



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

**IDENTIFICACIÓN DE POTENCIALES MEJORAS
ENERGÉTICAS Y DETERMINACIÓN DEL CONSUMO
ESPECÍFICO DE ENERGÍA EN EL PROCESO DE
PRODUCCIÓN DE CARBONATO DE CALCIO EN LA
COMPAÑÍA OMYA ANDINA S.A.**

Autor

Dayana Barreto Arenas

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Química

Medellín, Colombia

2021



**IDENTIFICACIÓN DE POTENCIALES MEJORAS ENERGÉTICAS Y
DETERMINACIÓN DEL CONSUMO ESPECÍFICO DE ENERGÍA EN EL
PROCESO DE PRODUCCIÓN DE CARBONATO DE CALCIO EN LA
COMPAÑÍA OMYA ANDINA S.A.**

DAYANA BARRETO ARENAS

**Informe de práctica académica presentado como requisito parcial para optar al
título de:
Ingeniera Química**

**Asesores:
Giovanni Rojas
Henry Zúñiga Benítez**

**Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Química
Medellín, Colombia
2021**

IDENTIFICACIÓN DE POTENCIALES MEJORAS ENERGÉTICAS Y DETERMINACIÓN DEL CONSUMO ESPECÍFICO DE ENERGÍA EN EL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE CARBONATO DE CALCIO EN LA COMPAÑÍA OMYA ANDINA S.A.

Resumen

La empresa Omya Andina S.A es productora de carbonato de calcio que es un mineral con múltiples usos en diferentes sectores del mercado como papel, vidrio, plásticos, pinturas, entre otros, además es una importante materia prima, se obtiene mediante la explotación y molienda de roca caliza, este proceso de molienda requiere de consumo energético debido al proceso de reducción de tamaño. Debido a que la mayor parte del consumo de energía en plantas de procesamiento de minerales se debe a las operaciones de trituración y especialmente de molienda, es de importancia identificar posibles mejoras energéticas y analizar el consumo específico de energía en el proceso producción de carbonato de calcio. El objetivo de la práctica académica fue verificar el cumplimiento del estándar de consumo específico de energía (kWh/ton) para las líneas de trituración primaria y molienda de la compañía Omya Andina S.A, a la vez que se buscó encontrar posibles mejoras energéticas. Para lo anterior se identificaron y midieron las variables energéticas del proceso y la productividad. Se evidenció que el consumo específico de energía está relacionado con la productividad y el tamaño de partícula del producto que se esté desarrollando, además, se identificó la posibilidad de mejoras para la línea de trituración primaria, al dejar de emplear dos bandas transportadoras, permitiendo no solo un beneficio energético, si no una posible solución a problemas de contaminación por fugas de material particulado.

Palabras Clave: Carbonato de calcio, consumo específico de energía, molienda, procesamiento de minerales, trituración.

Introducción

El carbonato de calcio (CaCO_3) es una materia prima que existe en muchas partes de la naturaleza, representando más del 4.0% de la corteza terrestre y con usos en numerosos sectores del mercado. Sus formas naturales más comunes son la tiza, mármol, piedra caliza y dolomita, producidos por la sedimentación de las conchas de pequeños caracoles, mariscos y corales fosilizados durante millones de años (Omya, 2020). El CaCO_3 es además una de las materias primas más útiles y versátiles conocidas por el hombre, con aplicaciones en las industrias de papel, vidrio, plásticos, pintura, recubrimientos, alimentos, construcción, entre otros. Casi todos los productos de nuestra vida diaria contienen carbonato de calcio o entran en contacto con él durante su producción.

El carbonato de calcio se puede obtener de dos formas, mediante la extracción o explotación de canteras y mediante precipitación. Para fines industriales, el carbonato de calcio molido o GCC (Grinding Calcium Carbonate), es obtenido por la explotación y molienda de la roca caliza, cumpliendo con las especificaciones químicas, físicas y granulométricas requeridas. El carbonato de calcio precipitado o PCC (Precipitated Calcium Carbonate) tiene menos impurezas, más brillo, mejor color y morfología controlada; la forma más común para obtenerlo es pasando dióxido de carbono a una solución de hidróxido de calcio (Industrial Minerals Association - North America, 2020).

Omya Andina fue fundada en 1884 por Gottfried Plüss-Stauffer en Oftringen, Suiza. Tiene presencia global que se extiende a más de 175 ubicaciones en más de 50 países con 9000 empleados. Omya es un productor mundial líder de minerales industriales, principalmente rellenos y pigmentos derivados de carbonato de calcio y dolomita, y un distribuidor mundial de productos químicos especiales (Omya, 2020).

La planta COSO de Omya Andina, ubicada en Sonsón Antioquia tiene la capacidad de producir carbonato de calcio molido o GCC, por lo cual, en el proceso de transformación de esta materia prima son empleados diversos equipos de reducción de tamaño, obteniéndose productos con diferentes granulometrías y propiedades. La reducción de tamaño a la cual está sometido el carbonato de calcio involucra trituración primaria, secundaria y molienda, procesos que consumen altas cantidades de energía. La fragmentación, es la operación de mayor consumo energético, y normalmente la de mayor costo, por lo que el estudio de la energía consumida en este proceso adquiere gran importancia. De esta manera, en un proceso de fragmentación la energía total consumida, además de emplearse en este proceso, se transforma en ruido, calor, energía cinética, desgaste de equipos, etc. Así, el gasto de energía en trituración y molienda ha sido estudiado por diferentes teorías como la teoría de Rittinger, teoría de Kick y la teoría de F.C. Bond (Blanco, 2020)

Por lo anterior, el principal objetivo de este proyecto fue identificar potenciales mejoras energéticas y determinar el consumo específico de energía en el proceso de producción de carbonato de calcio en la planta COSO para las líneas de trituración y molienda, mediante el desarrollo de mediciones en planta que proporcionan datos para analizar el consumo de energía, con el fin de reducir gastos operacionales y verificar que las líneas estén operando bajo el estándar de consumo energético establecido por la compañía.

