (3) Masa aproximada sujetos a cambios después del proceso de fabricación. (4) Al 100% de la carga completa.			Los valores indicados son valores promedio con base en ensayos y para alimentación en red senoidal, sujetos a las tolerancias de la norma IEC 60034-1.			
Rev.	Resumen de los cambios			Ejecutado	Verificado	Fecha
Ejecutor						
Verificador					Pagina	Revisión
Fecha	08/08/2019				1 / 3	

# HOJA DE DATOS



## Motor Trifásico de Inducción - Rotor de Jaula

Cliente : Vertebra Soluciones  
Referencia del cliente : Análisis energético

### Protección térmica

ID	Aplicación	Tipo	Cantidad	Temperatura de Detección
1	Devanado	Termistor - 2 alambres	1 x Fase	155 °C

Rev.	Resumen de los cambios	Ejecutado	Verificado	Fecha
Ejecutor				
Verificador			Pagina	Revisión
Fecha	08/08/2019		2 / 3	

# CURVA DE DESEMPEÑO EN CARGA

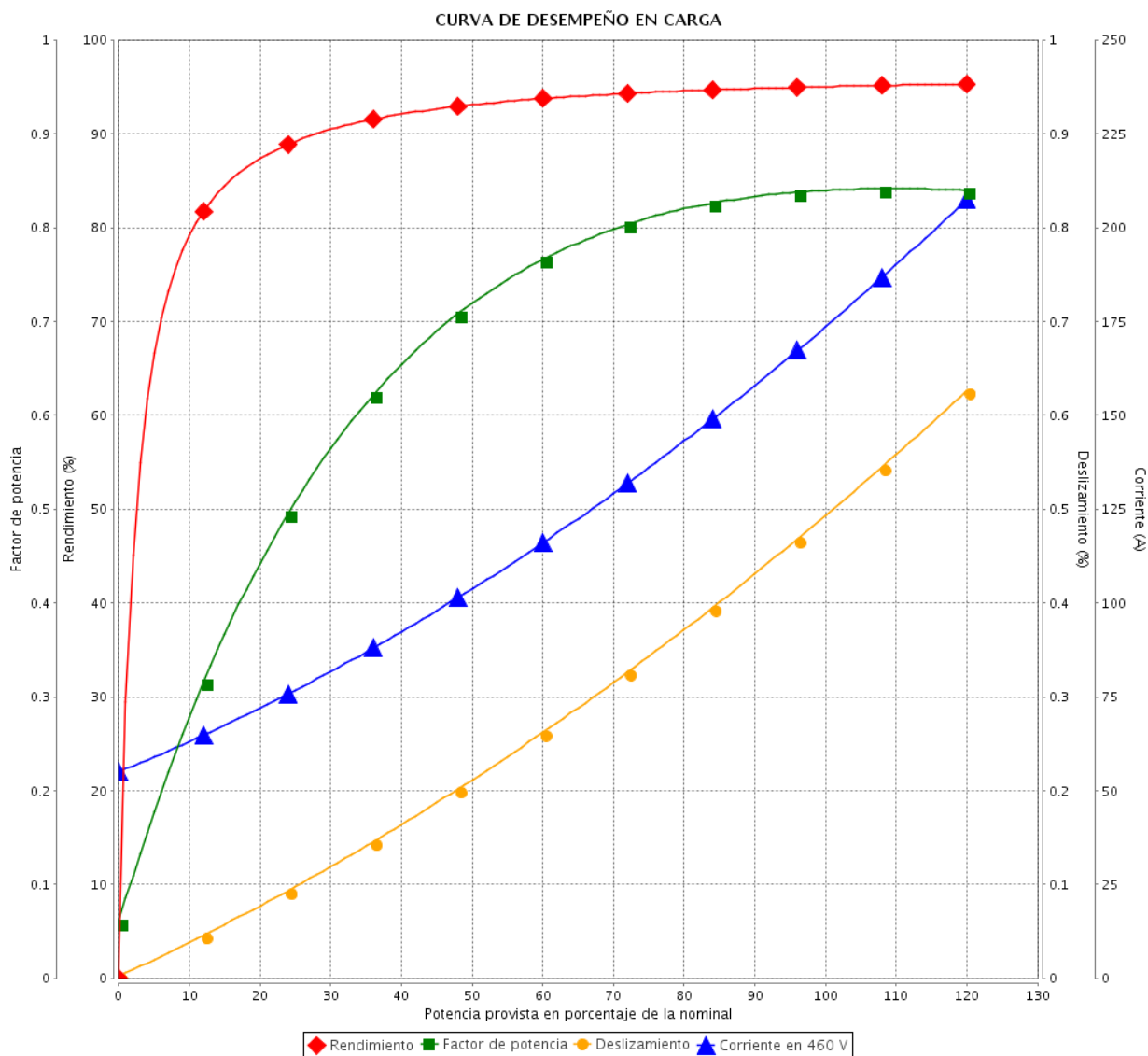


## Motor Trifásico de Inducción - Rotor de Jaula

Cliente : Vertebra Soluciones  
 Referencia del cliente : Análisis energético

Línea del producto : W22 IE2 Trifásico

Código del producto : 14421482  
 Catalog # : E11018EP3Y315SMF3-W2



Desempeño : 460 V 60 Hz 4P

Corriente nominal : 167 A  
 I<sub>p</sub>/I<sub>n</sub> : 7.5  
 Torque nominal : 59.8 kgfm  
 Torque de arranque : 240 %  
 Torque máximo : 260 %  
 Rotación nominal : 1790 rpm

Momento de inercia (J) : 2.57 kgm<sup>2</sup>  
 Régimen de servicio : S1  
 Clase de aislamiento : F  
 Factor de servicio : 1.00  
 Elevación de temperatura : 80 K  
 Categoría : N

Rev.	Resumen de los cambios	Ejecutado	Verificado	Fecha
Ejecutor			Pagina	Revisión
Verificador			3 / 3	
Fecha	08/08/2019			

# HOJA DE DATOS



## Motor Trifásico de Inducción - Rotor de Jaula

Cliente	: Vertebra Soluciones				
Referencia del cliente	: Análisis energético				
Línea del producto	: W22 Tru-Metric IE2 Trifásico		Código del producto :	13025681	
			Catalog # :	30012EP3Y355M/L-W22	
Carcasa	: 355M/L		Tiempo de rotor bloqueado	: 54s (frío) 30s (caliente)	
Potencia	: 400 HP (300 kW)		Elevación de temperatura	: 80 K	
Polos	: 6		Régimen de servicio	: S1	
Frecuencia	: 60 Hz		Temperatura ambiente	: -20°C hasta +40°C	
Tensión nominal	: 460 V		Altitud	: 1000 m	
Corriente nominal	: 513 A		Grado de protección	: IP55	
Corriente de arranque	: 3796 A		Método de refrigeración	: IC411 - TEFC	
Ip/In	: 7.4		Forma constructiva	: B3L(E)	
Corriente en vacío	: 250 A		Sentido de giro <sup>1</sup>	: Ambos	
Rotación nominal	: 1190 rpm		Nivel de ruido <sup>2</sup>	: 77.0 dB(A)	
Resbalamiento	: 0.83 %		Método de Arranque	: Partida directa	
Torque nominal	: 241 kgfm		Masa aproximada <sup>3</sup>	: 2114 kg	
Torque de arranque	: 250 %				
Torque máximo	: 250 %				
Clase de aislamiento	: F				
Factor de servicio	: 1.15				
Momento de inercia (J)	: 14.3 kgm <sup>2</sup>				
Categoría	: N				
Potencia	25%	50%	75%	100%	
Rendimiento (%)	94.9	95.0	95.4	95.4	
Cos ?	0.34	0.57	0.70	0.77	
			Fuerzas en la fundación		
			Tracción máxima : 3534 kgf		
			Compresión máxima : 5648 kgf		
		<u>Delantero</u>		<u>Trasero</u>	
Tipo de cojinete	:	6322 C3		6319 C3	
Sello	:	WSeal		WSeal	
Intervalo de lubricación	:	11000 h		13000 h	
Cantidad de lubricante	:	60 g		45 g	
Tipo de lubricante	:	Mobil Polyrex EM			
Notas					
Esta revisión substitui y cancela la anterior, la cual deberá ser eliminada. (1) Mirando la punta delantera del eje del motor. (2) Medido a 1m y con tolerancia de +3dB(A). (3) Masa aproximada sujetos a cambios después del proceso de fabricación. (4) Al 100% de la carga completa.			Los valores indicados son valores promedio con base en ensayos y para alimentación en red senoidal, sujetos a las tolerancias de la norma NEMA MG-1.		
Rev.	Resumen de los cambios		Ejecutado	Verificado	Fecha
Ejecutor					
Verificador				Pagina	Revisión
Fecha	08/08/2019			1 / 2	