Objetivos

Objetivo General

Identificar potenciales mejoras energéticas en el proceso de producción de carbonato de calcio en las líneas de trituración y molienda de la planta COSO de Omya Andina

Objetivos específicos

- Realizar mediciones de productividad y energía en las líneas de trituración y molienda de la planta COSO de Omya Andina S.A.
- Identificar y medir en el tiempo las variables energéticas y de proceso más relevantes en la producción de carbonato de calcio, tales como productividad, tamaño de partícula, voltaje, corriente, potencias nominales y potencias reales de motores, compresores y ventiladores con el fin de encontrar oportunidades de optimización energética.
- Analizar el desempeño energético para las líneas de interés, verificando que cumplan los estándares de la compañía.

Marco Teórico

La conminución es la acción de fragmentar o disminuir el tamaño de un determinado material, y agrupa a un conjunto de operaciones, cuyo objetivo es realizar la división de cuerpos sólidos por medio de acciones físicas externas. Lo anterior se refiere a la reducción de un cuerpo o varios cuerpos en fragmentos de dimensión previamente establecida; o bien, a la reducción de un conjunto sólido, ya fragmentado, a elementos de volumen más pequeños. El objetivo de la conminución es liberar las especies mineralizadas, facilitar el manejo de mineral en diferentes porcentajes de los sólidos, obtener un material de tamaño apropiado y controlado, entre otros (Universidad Politécnica de Cartagena, 2020).

La reducción de tamaño se lleva a cabo en dos operaciones unitarias, trituración y molienda. La trituración se realiza por compresión de la mena contra superficies rígidas o por impacto contra superficies, con un recorrido de movimiento rígidamente forzado y la molienda es efectuada por abrasión e impacto de la mena mediante el libre movimiento del medio de molienda (barras, bolas, guijarros). La trituración primaria recibe, normalmente, el material bruto de la explotación minera y realiza la primera reducción de tamaño; los equipos utilizan preferentemente las fuerzas de compresión y las de impacto o percusión. Para la trituración secundaria las alimentaciones son más finas y es el segundo escalón de la trituración, los tamaños de alimento están comprendidos entre 300 a 100 mm y de producto entre 50 y 10 mm (Universidad de Cantabria, 2020).

En las operaciones de fragmentación el consumo de energía es importante, por lo que se establecieron correlaciones entre la energía específica consumida (kWh/ton) y la reducción de tamaño alcanzada, mediante leyes energéticas como la ley de Rittinger, ley de Kick y ley de Bond. La ley de Rittinger responde bastante bien a la desintegración de productos finos y expresa que el área de la nueva superficie producida por el nuevo machaqueo o molienda es directamente proporcional al trabajo útil consumido, es decir el trabajo de fragmentación es proporcional a la suma de las nuevas superficies producidas. La ley de Kick responde, con bastante aproximación, a la desintegración de productos gruesos y expresa que el trabajo requerido es directamente proporcional a la reducción de volumen entre las partículas antes y después de la operación de fragmentación o molienda, es decir proporcional a la variación de volumen de las partículas y la ley de Bond dice que el trabajo consumido es proporcional a la nueva longitud de fisura producida por la rotura de las partículas, ya que una vez creada la fisura la roca parte (Universidad Politécnica de Cartagena, 2020).

Dentro del consumo de energía destinado a la trituración de materiales solo un 2.0% aproximadamente, produce la aparición de nuevas superficies, el resto se pierde en deformación plástica de las partículas, deformación de las partes metálicas de la maquinaria, fricciones entre partículas, rozamiento de las partículas con las paredes de la maquinaria, calor, ruido y vibración (Universidad de Buenos Aires, 2015). Además, en la fragmentación, el consumo de energía por tonelada de mineral tratado en los equipos de reducción de tamaño aumenta enormemente a medida que disminuye el tamaño del mineral a fragmentar (Universidad Nacional del Sur, 2013). La expresión de la ecuación 1 se conoce como la ecuación general

de reducción de tamaño, estudios teóricos indican que la energía suministrada por unidad de masa procesada para producir un pequeño cambio en tamaño puede expresarse como una función del tipo ley de potencia con respecto al tamaño de las partículas, donde K y n son constantes experimentales que dependen del material y el molino, y x es el tamaño de partícula. (Austin, 1997).

$$\frac{dE}{dx} = -\frac{k}{x^n} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Metodología

La metodología que se empleó para el desarrollo del proyecto estuvo basada en los siguientes procedimientos, que permitieron planificar y gestionar el proyecto

- 1. Inducciones:** Se llevaron a cabo las inducciones y capacitaciones necesarias para el desarrollo seguro y adecuado del proyecto.
- 2. Familiarización y revisión de los equipos de medición:** Se revisó el buen funcionamiento de los equipos de medición, incluyendo una lectura de los instructivos de uso y pruebas para verificar los resultados arrojados.
- 3. Reconocimiento de equipos y flujos de proceso:** Se hizo el reconocimiento de los equipos involucrados en cada una de las líneas y sus condiciones de operación. Corrientes de entrada y salida, subsistemas y sistema global.
- 4. Identificación de variables:** Se listaron las variables del proceso, clasificando las variables medidas desde la sala de control, los datos extraídos desde el laboratorio y las medidas en campo.
- 5. Puntos de muestreo:** Se definieron los puntos de muestreo en campo que permitieron realizar las mediciones en cada uno de los sistemas
- 6. Toma de muestras de las diferentes variables:** Medición de las propiedades de las diferentes corrientes y de los parámetros de operación de los equipos involucrados
- 7. Revisión de resultados:** Se hizo la revisión de los resultados de consumo energético y operación de la planta
- 8. Análisis de resultados:** Los análisis de resultados permitieron verificar el correcto aprovechamiento energético de la planta y el cumplimiento del estándar, además se propusieron las mejoras energéticas identificadas
- 9. Preparación de informes parciales, informe final y presentación pública de la práctica empresarial:** Se realizaron informes de avance presentados al asesor interno y externo, se preparó el informe final una vez culminada la práctica y se realizará la socialización de la práctica empresarial en las jornadas programadas por la facultad.

Resultados y análisis

Trituración primaria

Para la línea de trituración primaria se llevaron a cabo 4 ensayos en planta para dos tipos de piedra, triturado y rajón. El diagrama de flujo de proceso para esta línea, se presenta en la Figura 1, donde se puede evidenciar los principales equipos que la componen. Tanto para la piedra denominada triturado (Figura 2), como para la piedra tipo rajón (Figura 3), se realizaron en cada uno de los ensayos mediciones de voltaje y corriente, de tal manera que, con los datos recolectados de las placas de los motores, se realizara el cálculo de la potencia requerida por cada uno de los equipos, siendo los principales el alimentador vibratorio (AV), la trituradora de mandíbulas, la trituradora de martillos y el ventilador del filtro de mangas.

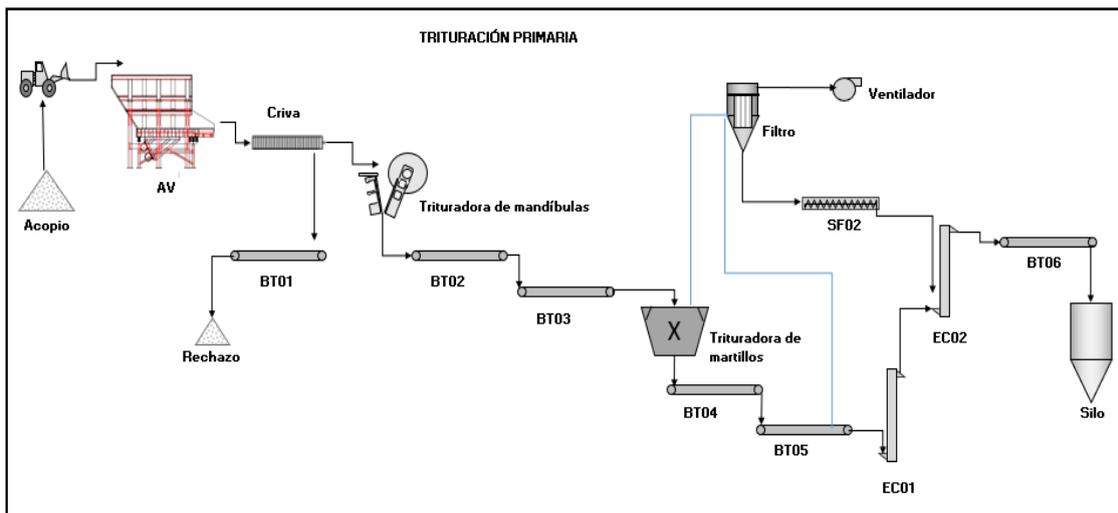


Figura 1 Diagrama de flujo de proceso para la línea de trituración primaria COSO



Figura 2 Piedra tipo triturado



Figura 3 Piedra tipo rajón

En la Tabla 1 se presentan los datos recolectados de la placa de características de los motores que componen la línea de trituración primaria, estos datos recolectados en campo suministran información del voltaje nominal, corriente nominal, frecuencia, potencia y factor de potencia de los motores. Destacando que los motores que pueden brindar mayor potencia en el eje son el de la trituradora de martillos y de quijadas, debido a que estos equipos son los encargados de la reducción de tamaño en esta línea. Además, en la Tabla 2 se muestra el rango de tamaño de alimentación, dependiendo del tipo de piedra suministrada y que se encuentra en patio de acopio; esto será de importancia en el análisis del consumo energético y la productividad de la línea.

Tabla 1 Datos placa motores línea de trituración primaria COSO

Equipo	Voltaje nominal (V)	Corriente nominal (A)	Frecuencia (Hz)	Potencia (KW)	Cos Φ
Alimentador vibratorio		19.0		11	0.82
Banda transportadora 1		5.7		0	0.83
Trituradora de Quijadas		56.9		37	0.9
Banda transportadora 2		6.7		3	0.83
Banda transportadora 3		5.7		3	0.83
Trituradora de martillos		215.0		132	0.85
Banda transportadora 4	440	5.7	60	3	0.83
Banda transportadora 5		4.3		2.2	0.83
Elevador de cangilones 1		13.2		7.5	0.85
Elevador de cangilones 2		13.2		7.5	0.85
Banda transportadora 6		5.7		3	0.83
Sin fin 2		4.3		2.2	0.83
Ventilador filtro de mangas		46.3		29.84	0.90

Tabla 2 Tamaño según tipo de piedra

Referencia	Tamaño (mm)
Triturado	150
Rajón	300

Durante las mediciones de las variables energéticas involucradas en el proceso de producción del carbonato de calcio para esta línea, se midió la productividad en toneladas por hora (tph) para cada uno de los ensayos, obteniendo los resultados de la Tabla 3. La productividad se determinó para cada ensayo midiendo las toneladas de material procesadas por la línea, alimentado material con un cargador con peso de piedra conocido cuando se encontraba vacía la línea y midiendo el tiempo en que este material es tratado. En la Tabla 4 se presentan las abreviaturas empleadas para los motores de los equipos de la línea. La productividad para la piedra triturado es mayor que para la piedra tipo rajón en los ensayos, debido a que esta tiene menor tamaño para la alimentación, lo cual hace que el proceso de trituración primaria, en la trituradora de quijadas, sea más productivo debido a la menor razón de reducción del material en el equipo. La energía consumida en los procesos de trituración, molienda, y clasificación, se encuentra estrechamente relacionada con el grado de reducción de tamaño alcanzado por las partículas en la correspondiente etapa de conminución (Reynaldo, 2001). El consumo específico de energía también está relacionado con la reducción de tamaño entre la alimentación y el producto, de esta manera, como se observa en la Tabla 5, para las mediciones 3 y 4 correspondientes a piedra tipo rajón, al requerir una razón de reducción mayor por su tamaño de alimentación, implica mayor consumo específico de energía, lo que significa mayor costo energético.