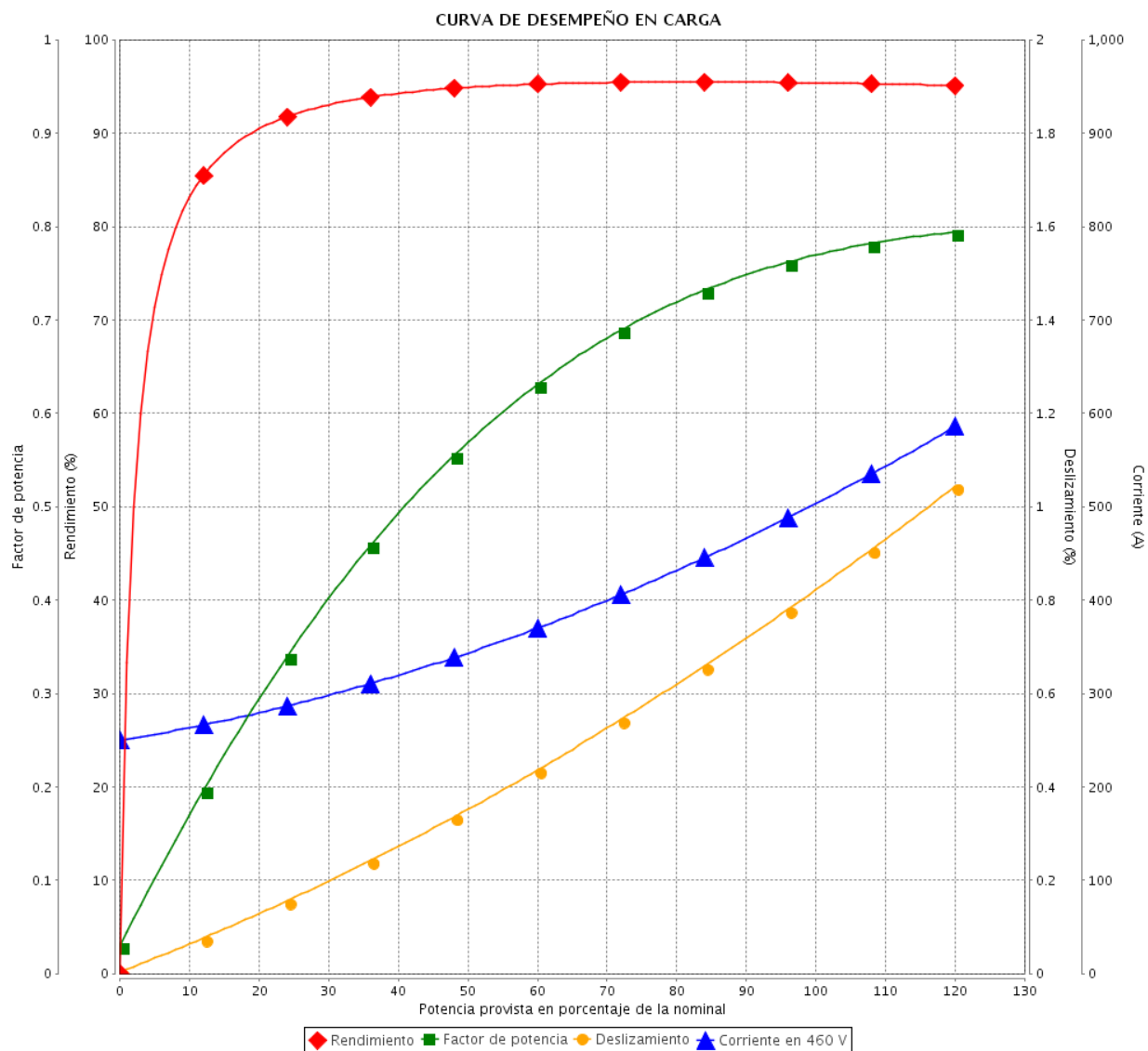
# CURVA DE DESEMPEÑO EN CARGA



## Motor Trifásico de Inducción - Rotor de Jaula

Cliente : Vertebra Soluciones  
 Referencia del cliente : Análisis energético

Línea del producto : W22 Tru-Metric IE2 Trifásico  
 Código del producto : 13025681  
 Catalog # : 30012EP3Y355M/L-W22



Desempeño : 460 V 60 Hz 6P

Corriente nominal : 513 A	Momento de inercia (J) : 14.3 kgm <sup>2</sup>
Ip/In : 7.4	Régimen de servicio : S1
Torque nominal : 241 kgfm	Clase de aislamiento : F
Torque de arranque : 250 %	Factor de servicio : 1.15
Torque máximo : 250 %	Elevación de temperatura : 80 K
Rotación nominal : 1190 rpm	Categoría : N

Rev.	Resumen de los cambios	Ejecutado	Verificado	Fecha
Ejecutor			Pagina 2 / 2	Revisión
Verificador				
Fecha	08/08/2019			

**ANEXO 5.**  
**FICHAS TÉCNICAS DE LOS PRINCIPALES EQUIPOS**  
**INSTALADOS EN GRAVICON**

## **1. INTRODUCCIÓN A LAS FICHAS TÉCNICAS DE LOS EQUIPOS DE GRAVICON**

Con el fin de mostrar el caso de Gravicon como el ejemplo inicial del modelo de predicción energética, hemos adjuntado las fichas técnicas disponibles de los principales equipos que operan actualmente en la planta Cañaveral de Gravicon.

Estas fichas técnicas pueden ser utilizadas para comprobar que la mayoría de los datos de entrada que se piden de cada una de estas máquinas pueden ser encontradas en sus hojas de datos, lo cual demuestra la sencillez de uso del modelo.



# Nueva generación de molinos de cono HP3, HP4 y HP6



Creative  
performance







HP3

HP4

HP6



# Nueva generación de molinos de cono: Creative performance

No hay mejor opción que un molino de cono cuando lo que busca es:

- Alta productividad,
- Bajo coste operativo y de repuestos.,
- Larga vida útil.
- Alto rendimiento, con curva granulométrica de salida constante y forma adecuada.

Metso lidera este sector, con los molinos de cono de alto rendimiento Serie HP para la fabricación de áridos y la minería. La Serie HP (High Performance) se caracteriza por una única combinación de velocidad de rotación, excéntrica y diseño de cámara. Esta combinación se ha renovado para proporcionar una mayor capacidad de producción, una mejor calidad de producto y proporcionar un mas amplio rango de aplicación:

- Desde caliza a taconita,
- Desde balasto a arena,
- Desde un grupo móvil a una gran planta fija.

La calidad contrastada de los molinos HP aporta un rendimiento incomparable en aplicaciones secundarias, terciarias e incluso cuaternarias. Proporcionando, además, la más alta capacidad, mejor forma en el producto final, mayor flexibilidad, máxima fiabilidad y una sencilla automatización.

## La nueva generación

El HP3 continúa con el éxito del HP4 y el HP6 representando el tercer modelo de toda una nueva generación de trituradoras de cono de alto rendimiento, que recoge los últimos avances de Metso en tecnología de trituración. Su robusto diseño es consecuencia de más de 70 años de fabricación de trituradores de cono Symons, conocidos mundialmente por su durabilidad y su versatilidad. Sus avances, en el ahorro trabajo manual, como el ajuste hidráulico, el sistema anti intriturbables y el dispositivo de limpieza de la cámara de trituración, se emplearon en los innovadores Nordberg Omnicone y en la primera generación de las molinos de cono HP.

Además, el nuevo HP tiene características únicas tales como, grados de reducción mas altos, mayor sencillez de manejo, mayor rendimiento y los costos mas bajos de mantenimiento y operación. Produce más cantidad y mejor calidad de producto, a la vez que mejora el entorno laboral y respeta el medio ambiente.

## Diseñado para sus necesidades

En el dinámico panorama actual del sector de trituración y cribado o se innova y adapta

o se pierde competitividad. Por eso Metso escucha a sus clientes, con el fin de encontrar la solución para satisfacer sus necesidades y tener éxito en sus proyectos. Muchos clientes tenían problemas para alcanzar una alta capacidad de trituración terciaria o cuaternaria con una máquina que fuera:

- Simple.
- Robusta, preparada para reglajes mínimos.
- De mínimos costes operativos.
- Con capacidad para retriturar.

El equipo de Investigación y Desarrollo de Metso ha afrontado este desafío con el nuevo HP. Está diseñado para afrontar las aplicaciones más duras, con gran versatilidad y maximizando la productividad a la vez que minimiza los costes.

## Nueva familia de molinos de cono

- El mayor rendimiento.
- Menor tiempo de parada.
- Sencillez de Mantenimiento.
- Consumo Eficiente.
- Versatilidad.





Tecnológicamente única, la nueva generación de trituradoras de cono ofrece un rendimiento sin precedentes. Su mantenimiento fácil y seguro garantizan la máxima fiabilidad.

# Ventajas Económicas

## El mayor rendimiento

La nueva generación de trituradoras permite la producción de productos mucho más finos con menos etapas de trituración. De ese modo reduce la inversión y el consumo energético. ¿cómo se logra esto? Combinando una velocidad óptima y una gran excentricidad, el HP proporciona el mayor grado de reducción posible. Como consecuencia de la supereficiente acción de trituración, el HP dispone del rendimiento energético de los molinos de su tamaño. Ahorrando dos veces, con menos kWh por tonelada triturada y con menos cantidad de carga circulante debido a su alto grado de reducción. La mayor densidad de roca en el interior de la cavidad de trituración, mejora la autotrituración entre partículas, consiguiendo una mejor curva de salida y una mejor cubricidad en el producto. La nueva generación de trituradoras conserva el conocido diseño de rotación de la mandíbula fija. Estudios comparativos demuestran que este sistema conserva mejor el reglaje del molino y consigue un desgaste más uniforme de las piezas de trituración. Además, la utilización de un nuevo sistema de protección contra intrituras, con punto de retorno fijo, asegura instantáneamente el reglaje adecuado del molino una vez a pasado la pieza intriturable.

## Less downtime

Otra ventaja añadida del HP es la reducción del tiempo de parada y una mayor confianza del operario en el equipo. El sistema de

cilindros hidráulicos de protección contra intrituras del HP permite que el paso de piezas metálicas, que podrían atascar o dañar, la mayoría de los otros molinos. En caso de una parada en carga, el sistema de cilindros hidráulicos duales proporciona un gran distancia de apertura para la limpieza de la cámara de trituración, independiente del estado de desgaste de las piezas de trituración.

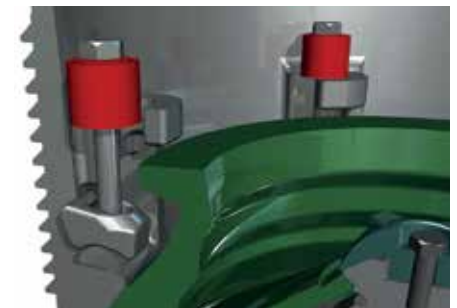
El nuevo sistema de fijación de forros evita la necesidad de usar resinas o fluidos de fijación, permitiendo un rápido y seguro cambio de las piezas de desgaste. Unos forros más gruesos significa, mayor duración de los mismos. Cuando los forros se sustituyen o si se cambia la cámara de trituración, el mismo motor hidráulico que gira la taza para el ajuste del reglaje, lo hace también, por completo, para la apertura del molino, simplificando enormemente la sustitución de las piezas de trituración. Una vez abierto el triturador, al extraer la cabeza del molino se encuentra el nuevo sistema fijo de protección del contrapeso, que incluye sello de polvo.

## Sencillez de Mantenimiento

Los casquillos de bronce que se montan en el molino están diseñados para trabajar en condiciones de trituración extremas y ambientes pulverulentos. Su coste es menor que el de los rodamientos de bolas y son más sencillos de sustituir con herramientas comunes. El nuevo HP es fácil de desmontar, todos los componentes son accesibles, la taza y la cabeza se pueden quitar fácilmente sin obstáculos que estorben.