Tabla 3 Productividad según tipo de piedra

Medición	Tipo de piedra	Productividad (tph)
1	Triturado	27.55
2	Triturado	28.30
3	Rajón	25.30
4	Rajón	25.79

Tabla 4 Abreviaturas

Abreviatura	Significado
AV	Alimentador vibratorio
BT-01	Banda transportadora 01
TQ	Trituradora de quijadas
BT-02	Banda transportadora 02
BT-03	Banda transportadora 03
TM	Trituradora de martillos
BT-04	Banda transportadora 04
BT-05	Banda transportadora 05
EC-01	Elevador de cangilones 01
EC-02	Elevador de cangilones 02
BT-06	Banda transportadora 06
SF-02	Tornillo sinfín 02
VE	Ventilador filtro de mangas

Tabla 5 Resultados de consumo específico de energía y potencia en línea de trituración primaria COSO

Equipo	Medición 1		Medición 2		Medición 3		Medición 4	
	Potencia (KW)	Consumo específico de energía (kWh/ton)	Potencia (KW)	Consumo específico de energía (kWh/ton)	Potencia (KW)	Consumo específico de energía (kWh/ton)	Potencia (KW)	Consumo específico de energía (kWh/ton)
AV	7.81	0.28	10.01	0.35	8.52	0.34	9.73	0.38
BT-01	2.19	0.08	2.26	0.08	2.08	0.08	2.20	0.09
TQ	18.03	0.65	18.19	0.64	17.45	0.69	16.80	0.65
BT-02	1.81	0.07	1.86	0.07	2.93	0.12	2.02	0.08
BT-03	1.48	0.05	1.37	0.05	1.64	0.06	1.49	0.06
TM	76.66	2.78	74.40	2.63	66.51	2.63	73.39	2.85
BT-04	2.66	0.10	2.23	0.08	2.35	0.09	2.40	0.09
BT-05	1.43	0.05	1.89	0.07	1.57	0.06	1.36	0.05
EC-01	7.10	0.26	5.43	0.19	6.85	0.27	5.23	0.20
EC-02	4.14	0.15	3.67	0.13	5.41	0.21	6.78	0.26
BT-06	1.69	0.06	1.70	0.06	1.63	0.06	1.69	0.07
SF-02	1.22	0.04	1.37	0.05	1.43	0.06	1.49	0.06
VE	14.77	0.54	15.08	0.53	15.89	0.63	15.81	0.61
TOTAL	140.99	5.12	139.44	4.93	134.27	5.31	140.39	5.44

En la Figura 4 se observa la relación entre la productividad en los ensayos realizados y el consumo específico de energía. Como se esperaba, productividades bajas incrementan el consumo específico de energía por lo que no son recomendables en el proceso. El consumo específico de energía promedio se encontró en 5.20 kWh/ton, cumpliendo con el estándar de Omya Andina para trituración primaria. Es importante el cumplimiento del estándar y el uso racional de la energía en los procesos de trituración y molienda de materiales que consumen grandes cantidades de energía (Hechavarría, 2015).

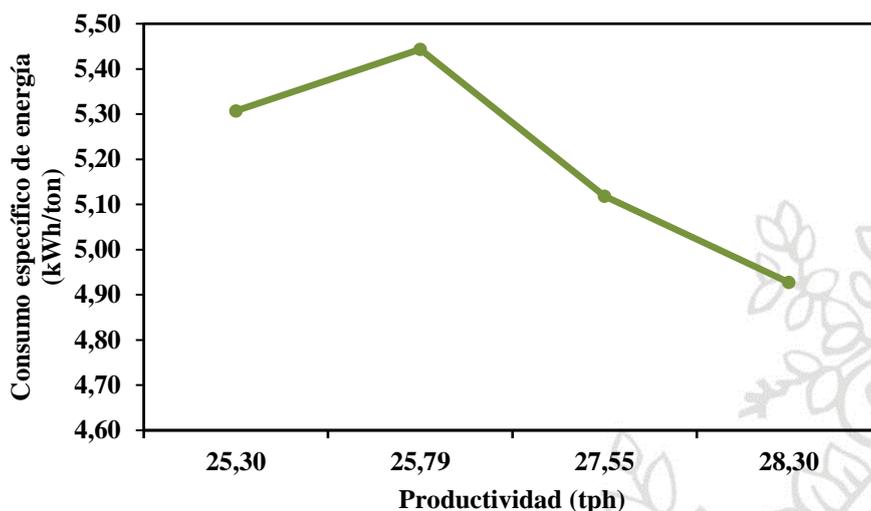


Figura 4 Consumo específico de energía vs productividad línea trituración primaria COSO

En la Tabla 6 se muestran otros datos de la línea necesarios para el cálculo del consumo de energía. El valor de la energía fue tomado de datos reportados por la empresa. Por otra parte, es de interés calcular el costo energético aproximado de la línea, los resultados se muestran en la Tabla 7. Se encontró que la línea de trituración primaria tiene un consumo de energía de 579844.42 kWh, con un costo aproximado de \$199,204,101.98. Además, en la Tabla 7 se evidencia el consumo energético de las bandas transportadoras 4 y 5, que se identificaron en campo como una posible mejora, al reemplazar estas bandas por una sola; y el consumo energético de las bandas transportadora 2 y 3, que de manera similar se puede emplear solo la banda 2. En la Tabla 8 se presenta el consumo y costo de energía si se realizan estas mejoras energéticas sugeridas, presentando la línea un posible costo de energía aproximado de \$195,094,761.53, lo que significaría un disminución de **\$4,109,340.45** anuales, significando no solo un beneficio energético y económico para la empresa, sino que una mejora en materia de contaminación por fugas de material particulado, debido a que principalmente la banda transportadora número 5, como se evidencia en la Figura 5, genera esta contaminación. En los Anexos 1, 2 se muestran los planos elaborados para Omya Andina S.A por la empresa JJDISMECOM S.A.S. que evidencian la viabilidad de reemplazar las bandas 2 y 3 por una sola, empleando la banda 2 y el motor de la misma; y en los Anexos 3 y 4 se presentan los planos que evidencian la viabilidad de reemplazar las bandas 4 y 5 por la banda 4.

Tabla 6 Datos de producción línea de trituración primaria COSO

Tiempo operado 2019 (h)	4112.80
Material procesado 2019 (ton)	115305.00
Valor energía (\$/KWh)	343.55

Tabla 7 Consumo específico de energía, consumo y costo de energía para la línea de trituración primaria COSO

Equipo	Consumo específico de energía (kWh/ton)	Consumo (KWh)	Costo consumo (\$)
AV	0.28	32140.90	\$ 11,041,926.84
BT-01	0.08	9006.03	\$ 3,093,998.04

TQ	0.64	74144.49	\$ 25,472,152.53
BT-02	0.06	7435.44	\$ 2,554,425.26
BT-03	0.05	6080.99	\$ 2,089,109.24
TM	2.73	315288.45	\$ 108,316,557.87
BT-04	0.09	10932.93	\$ 3,755,981.99
BT-05	0.05	5880.50	\$ 2,020,231.22
EC-01	0.25	29219.82	\$ 10,038,394.43
EC-02	0.15	17009.57	\$ 5,843,594.92
BT-06	0.06	6964.59	\$ 2,392,668.80
SF-02	0.04	5007.93	\$ 1,720,463.19
VE	0.53	60732.79	\$ 20,864,597.66
TOTAL	5.03	579844.42	\$ 199,204,101.98

Tabla 8 Consumo y costo de energía para la línea de trituración primaria COSO con mejoras energéticas

Equipo	Consumo (KWh)	Costo consumo (\$)
AV	32140,90	\$ 11.041.926,84
BT-01	9006,03	\$ 3.093.998,04
TQ	74144,49	\$ 25.472.152,53
BT-02	7435,44	\$ 2.554.425,26
TM	315288,45	\$ 108.316.557,87
BT-04	10932,93	\$ 3.755.981,99
EC-01	29219,82	\$ 10.038.394,43
EC-02	17009,57	\$ 5.843.594,92
BT-06	6964,59	\$ 2.392.668,80
SF-02	5007,93	\$ 1.720.463,19
VE	60732,79	\$ 20.864.597,66
TOTAL	567882,93	\$ 195.094.761,53



Figura 5 Bandas transportadoras 4 y 5 línea de trituración primaria COSO

Molienda

En la línea de molienda se lleva a cabo la operación final de reducción de tamaño, para esta línea se realizaron mediciones en planta para la referencia de un producto menor a 30 micras, obteniendo información de productividad, voltaje y corriente de los motores que componen la línea, con la finalidad de calcular la potencia requerida por cada uno de los equipos, siendo los de mayor consumo energético el molino de bolas, el ventilador del filtro de mangas y los clasificadores. Los demás equipos encargados del transporte de material consumen menor energía; además, se analizó las demás referencias de la línea, que comprenden a las referencias de producto menor a 80 micras, 160 micras y 370 micras, mediante datos de los reportes de producción de Omya, permitiendo de esta manera relacionar el consumo específico de energía con la productividad y el tamaño de grano. El diagrama de flujo de proceso para esta línea, se muestra en la Figura 6, donde se evidencian los principales equipos de la misma.

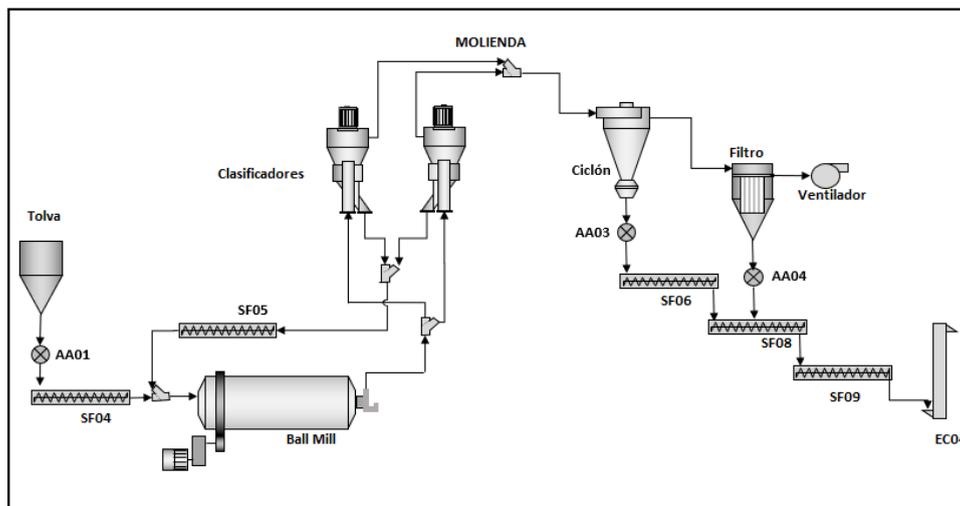


Figura 6 Diagrama de flujo de proceso para la línea de molienda COSO

En la Tabla 9 se muestran los datos recolectados de la placa de características de los motores que componen la línea de molienda, estos datos recolectados en campo suministran información del voltaje nominal, corriente nominal, frecuencia, potencia y factor de potencia de los motores. El motor que brinda mayor potencia en el eje es el motor del molino de bolas, encargado de la reducción de tamaño en esta línea.