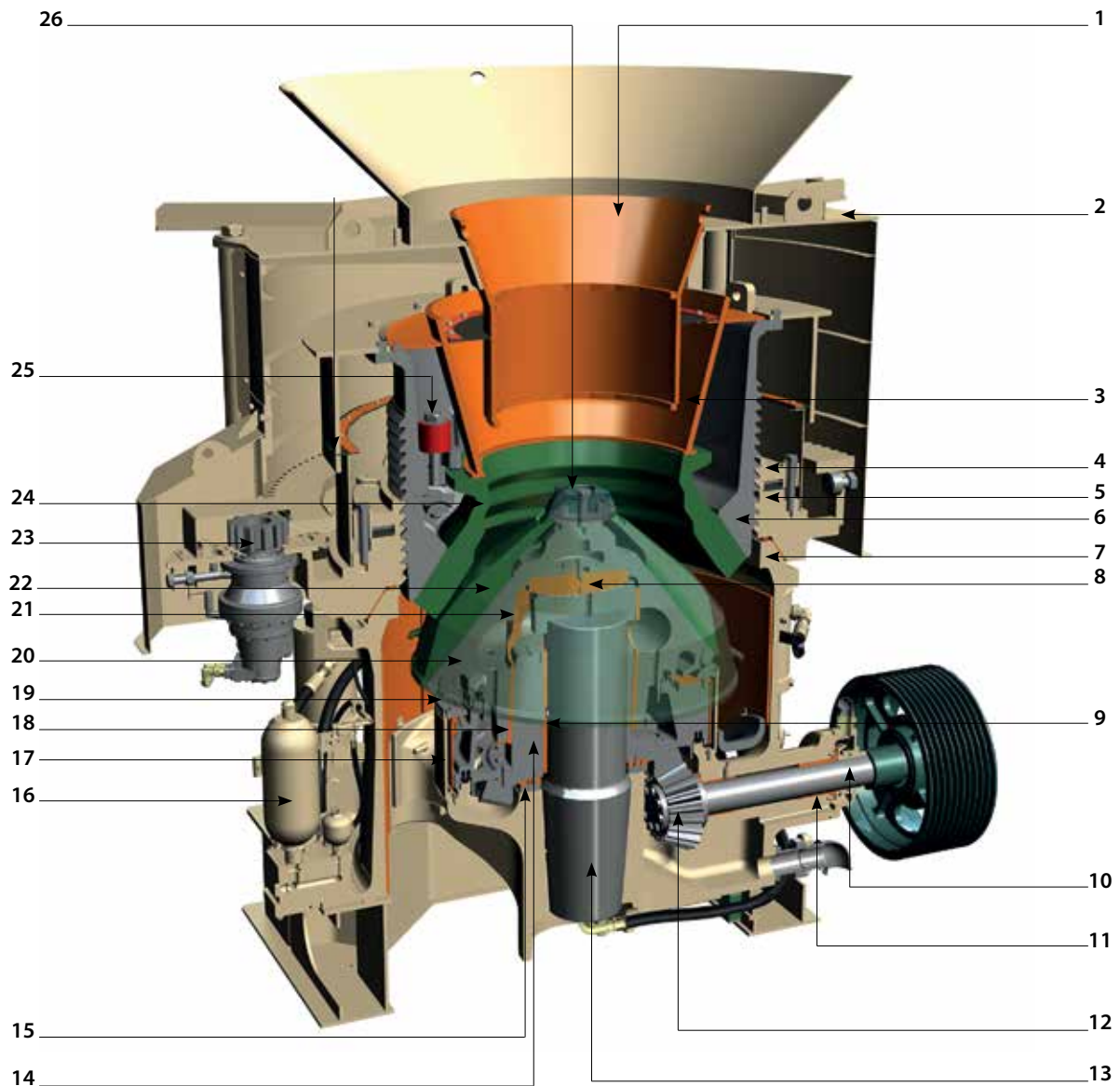
Alta fuerza de trituración



cambio de forros



Desmontaje del triturador



- |                                 |  |                                  |
|---------------------------------|--|----------------------------------|
| 1 - Condiciones de alimentación | 10 - Contraeje                                     | 19 - Sistema antigiro            |
| 2 - Escudo de protección        | 11 - Cojinetes de contraeje                        | 20 - Cabeza                      |
| 3 - Tolva de alimentación       | 12 - Corona y piñón                                | 21 - Cojinete superior de cabeza |
| 4 - Anillo de bloqueo           | 13 - Eje principal                                 | 22 - Forro móvil                 |
| 5 - Anillo de ajuste            | 14 - Excéntrica                                    | 23 - Motor hidráulico            |
| 6 - Taza                        | 15 - Cojinete de apoyo de excéntrica               | 24 - Forro de taza               |
| 7 - Bastidor                    | 16 - Dispositivo de protección anti-intriturbables | 25 - Fijación del forro de taza  |
| 8 - Quicionera                  | 17 - Blindaje del contrapeso                       | 26 - Cono distribuidor           |
| 9 - Cojinete de excéntrica      | 18 - Cojinete inferior de cabeza                   |                                  |

## VENTAJAS ECONÓMICAS

### Consumo Eficiente

Además de estar equipada con lo último en motores de alto rendimiento, la nueva generación de trituradoras HP proporciona la capacidad de producción más alta de las trituradoras equipadas con esa potencia.

El resultado mejora la eficiencia (menos energía consumida, más rendimiento), reduciendo además las emisiones de CO<sub>2</sub>, lo que hace de esta generación de trituradoras de cono HP las máquinas de trituración más ecológicas del mercado.

### Versatilidad

Debido a su robustez, al amplio rango de velocidades de giro y la sencillez de conversión desde aplicaciones de trituración gruesa a aplicaciones de trituración fina, la nueva generación de trituradoras se caracteriza por una flexibilidad de aplicación desconocida hasta ahora.

- Permite el ahorro de espacio para stocks o en el movimiento de materiales, mediante la retritución de excedentes.
- Permite su conversión de grueso a extrafino o viceversa, solo con el cambio de las piezas de desgaste y variando las velocidades de giro.
- La combinación de piezas de trituración y velocidades de giro hacen que el HP

pueda funcionar desde como molino secundario hasta como molino arenoso.

### Protección activa

El nuevo diseño del sistema de protección contra intríntrables, permite retornar la taza del molino a su posición original, después de amortiguar las fuerzas de impacto, producidas por la introducción de un metal en la cámara de trituración, protegiendo el bastidor del molino. En el interior, el nuevo sistema fijo de protección del contrapeso incluye sello de polvo.

Una cubierta opcional alrededor del molino protege a los operarios de cualquier contacto accidental con los dispositivos de reglaje o de protección contra intríntrables. Además, esta protección hace más segura la instalación y reduce las emisiones de polvo. El no usar ningún tipo de resina para la fijación de las piezas de trituración hace del HP una máquina más respetuosa con el medioambiente.

### Automatización IC 7000

- **Automatización Básica IC7000:** Es un sistema de básico que controla los principales parámetros del molino (secuencia de arranque y parada, protección ante calentamientos o demandas excesivas de potencia y



Nuevo diseño del dispositivo de protección anti-intríntrables.

diagnóstico de fallos.

- **Automatización Avanzada IC7000:** Avanzado sistema de control sobre todos los parámetros del molino, incluyendo reglaje, control de alimentación, modo control de potencia absorbida, modo de funcionamiento invernal.



Automatización IC7000

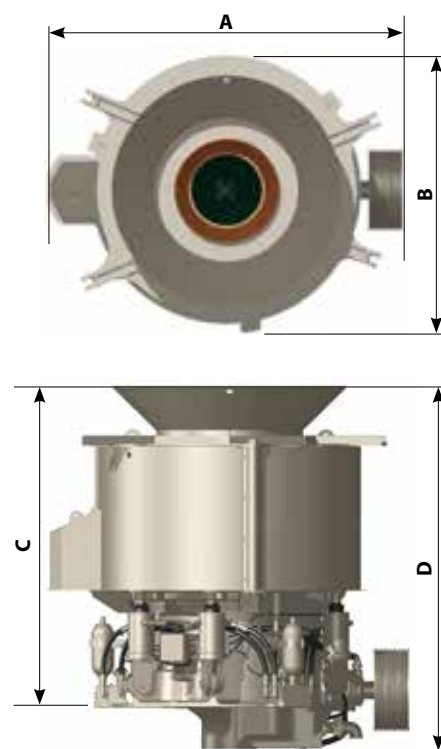


Dimensiones				
	A	B	C	D
HP3	2 778 mm	2 146 mm	2 475 mm	2 817 mm
HP4	2 955 mm	2 250 mm	2 156 mm	2 549 mm
HP6	3 854 mm	3 062 mm	3 522 mm	3 953 mm

Características técnicas				
	Apertura de alimentación	Potencia máxima recomendada	Peso del molino	Peso del molino completo*
HP3	220 mm	220 kW	13 040 kg	17 600 kg
HP4	252 mm	315 kW	19 810 kg	25 800 kg
HP6	330 mm	450 kW	33 000 kg	45 400 kg

\* Peso del molino completo : Molino + soporte, soporte de motor, protecciones, tolvas de alimentación y descarga.

Cámaras de trituración						
	HP3		HP4		HP6	
Cámara	Reglaje Mínimo mm	Abertura de Alimentación mm	Reglaje Mínimo mm	Abertura de Alimentación mm	Reglaje Mínimo mm	Abertura de Alimentación mm
Extra Gruesa	25	200	28	237	30	328
Gruesa	20	183	25	203	25	279
Media	15	156	16	158	20	196
Fina	11	95	10	116	13	106
Extra Fina	8	18	8	67	9	52

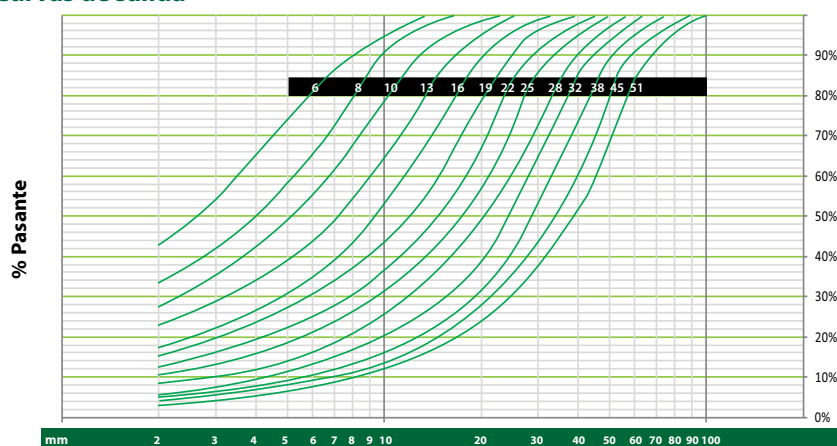


### Capacidad

Las cifras de producción son aproximadas y sirven para dar una idea de la capacidad del molino. Estas cifras se han obtenido triturando en circuito abierto, roca de masa específica 2,6 kg/dm<sup>3</sup> como el granito normal. Un molino es una parte de un proceso, su funcionamiento depende, entre otras cosas, de la triturabilidad y densidad de la roca, de la adecuada selección y funcionamiento de alimentadores, transportadores, cribas, estructuras soporte, motores eléctricos, transmisiones y conductos. **Contacte con nosotros para la elección de la máquina adecuada, para su aplicación.**

Reglaje ado cerrado											
		8 mm	10 mm	13 mm	16 mm	19 mm	22 mm	25 mm	32 mm	38 mm	45 mm
HP3	t/h	94-122	108-147	136-185	164-220	182-241	199-262	210-279	217-307	251-349	279-388
HP4		135-175	155-210	195-265	235-315	260-345	285-375	300-400	310-440	360-500	400-555
HP6		220-300	280-380	335-450	370-490	410-535	430-570	440-630	515-715	570-790	

### Curvas de salida\*



\* Las curvas de salida de producto y las producciones indicadas, varían dependiendo de la curva de alimentación al molino, de la cámara de trituración seleccionada y de la densidad, limpieza, y triturabilidad de la roca que se procesa.