Tabla 9 Datos placa motores línea de molienda COSO

Equipo	Voltaje nominal (V)	Corriente nominal (A)	Frecuencia (Hz)	Potencia (KW)	Cos Φ
Ball Mill	440.00	560.00	60.00	362.00	0.88
Ventilador filtro de mangas		298.00		185.00	0.86
Clasificador 1		61.00		35.00	0.82
Clasificador 2		46.81		30.00	0.86
AA-01		3.02		1.32	0.73
SF-06		5.70		3.00	0.83
SF-05		6.43		3.60	0.83
SF-04		4.77		2.60	0.83
AA-04		0.62		-	0.81
AA-03		0.62		-	0.81
SF-08		5.70		3.00	0.83
SF-09		5.70		3.00	0.83

Para la referencia de producto menor a 30 micras se realizaron pruebas en campo obteniendo la productividad presentada en la Tabla 10. Además, en la Tabla 11 se presentan los datos recolectados de voltaje, corriente y factor de potencia que permitieron el cálculo de la potencia de cada uno de los motores de la línea durante la producción de esta referencia, además con la productividad, se determinó el consumo específico de energía para esta referencia, que se analizará más adelante, en relación con los datos del reporte de producción y las demás referencias. Por otra parte, en la Tabla 12 se reporta información para las referencias de producto menor a 80 micras, 160 micras y 370 micras tomada del reporte de producción.

Tabla 10 Productividad producto menor a 30 micras

Flujo másico (ton/h)	3.43
Costo energía (\$/KWh)	343.55

Tabla 11 Resultados de consumo específico de energía y potencia para producto menor a 30 micras de la línea de molienda COSO

Equipo	Voltaje (V)	Corriente (A)	Cos Φ	Potencia (KW)	Consumo específico de energía (kwh/ton)
Ball Mill	455.10	361.10	0.88	250.48	73.07
Ventilador filtro de mangas	454.60	195.00	0.86	132.05	38.52
Clasificador 1	456.10	23.50	0.82	15.22	4.44
Clasificador 2	456.10	15.30	0.86	10.39	3.03
AA-01	454.30	3.50	0.73	2.01	0.59
SF-06	454.60	2.20	0.83	1.44	0.42
SF-05	454.20	3.60	0.83	2.35	0.69
SF-04	456.20	3.60	0.83	2.36	0.69
AA-04	456.10	0.52	0.81	0.33	0.10
AA-03	454.60	0.49	0.81	0.31	0.09
SF-08	458.40	2.40	0.83	1.58	0.46
SF-09	458.70	2.70	0.83	1.78	0.52
TOTAL				420.31	122.61

Con la información recolectada durante el ensayo para la referencia producto menor a 30 micras y los datos reportados en la Tabla 12, se obtuvieron los resultados de la Tabla 13, donde se determinó el consumo específico de energía para cada referencia, el consumo y el costo de dicho consumo de energía. Las referencias de la línea de molienda, de la planta COSO de Omya Andina cumplen con el estándar.

Tabla 12 Información referencias línea de molienda COSO

Referencia	Producción (ton)	Tiempo de producción (h)	Productividad (ton/h)
Producto menor a 30 micras	7.65	2.50	3.06
Producto menor a 80 micras	11727.01	2161.80	5.42
Producto menor a 160 micras	418.25	68.90	6.07
Producto menor a 370 micras	933.35	142.00	6.57

Tabla 13 Consumo específico de energía para las referencias de molienda planta COSO

Referencia	Consumo específico de energía (kWh/ton)	Consumo (KWh)	Costo consumo (\$)
Producto menor a 30 micras	137.36	1050.78	\$ 360,993.63
Producto menor a 80 micras	77.48	908632.47	\$ 312,158,414.87
Producto menor a 160 micras	69.24	28959.56	\$ 9,948,984.54
Producto menor a 370 micras	63.95	59684.43	\$ 20,504,438.39

La Figura 7 muestra los resultados obtenidos en campo versus los resultados obtenidos con información de reportes de producción para la referencia de producto menor a 30 micras, donde se observa que ambos datos de consumo específico de energía para los equipos son muy cercanos, lo que valida las mediciones realizadas en campo.

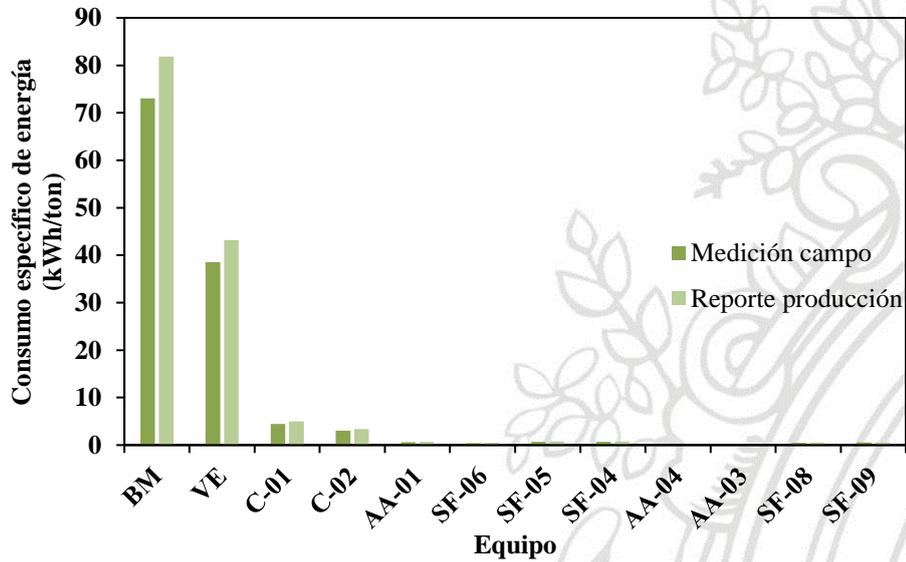


Figura 7 Resultados producto menor a 30 micras, medición en campo vs reportes de producción

El consumo específico de energía para cada una de las referencias producidas en la línea de molienda de la planta COSO está relacionado con la productividad y el tamaño de partícula de cada una de las referencias. Al analizar las Figuras 8, 9 y 10, se observa que, a mayor productividad y a mayor diámetro de partícula para el producto, menor es el consumo específico de energía, esto último relacionado, como se mencionó anteriormente, con la razón de reducción entre la alimentación y el producto. Estos consumos específicos de energía para la línea de molienda también cumplen el estándar de Omya. En la Figura 11 se puede observar de igual manera la relación entre la productividad y el consumo específico de energía para un molino de bolas, los consumos específicos del molino y del ventilador con respecto a la productividad revelan un alto grado de enlace entre estas dos magnitudes (Colquehuanca, 2018).