## Equipo de trituración y cribado de Metso Mining and Construction

### Familias de productos:

#### Trituradoras

- Trituradoras de mordazas de la serie C
- Trituradoras giratorias SUPERIOR®
- Trituradoras de conos de la serie GP
- Trituradoras de conos de la serie HP
- Trituradoras de conos de la serie MP
- Trituradoras de impacto horizontal de la serie NP
- Trituradoras de impacto vertical de la serie Barmac

#### Cribas

- Cribas de la serie DF
- Cribas de la serie CVB
- Cribas de la serie ES
- Cribas de la serie TS
- Cribas de la serie MF
- Cribas de la serie RF

#### Alimentadores

- Alimentadores de la serie TK
- Alimentadores de la serie VF
- Alimentadores de la serie LH.G
- Alimentadores de la serie VG
- Alimentadores de la serie PF
- Alimentadores de la serie HRBM

#### Plantas de cribado y trituración móviles

- Plantas de trituración montadas sobre orugas de la serie LT de Lokotrack
- Plantas de trituración montadas sobre orugas de la serie ST de Lokotrack
- Cintas transportadoras montadas sobre orugas y ruedas de las series CT y CW de Lokotrack
- Plantas de trituración y cribado montadas sobre ruedas de la serie NW de Nordberg

#### Plantas de trituración fijas

- Plantas completas para la producción de agregados
- Plantas completas para aplicaciones de reciclaje



[www.metso.com/miningandconstruction](http://www.metso.com/miningandconstruction)  
[minerals.info.csr@metso.com](mailto:minerals.info.csr@metso.com)

## Mining and Construction Technology main contacts

### AUSTRALIA AND NEW ZEALAND

#### Metso Minerals (Australia) Ltd

1110 Hay Street  
West Perth, WA 6005  
Australia  
Phone: +61 8 9420 5555  
Fax: +61 8 9320 2500

### CHINA

#### Metso Minerals (Beijing) Ltd

19/F, The Exchange Beijing, Tower 4,  
No. 118 Jian Guo Lu Yi Chaoyang District  
100022 Beijing,  
China  
Phone: +86 10 6566 6600  
Fax: +86 10 6566 2583

### EUROPE, MIDDLE EAST AND AFRICA

#### Metso Minerals España, S.A.

C/ Rivas N° 4  
28032 Madrid  
Spain  
Phone: +34 91 825 5700  
Fax: +34 91 825 5740

### INDIA AND ASIA-PACIFIC

#### Metso Minerals (India) Pvt Ltd

1st Floor, DLF Building No. 10,  
Tower A, DLF Cybercity  
DLF Phase II,  
Gurgaon 122002  
India  
Phone: +91 124 235 1541  
Fax: +91 124 235 1601

### NORTH AND CENTRAL AMERICA

#### Metso Minerals Industries Inc.

20965 Crossroads Circle  
Waukesha, WI 53186  
U.S.A.  
Phone: +1 262 717 2500  
Fax: +1 262 717 2504

### RUSSIA AND OTHER CIS COUNTRIES

#### ZAO Metso Minerals (CIS)

V.O. Liniya, 70  
199178 St. Petersburg  
Russia  
Phone: +7 812 740 3040  
Fax: +7 812 740 5775

### SOUTH AMERICA

#### Metso Minerals Indústria e Comércio Ltda

Avenida Independência, 2500 - Éden  
18087-050 Sorocaba  
Brazil  
Phone: +55 15 2102 1300  
Fax: +55 15 2102 1696

### METSO'S MINING AND CONSTRUCTION TECHNOLOGY

Lokomonkatu 3, P.O. Box 306  
FI-33101 Tampere  
Finland  
Phone: +358 20 484 142  
Fax: +358 20 484 143



## Inquiry/Specification form

Please fill out the form below.

Product to be handled	Name			
	Bulk density	g/cc	True density	g/cc
	Particle distribution	( ~ )mm	%	
		( ~ )mm	%	
		( ~ )mm	%	
		( ~ )mm	%	
		( ~ )mm	%	
	Max lump	mm	Moisture content	%
Temperature	°C	Angle of repose	degree	
Property of product	<input type="checkbox"/> Sticky	<input type="checkbox"/> Absorbent	<input type="checkbox"/> Corrosive	
	<input type="checkbox"/> Others ( )			

Specification of machine	Order quantity			
	Handling capacity	Max. t/h	Nor. t/h	Min. t/h
	Operating interval	Run( )minutes	Stop( )minutes	
	Operating time	( )day/year	( )hr/day	
	Method of feeding	<input type="checkbox"/> Consecutive		<input type="checkbox"/> Batch
	Installation	<input type="checkbox"/> Indoor		<input type="checkbox"/> Outdoor
	Type of needed	<input type="checkbox"/> SBM	<input type="checkbox"/> RVS	<input type="checkbox"/> SF
		<input type="checkbox"/> Others ( )		
	Trough	<input type="checkbox"/> Uncovered		<input type="checkbox"/> Covered with outlet
Material of trough				
Size of trough	W	L	H	

Specification of screen	Number of decks		Material	
	Opening	mesh or mm	Type of opening	

Power source	Voltage	AC	V	Frequency	Hz
--------------	---------	----	---	-----------	----

For safe and reliable operation, it is essential to read the user's manual carefully before using this equipment.

We have a new slogan in Japan; "ECOing" a combination of "eco" and "ing". This is to promote eco-friendly technological development and manufacturing. Our ecological activities are of course not limited to Japan and practiced in many countries around the world.

### SINFONIA TECHNOLOGY CO., LTD.

Shiba NBF Tower, 1-30, Shibadaimon 1-chome, Minato-ku, Tokyo, 105-8564, Japan  
TEL +81-3-5473-1864 FAX +81-3-5473-1845

---

**SINFONIA TECHNOLOGY (THAILAND) CO., LTD. Bangkok Sales Office**

12th Floor Room 1205, 319 Chamchuri Square Building, Phayathai Road, Pathumwan Bangkok Bangkok 10330  
TEL +66-2160-5068 FAX +66-2160-5069

**SINFONIA TECHNOLOGY (SINGAPORE) PTE. LTD.**

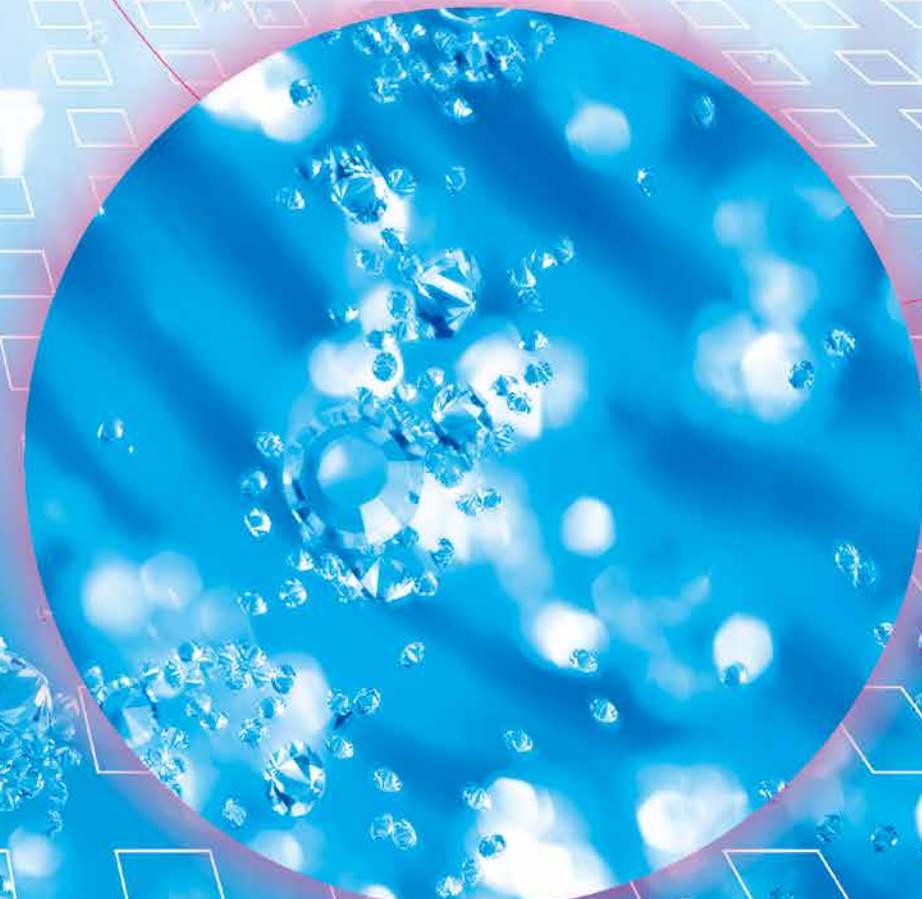
96 Robinson Road, #13-02 SIF Building, Singapore 068899  
TEL +65-6223-6122 FAX +65-6225-2729

**PT. SINFONIA TECHNOLOGY INDONESIA**

Graha Paramita 8th Floor Suite E Jl. Denpasar Raya Block D2 KAV. 8 Kuningan, Jakarta 12940 Indonesia  
TEL +62-21-252-3606 FAX +62-21-252-3608

CODE E95-002 Content of this catalogue may change due to product improvement without notice. URL <http://www.sinfo-t.jp/eng> Printed in Japan 2015 07B II ©

# Vibrating Screens



**SINFONIA**  
SINFONIA TECHNOLOGY CO., LTD.



# Vibrating Screens

## SINFONIA Vibrating Screens realize high-quality sifting precisely matching materials and applications.

Sifting, one of the important processes in handling of powder and granular materials today, requires ever finer and wider ranges of vibration screens.

SINFONIA with its original vibration technique continues to design excellent sifting systems to meet customers' requirements for more efficient, more precise screening.

The products cover a wide range of applications in food, pharmaceutical, chemical, steel, quarry industries, etc. and win reputation and confidence of the markets.

The Vibrating Screens produced with accumulated technical know-how and strict quality control are available in a variety of types by designs and drive sources, including electromagnetic forces, direct motor vibration, eccentric shaft rotation, etc. ; customers are provided with the optimum system by combination of mesh, capacity, and shake according to their particle size, shape, and properties, along with flow rate, purpose, location, working conditions, etc.

### Features

#### Wide variation

We produce various types of vibrating screens including electromagnetic screens using electromagnetic forces, RV Screen using direct motor vibration, and balanced screens using eccentric-shaft, in order to achieve the optimum sifting performance matching customers' materials, purposes, and conditions.

#### Safe, vibration isolating structure

Our vibrating screens affect less to work environment, and be used safely for a long time.

#### Straightforward servicing and maintenance

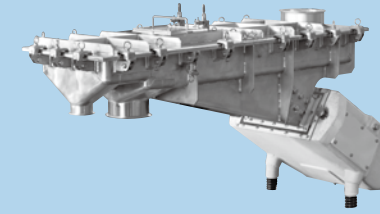
A simple structure of vibrating screen and robust body with very few rotating/wearing parts saves time for maintenance check, and maintain consistent performance.

#### Optimum design in accordance with respective needs

There are various available types of screen, covers, inlets and outlets of vibrating screen. Special specifications such as dust-tight, explosion-proof specifications of vibrating screens are also available upon request and use conditions.

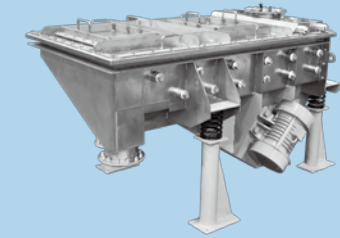
### Products

Best suited for fine powder treatment in food and chemical industries.



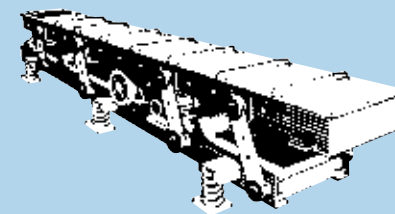
SF Type Electromagnetic Screens P.5

Operable in wide area, from food to steel industries.



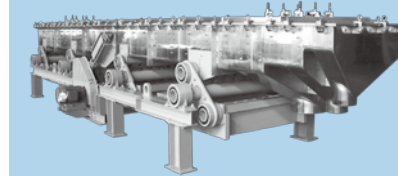
RVS Type Rotary Vibrating Screens P.7

Sift and convey at the same time.



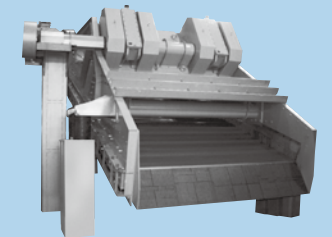
SMVCB Type Balanced Screens P.9

Closed line and long line structures can be made easily.



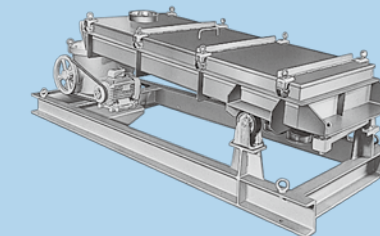
SBM Type Perfect Balance Screens P.11

Efficiently sift high volume.



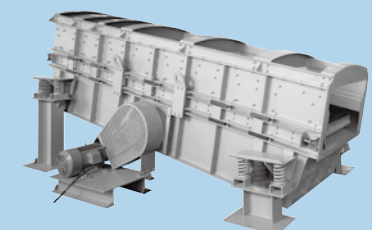
LDS Type Linear Drive Screens P.13

Sift by unique horizontal-swing motion.



GYS Type Gyrotary Screens P.15

Avoid clogging by wavemotion sifting.



KRS Type Wave Screens P.17





### Model list

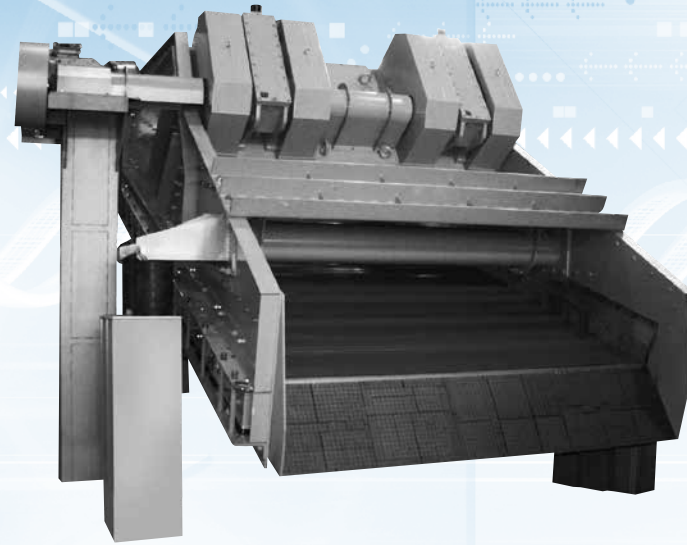
Model	Applications	Drive method		Amplitude (mm)		Vibrating frequency per min.50/60Hz		Amplitude adjustment	Clogging prevention	Recommended screen opening	Explosion proof structure	Installation method
SF Type Electromagnetic Screens	Frequently used as screening combined with cutting out function. Also combined and used with weighing machines. Most suitable for removing lumps and wasters of resin pellets, and for fine powders in chemical, food and other industries.	Direct linear drive utilizing swing force of leaf spring amplified by electromagnetic vibration.		0-1.5		3000/3600		*1	—	150mesh-50mm	*4	Floor mounted / suspension Horizontal or quasi-horizontal
RVS Type Rotary Vibrating Screens	Suitable for a wide variety of process in feed, food, chemical, ceramic and other industries. Mainly middle sized materials up to 1800x2000 (mm).	Rotary vibrator is mounted directly on trough for direct transmission of vibrations to trough and screen.		4P	2-4	1450/1710		*2	Tapping ball is required.	150mesh-30mm	*4	Floor mounted / suspension Horizontal or inclined
				8P	5-8	720/850						
SMVCB Type Balanced Screens	Screen used at various types of industries, and having not only screening function but also conveying function. Suitable for screening and conveying moldings and resin powder, alumina, and more.	Resonant type elastic drive using 3-phase induction motor and eccentric shaft.		8-18		450-650		*2	Tapping ball is required.	150mesh-50mm	—	Floor mounted / suspension Horizontal or quasi-horizontal
SBM Type Perfect Balanced Screens	Capable of tightly-covered construction or long model easily; most suitable for fine powder in chemical, food and other industries.	Perfectly balanced type elastic drive using 3-phase induction motor and eccentric shaft.		8-20		450-650		*2	Tapping ball is required.	150mesh-50mm	*4	Floor mounted / suspension Horizontal or quasi-horizontal
LDS Type Linear Drive Screens	Large screen used for screening coke, coal, sintered ore, iron ore, copper ore, limestone, crushed stone, etc.	Forced drive using 3-phase induction motor and unbalanced weight to get linear motion.		6P	9	6P	980/-	—	—	5mm-50mm	*4	Floor mounted Inclined
				8P	10	8P	-/880					
GYS Type Gyratory Screens	Suitable for fine powder to minute powder because screen cloth vibrates roundly without vertical vibration. Therefore, it is very rare to pass columnar materials. Thus, it's suitable for special use such as removing pellet waste.	Horizontal swing using 3-phase induction motor, vertical eccentric shaft and roller.		50-70		250-200		—	Tapping ball is required.	150mesh-1mm	*4	Floor mounted Inclined
KRS Type Wave Screens	Wave screen can handle various kinds of granular materials that used to be difficult to handle continuously in the past because of clog. This is especially suitable for humid materials such as piled.	Combination drive receiving mixture of both round vibration from 3-phase induction motor and unbalanced weight and elasticity of screen by rubber spring for resonant vibration.		Body stroke : 6mm Screen stroke : 16mm		Approx.900		*2	Screen's own tension	2mm-40mm	—	Floor mounted Inclined
RSH Type Rubber Spring Screens	Used for feeding and screening materials, from fine to massive materials such as coke, sintered ore, and iron ore.	Resonance type consisting of 3-phase induction motor, unbalanced weight, and rubber spring.		6-7		Approx.1100		*1	Tapping ball is required.	150mesh-10mm	—	Floor mounted / suspension Horizontal or inclined
GF/RGH/RVG Type Grizzly Feeders	Used for primary screening of quarried stuffs, such as crushed stone, iron ore, coal and briquette.	GF...Electromagnetic type		0-1.5		3000/3600		*1	*3	Grizzly bar Sieve opening more than : 15mm	*4	Floor mounted / suspension Quasi-horizontal or inclined
		RGH...Electric motor type		6-7		Approx.1100		*1			—	
		RVG...Vibrating motor type		2-8		720-850		*2			*4	

Note: \*1 Adjustable when machine is in operation. \*2 Adjustable when machine is stopped. \*3 The marked models have a built-in clog preventing function without using tapping balls.  
\*4 The marked models have custom-made explosion proof versions (Drive unit only).

# LDS Type Linear Drive Screens

## Powerful large screens for large-volume processing

Linear drive screen, with back-and-forth movement produced by compact but powerful exciter, achieves high sifting performance and efficiently handles large-volume processing of various materials including mineral ores.



### Features

#### High-efficiency, large-volume processing.

A powerful alternating linear movement is generated on the entire screen at an angle of 45° and an acceleration of 5-6.5G. This powerful and sharp movement makes large-volume processing possible and prevents clogging.

#### Durable yet lightweight

A rivet construction using huck bolts is utilized for the frame to eliminate stress concentration during operation and to decrease weight. Moreover, the frame for the exciter is of a sturdy welded construction, yet reducing residual stress due to welding, thereby improving reliability.