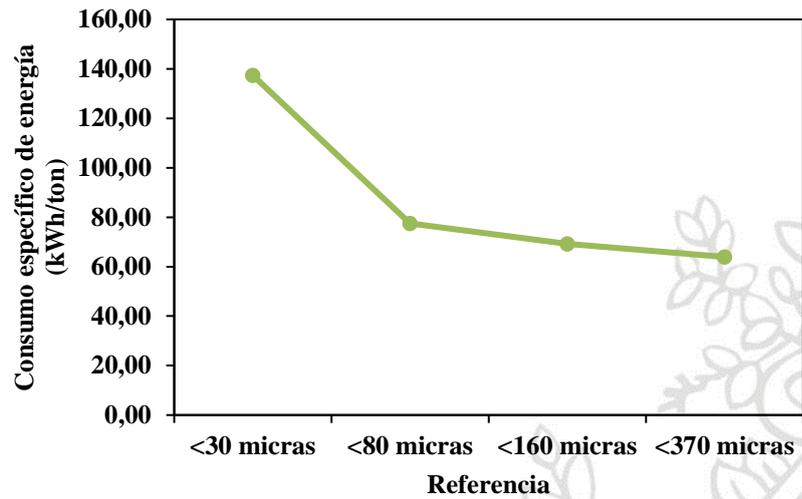


Figura 8 Consumo específico de energía según referencia línea de molienda COSO

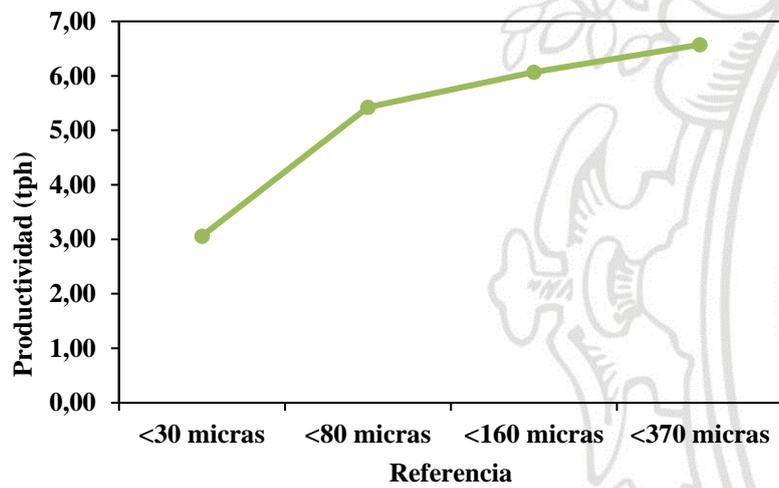


Figura 9 Productividad vs referencia

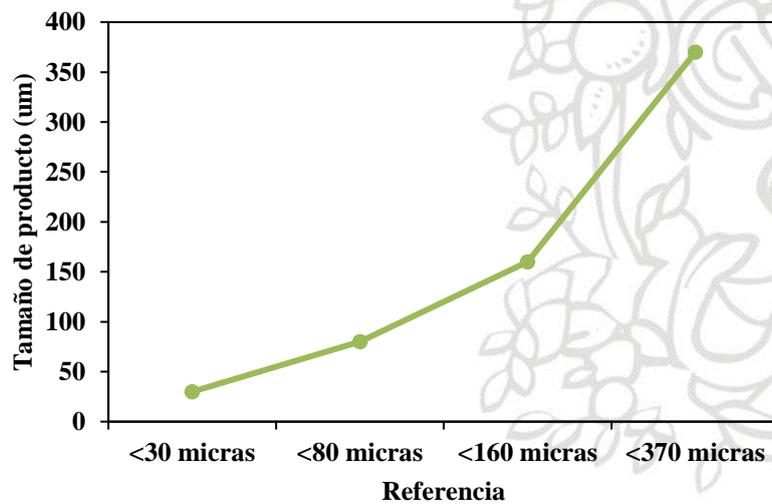


Figura 10. Tamaño de producto vs referencia

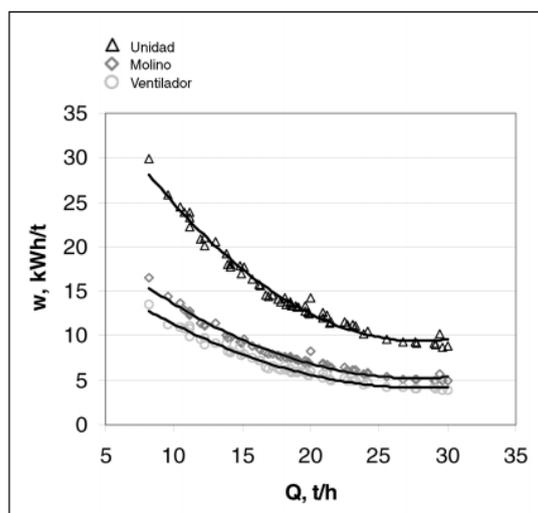


Figura 11. Características energéticas de una unidad de molienda y de sus agregados, con $\phi=0.27$ (Colquehuanca, 2018)

Conclusiones

Las líneas de trituración primaria y molienda de la planta de producción de carbonato de calcio de Omya Andina S.A. cumplen con el estándar de consumo específico de energía, siendo para la línea de trituración en promedio 5.20 kWh/ton y para la línea de molienda 102.18 kWh/ton. El cumplimiento del estándar garantiza un adecuado uso energético que es de importancia debido al alto costo del consumo de energía en plantas de procesamiento de minerales.