#### Long-lasting exciter

The exciter's unbalanced weight is installed outside the casing, so there is little temperature rise of the lubricating oil inside.

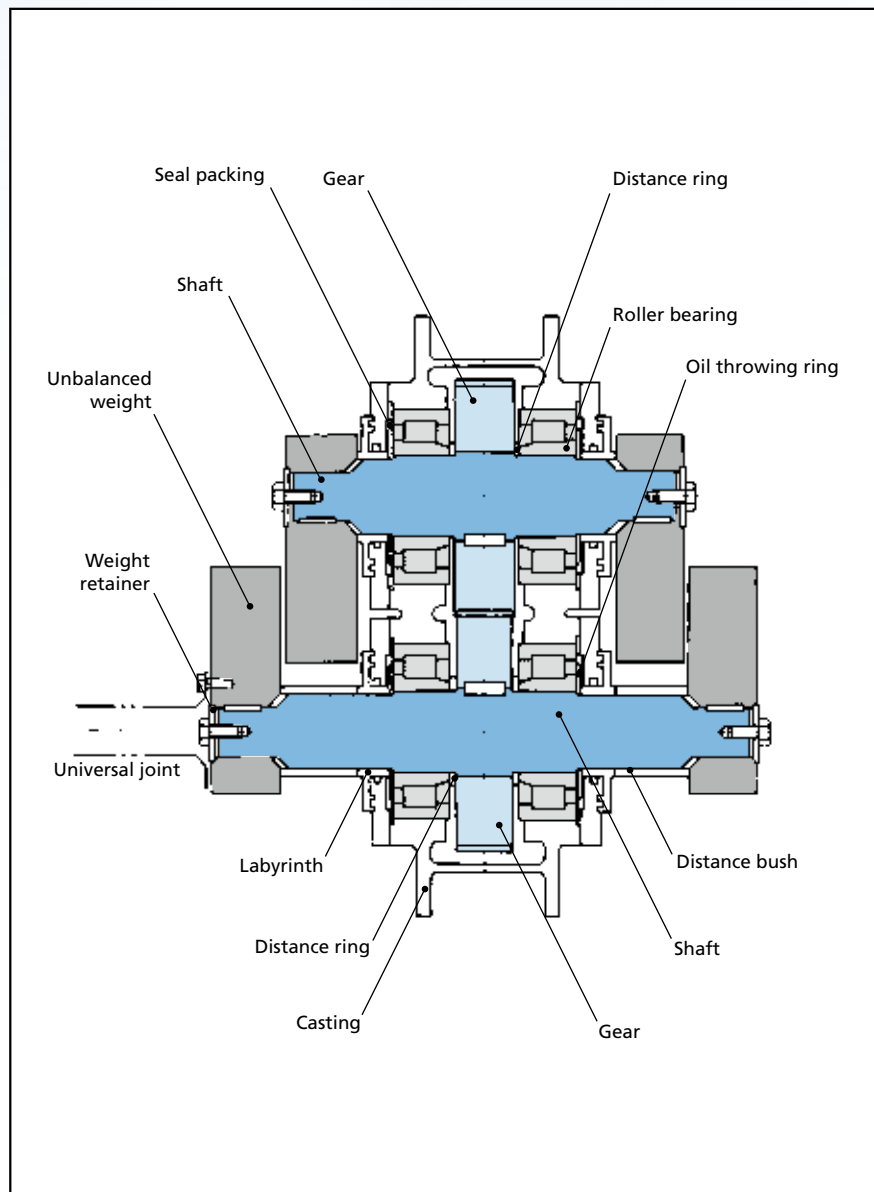
#### Easy maintenance

The exciter can be removed and replaced easily, which makes maintenance easy as well.

#### Smooth operation and outstanding vibration-proofing

Coil spring and rubber springs are used jointly for the isolation device, thereby minimizing vibration transmitted to the base or supporting frame, and making starting and stopping smooth.

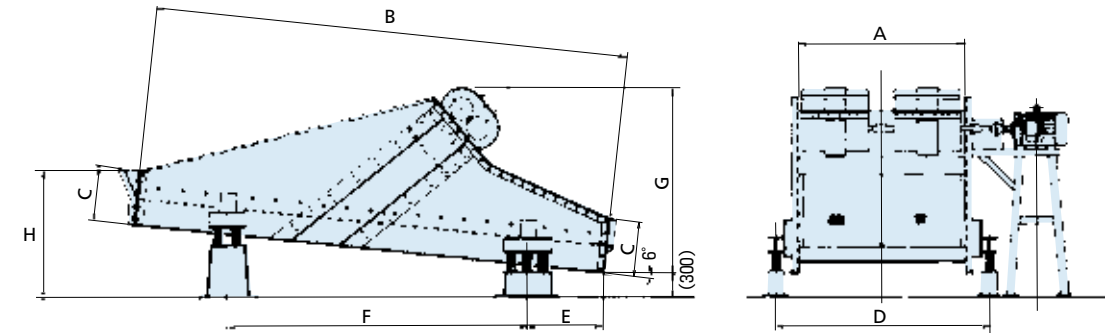
### Exciter Construction



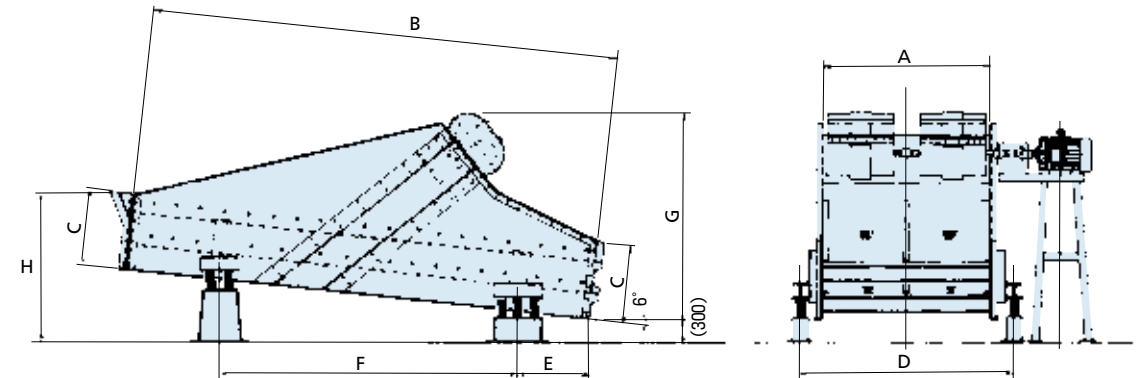
### Dimensions

Unit : mm

#### Single-deck screens LDS1 Type



#### Double-decks screens LDS2 Type



### Specifications

#### Single-deck screens

Models	Effective screening area (m <sup>2</sup> )	Models of exciter	Vibrations per minute		Motor output(kW)	Weight (kg)
			60Hz 8P	50Hz 6P		
LDS1-1800-4.8	6.13	LD-256	900	1000	18.5	4800
LDS1-1800-5.4	7.00	LD-406	900	1000	22	5500
LDS1-2100-4.8	7.18	LD-406	900	1000	22	6400
LDS1-2100-6	9.23	LD-256×2	900	1000	37	7400
LDS1-2400-6	10.50	LD-256×2	900	1000	37	8000
LDS1-2400-7.2	12.90	LD-256×2	900	1000	45	9000
LDS1-2700-6	11.90	LD-256×2	900	1000	45	9000
LDS1-2700-7.2	14.60	LD-406×2	900	1000	45	11000

#### Double-decks screens

Models	Effective screening area (m <sup>2</sup> )	Models of exciter	Vibrations per minute		Motor output(kW)	Weight (kg)
			60Hz 8P	50Hz 6P		
LDS2-1800-4.8	6.13	LD-406	900	1000	22	6400
LDS2-1800-5.4	7.00	LD-406	900	1000	22	7200
LDS2-2100-4.8	7.18	LD-256×2	900	1000	37	8500
LDS2-2100-6	9.23	LD-256×2	900	1000	45	9400
LDS2-2400-6	10.50	LD-406×2	900	1000	45	11000
LDS2-2400-7.2	12.90	LD-406×2	900	1000	55	12500
LDS2-2700-6	11.90	LD-406×2	900	1000	55	12500
LDS2-2700-7.2	14.60	LD-406×2	900	1000	55	14000

### Dimensions

#### Single-deck screens

Unit : mm

Models	A	B	C	D	E	F	G	H
LDS1-1800-4.8	1800	4800	550	2300	800	2900	2050	1350
LDS1-1800-5.4	1800	5400	550	2300	1000	3700	2350	1400
LDS1-2100-4.8	2100	4800	550	2700	800	2900	2250	1350
LDS1-2100-6	2100	6000	650	2700	1000	3800	2400	1600
LDS1-2400-6	2400	6000	700	3100	1000	3800	2400	1650
LDS1-2400-7.2	2400	7200	700	3100	1300	4500	2550	1750
LDS1-2700-6	2700	6000	700	3400	1000	3800	2400	1650
LDS1-2700-7.2	2700	7200	700	3400	1300	4500	2700	1750

#### Double-decks screens

Unit : mm

Models	A	B	C	D	E	F	G	H
LDS2-1800-4.8	1800	4800	900	2300	700	2900	2650	1700
LDS2-1800-5.4	1800	5400	950	2300	800	3500	2750	1800
LDS2-2100-4.8	2100	4800	950	2700	700	2900	2600	1750
LDS2-2100-6	2100	6000	1000	2700	1000	3800	2650	1950
LDS2-2400-6	2400	6000	1100	3100	1000	3800	2950	2050
LDS2-2400-7.2	2400	7200	1100	3100	1400	3900	3100	2150
LDS2-2700-6	2700	6000	1200	3400	1000	3800	3000	2150
LDS2-2700-7.2	2700	7200	1200	3400	1400	4200	3100	2250





# Conveyor Belt

DRB has been steadily growing in automotive and industrial rubber product markets after starting out with power transmission and conveyor belt production. We provides high value-added products and services to our customers, leading their diverse industry fields in the world market, based on accumulated experiences and technological capabilities. Over 65 years, DRB has been providing outstanding products and services to Korea's leading automotive, electronic and steel manufacturers who have achieved strong footholds in the world market, and consequently, DRB has formed strong business partnerships with those companies.



- 4 Steel Cord Conveyor Belt
- 6 Multi-Ply Conveyor Belt
- 8 Mono-Ply Conveyor Belt
- 9 Less-Ply Conveyor Belt
- 10 General, Abrasion Resistant Conveyor Belt
- 11 Heat Resistant Conveyor Belt
- 12 Fire Resistant, Oil Resistant, Chemical Resistant, Anti Static, Color Conveyor Belt
- 13 Bucket Elevator Conveyor Belt
- 15 Chevron Conveyor Belt / Rough Top Conveyor Belt
- 16 Rip Protection Steel Cord Conveyor Belt Impact / Cut Resistant Conveyor Belt
- 17 Hybrid Conveyor Belt
- 18 Cleanface Conveyor Belt / Energy Saving Conveyor Belt

# Steel Cord Conveyor Belt

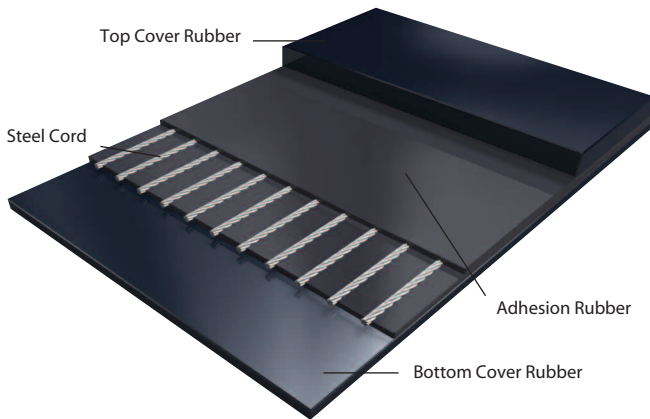
## Features

- It is ideal for long-distance, large-capacity and high tensile strength lines.
- Low elongation allows short take-up strokes.
- Small diameter pulleys may be used.

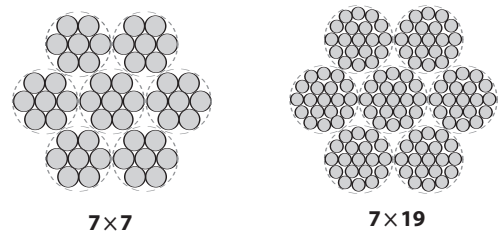
## Take-up Stroke Comparison

Carcass	Take-up Stroke
Steel Cord	Over 0.35
Nylon	Over 2.1
Polyester	Over 1.4

## Belt Structure

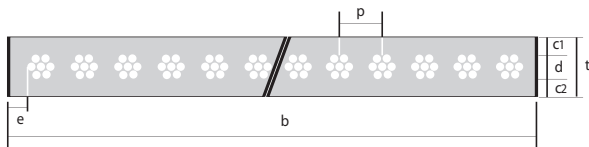


## Cord Structure

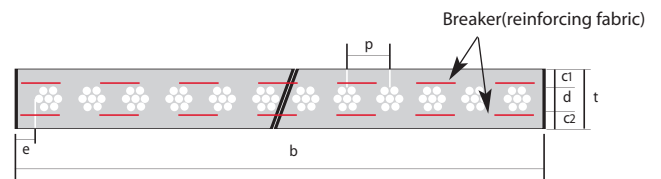


7×7 : Applied to low tension lines  
 7×19 : Applied to high tension lines

## General Structure



b : Belt width  
 c1 : Top cover rubber thickness  
 c2 : Bottom cover rubber thickness  
 d : Cord diameter  
 e : Edge rubber width  
 p : Cord pitch  
 t : Total belt thickness

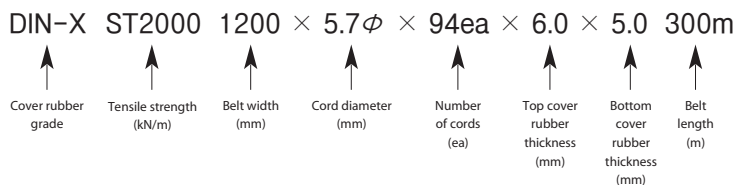


b : Belt width  
 c1 : Top cover rubber thickness  
 c2 : Bottom cover rubber thickness  
 d : Cord diameter  
 e : Edge rubber width  
 p : Cord pitch  
 t : Total belt thickness

## Breaker(reinforcing fabric)

- prevents length-wise tearing by foreign substances or sharp objects
- prevents broken steel cord from protruding through cover rubber
- provides high withdrawal strength (in stationary tests)
- reduces risks for belt breakage by impact

## Belt Marking Protocol



# Steel Cord Conveyor Belt

## Product Information

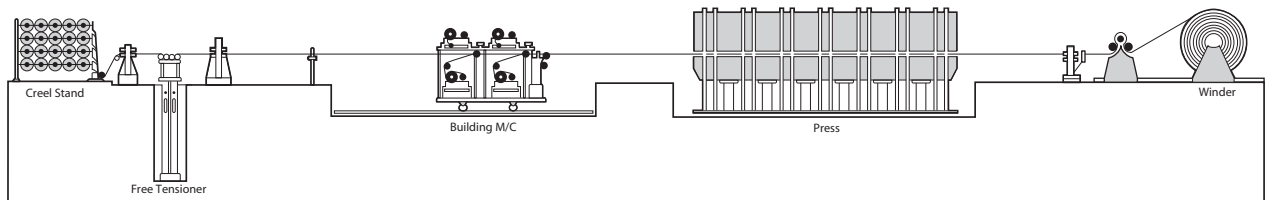
Products	Application groups
(1) Belt tensile strength: ST500~ST5000(kN/m)	(1) General Purpose
(2) Belt width: 600~2200mm	(2) Abrasion Resistance
(3) Minimum length: 100m	(3) Heat Resistance
	(4) Oil Resistance
	(5) Fire Resistance

## Standard Specifications

Specification	Cord diameter(mm)	Cord pitch(mm)	Cord structure	Minimum pulley diameter(mm)		
				Drive/Head	Takeup/Tail	Snap/Bend
ST-500	2.4	10	7×7	600	500	350
ST-630	2.7	10	7×7	600	500	350
ST-800	3.1	10	7×7	650	500	400
ST-900	3.3	10	7×7	700	550	450
ST-1000	3.6	12	7×7	700	550	450
ST-1250	4.0	12	7×7	850	700	500
ST-1400	4.3	12	7×7	950	750	550
ST-1600	4.7	12	7×7	1000	800	600
ST-1800	5.0	12	7×7	1200	950	700
ST-2000	5.2	12	7×7	1200	950	700
ST-2500	6.8	15	7×19	1500	1200	900
ST-2800	7.2	15	7×19	1550	1250	950
ST-3000	7.4	15	7×19	1700	1350	1000
ST-4000	8.6	15	7×19	1850	1400	1050
ST-5000	9.6	15	7×19	2100	1700	1250

Note : Please contact your representative as specifications other than the above are available.

## Production Process



# Multi-Ply Conveyor Belt

## Features



### Material Quality

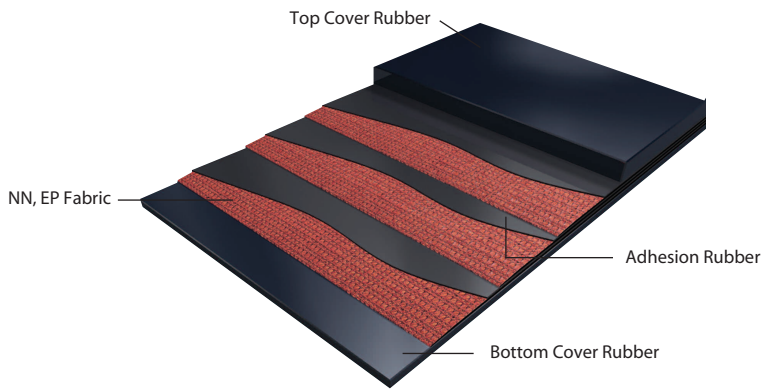
Nylon (NN)

- Highly flexible.
- Highly resistant against impact.
- Highly bendable.

Polyester (EP)

- Less elongation.
- Less deformed by heat.
- Less affected by moisture.

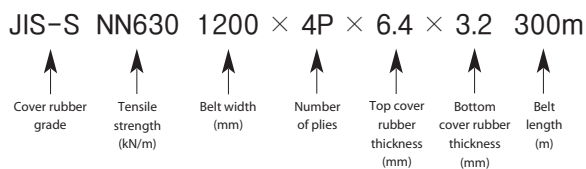
## Belt Structure



## Product Information

Products	Application groups
(1) Belt tensile strength : 100~2000(kN/m)	(1) General Purpose
(2) Belt width : 300~2200mm	(2) Abrasion Resistance
(3) Minimum length : 50m	(3) Heat Resistance
	(4) Oil Resistance
	(5) Fire Resistance
	(6) Chemical Resistance
	(7) Anti-Static
	(8) Color

## Belt Marking Protocol



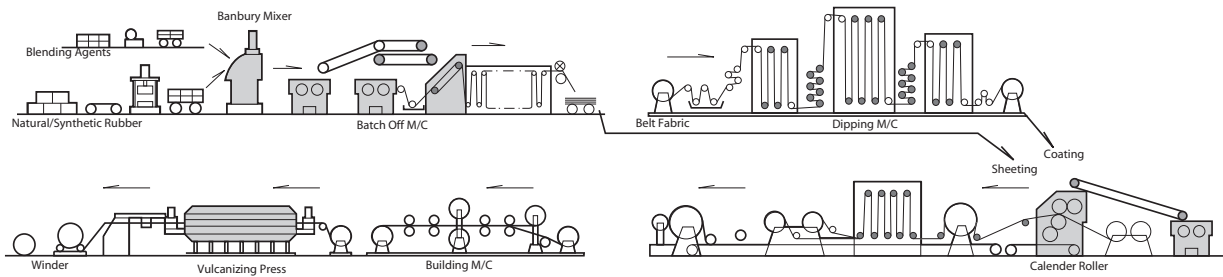


# Multi-Ply Conveyor Belt

## Standard Specifications

Belt strength (kN/m)	Belt specifications				Belt width (mm/inch)														
	Plies	Carcass type	Cover rubber(mm)		300	400	500	600	700	800	900	1000	1050	1200	1400	1600	1800	2000	2200
			Top rubber	Bottom rubber	12	16	20	24	28	32	36	40	42	48	56	64	72	80	88
160	2	NN, EP	3.2	1.6															
250	2~3	NN, EP	3.2	1.6															
315	2~4	NN, EP	4.8	1.6															
400	2~4	NN, EP	4.8	1.6															
500	2~4	NN, EP	4.8	1.6															
630	3~5	NN, EP	4.8	1.6															
800	3~6	NN, EP	4.8	2.4															
1000	4~6	NN, EP	4.8	2.4															
1250	4~6	NN, EP	4.8	2.4															
1500	5~6	NN, EP	6.4	3.2															
2000	5~6	NN, EP	6.4	3.2															

## Production Processes



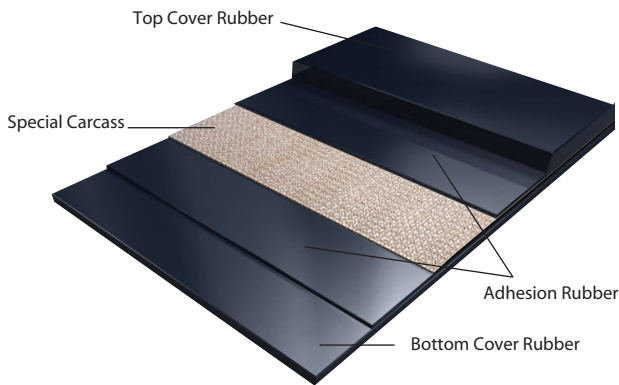
# Mono-Ply Conveyor Belt

## Features

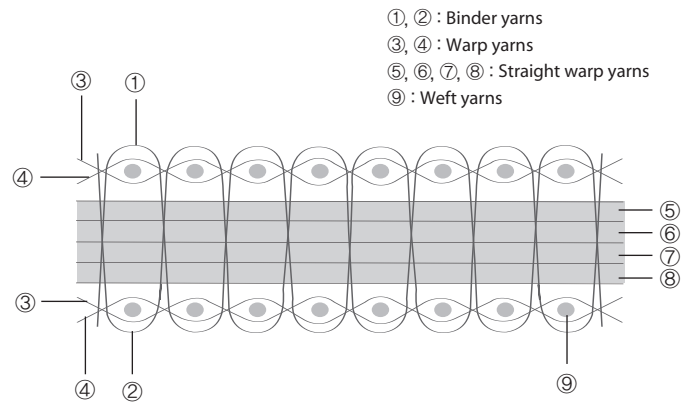


- One-ply carcass provides over 2000kN/m tension.
- Low elongation allows short take-up strokes.
- Single layer carcass structure provides optimum troughing.
- Single layer carcass structure provides high bendability, allowing small-diameter pulleys.
- High bendability, impact-resistance, and thin carcass allow thick cover rubber layers, extending belt life span.

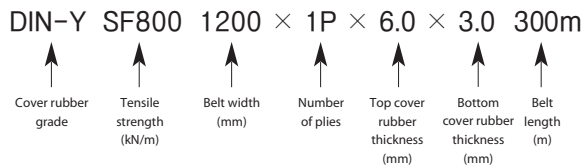
## Belt Structure



## Carcass Structure



## Belt Marking Protocol



## Standard Specifications

Specification	Carcass thickness	Cover rubber		Minimum pulley diameter(mm)		
		Top rubber	Bottom rubber	Drive/Head	Takeup/Tail	Snap/Bend
SF-600	2.5	5	3	400	350	300
SF-800	3.3	5	3	450	400	350
SF-1000	3.5	6	3	500	450	350
SF-1200	4.3	6	3	550	500	400
SF-1500	4.9	6	4	650	550	450
SF-1800	5.5	8	4	750	650	550
SF-2000	5.8	8	4	850	750	650

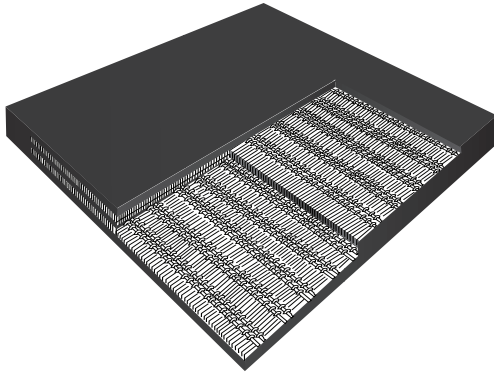
Note: Please consult us your representative for specifications other than the above.

# Less-Ply Conveyor Belt

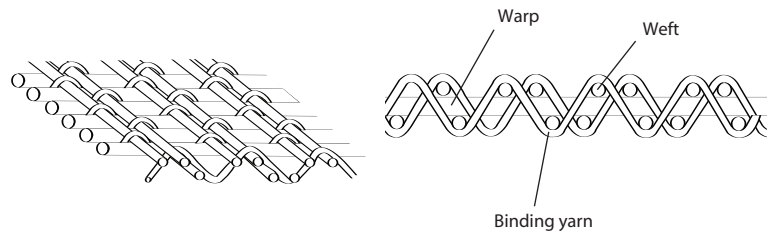
## Features

- Straight warp ply carcass structure allows designs to provide higher tension than ordinary multi-ply belts.
- Provides high bendability and impact resistance.
- Belts can be easily joined.

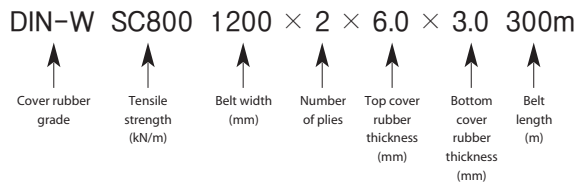
## Belt Structure



## Carcass Structure



## Belt Marking Protocol



## Standard Specifications

Specification	Cover rubber(mm)		Minimum pulley diameter(mm)		
	Top rubber	Bottom rubber	Drive/Head	Take-up/Tail	Snap/Bend
SC-400	5	2	350	300	250
SC-600	5	2	400	350	300
SC-800	6	3	450	400	350
SC-1000	6	3	500	450	400
SC-1200	6	3	550	500	400
SC-1600	8	4	700	600	500
SC-1800	8	4	850	750	650
SC-2000	8	4	900	800	700

Note: Please consult us your representative for specifications other than the above.

# General, Abrasion Resistant Conveyor Belt

## JIS

Standard		JIS-P	JIS-G	JIS-S	JIS-A	JIS-L	JIS-D	JIS-H	
Tensile test	Before Aging	Tensile Strength (MPa)	>8	>14	>18	>14	>15	>18	>24
		Elongation(%)	>300	>400	>450	>400	>350	>400	>450
	After Aging	Change rate of TS(%)	± 40	± 30	± 25	± 25	± 25	± 25	± 25
		Change rate of EL(%)	± 40	± 30	± 25	± 25	± 25	± 25	± 25
Abrasion test (mm <sup>3</sup> )		<400	<250	<200	<150	<200	<100	<120	
Ozone test		No Crack		No Crack					

## DIN

Standard		DIN-W	DIN-X	DIN-Y	DIN-Z	
Tensile test	Before Aging	Tensile Strength (MPa)	>18	>25	>20	>15
		Elongation(%)	>400	>450	>400	>350
	After Aging	Change rate of TS(%)	± 25	± 25	± 25	± 25
		Change rate of EL(%)	± 25	± 25	± 25	± 25
Abrasion test (mm <sup>3</sup> )		<90	<120	<150	<250	

## AS

Standard		AS-N	AS-M	AS-A	
Tensile test	Before Aging	Tensile Strength (MPa)	>17	>24	>17
		Elongation(%)	>400	>450	>400
	After Aging	Change rate of TS(%)	± 20	± 20	± 20
		Change rate of EL(%)	± 20	± 20	± 20
Abrasion test (mm <sup>3</sup> )		<200	<125	<70	



## BS

Standard		BS-N17	BS-M24	
Tensile test	Before Aging	Tensile Strength (MPa)	>17	>24
		Elongation(%)	>400	>450
	After Aging	Change rate of TS(%)	± 25	± 25
		Change rate of EL(%)	± 25	± 25

## RMA

Standard		RMA-1	RMA-2	
Tensile test	Before Aging	Tensile Strength (MPa)	>25	>18
		Elongation(%)	>450	>400
	After Aging	Change rate of TS(%)	± 25	± 25
		Change rate of EL(%)	± 25	± 25
Abrasion test (mm <sup>3</sup> )		<125	<200	

Note : DRB produces conveyor belts that conform to various international specifications.  
Please consult your representative for conveyor belts of non-standard specifications.

## Heat Resistant Conveyor Belt



It is more economical to use a thermostable conveyor belt when transporting materials with 60°C or higher temperature. Damage to cover rubber varies depending on the temperature or shape of transported materials and it is critical to choose suitable belt materials depending on the use conditions. The relationship between the cargo and the belt surface temperature is especially noteworthy. This is because cooling is mainly achieved on the return trip as the temperature of the belt surface is different from that of the cargo, although it varies depending on the cargo shape, belt length, speed, operation environment and hours.

Grade	Features	Applications
HRS	Being a belt made of heat-hardening SBR materials, it has good abrasion resistance though some cracks are generated as cover rubber gets hardened by heat if used for a long time.	High abrasion resistance, Medium temperature
HRB	Being a belt made of heat-softening IIR materials, it has good resistance against cracks though its cover rubber gets softened by heat if used for a long time. It is suitable to transport cement or clinker with little abrasion.	Crack resistance, Medium high temperature
HRP	Being a belt made of EPR materials, it demonstrates outstanding performance in transporting hot materials as it has high resistance against abrasion and cracks.	High abrasion resistance, Crack resistance, High temperature
HRP (plus)	Being a new concept HRP product whose crack resistance is reinforced, you may experience a longer life span.	High abrasion resistance, Crack resistance, High temperature

### Selection of Belts by Material Type and Temperature

Grain shape Material handled	Powder materials					Lump materials					
	Cement, Chemical, Fertilizer, Soda ash, Casting sand, Clinker					Sintered ore, Cokes, Limestone, Iron Ore, Clinker					
Maximum temperature of material handled	120	150	200	200	400	200	200	400	400	400	
	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	
Average temperature of material handled	60	80	100	120	150	180	60	100	120	150	200
Maximum temperature of belt surface	50	80	100	120	150	180	50	80	100	130	180
HRS(SBR)	■					■					
HRB(Butyl)	■					■					
HRP (EPR)/HRP (plus)	■					■					

### Relation between Material and Belt Surface Temperature

Belt surface temperature varies depending on material types, shapes, sizes, belt cycle time, and trough angle. The heat-resistant belts should be selected based on their surface temperature as their life span depends on the belt surface temperature.

Material handled	Temperature of material handled(°C)	Belt surface temperature(°C)	Used grade
Sintered ore	200~350	90~150	HRP
Cokes	60~200	40~60	HRS
Clinker	200~300	100~150	HRB
Clinker	300~400	150~180	HRP
Cement	110~140	100~110	HRB
Fertilizer	80~100	60~80	HRS
Casting cast	~100	60~80	HRS
	100~150	110~130	HRP