El consumo específico de energía para las diferentes referencias está estrechamente relacionado con la productividad de la línea y el tamaño de partícula del producto, esto a su vez relacionado con la razón de reducción que se dé en el proceso de conminución, de acuerdo a las diferentes referencias producidas. Por lo tanto, es adecuado que la productividad sea alta sin salirse de los límites de especificación de tamaño requeridos para cada tipo de producto.

Se logró identificar una posible mejora energética para la línea de trituración, al reemplazar las bandas transportadoras 4 y 5, por la banda transportadora 4 empleando su mismo motor. Esto implicaría un beneficio económico y la reducción de la contaminación por fugas de material particulado que se evidencia en la línea. Se propone estudiar a fondo esta posible mejora para ser o no implementada. Para la línea de molienda no se identificó mejoras energéticas directas, pero se propone hacerle seguimiento a la productividad durante la producción para garantizar el adecuado consumo de energía, además, realizar nuevas mediciones teniendo en cuenta otras variables que afectan la eficiencia energética del molino de bolas, como el porcentaje de ayuda de molienda presente en el molino.

Referencias bibliográficas

- Austin, L.G., Trass O. (1997). Size Reduction of Solids Crushing and Grinding Equipment, Capítulo 12 en Handbook of Powder Science & Technology
- Colquehuanca Lima, M. (2018). Implementación de mejora al sistema de una planta de trituración de roca, para optimizar el rendimiento en el proceso de producción de agregados.

Hechavarría-Pérez, J. R., Coello-Velázquez, A. L., Robles-Proenza, F. D., & Menéndez-Aguado, J. M. (2015). Eficiencia energética en la trituración por impactos en la planta de zeolitas de San Andrés (Holguín, Cuba). *Dyna*, 82(193), 93-97.

Industrial Minerals Association North America. Sitio web www.imana.org. Consultado en octubre de 2020.

Omya Andina S.A. (2020). Sitio web www.omya.com.co. Consultado en octubre de 2020.

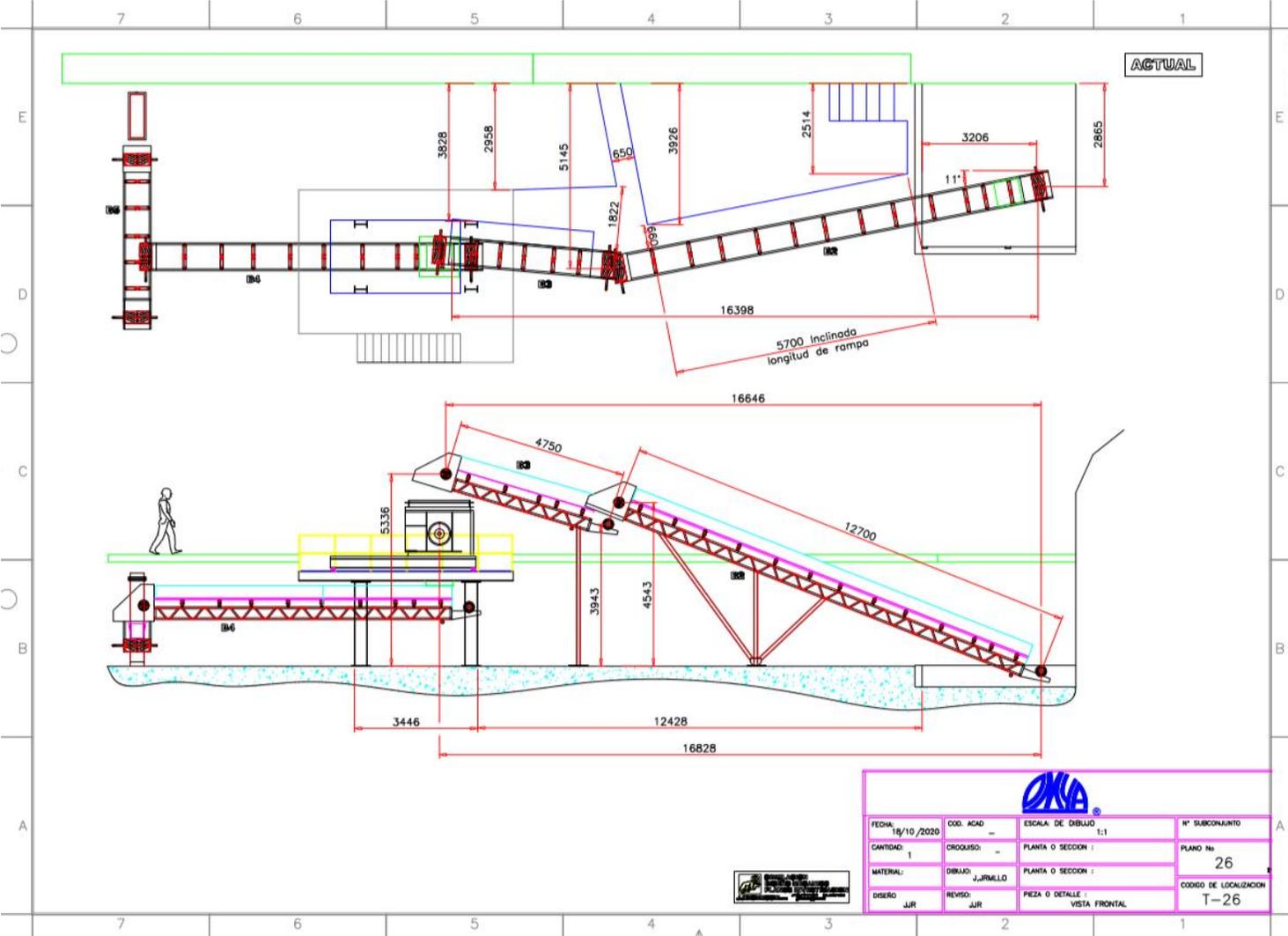
Reynaldo, L. B., Coello, A., & Marrero, S. (2001). Productividad y Eficiencia energética en el proceso de molienda del mineral laterítico. *Revista Minería y Geología*.

Universidad de Buenos Aires (Argentina) (2015). Sitio web materias.fi.uba.ar. Consultado en octubre de 2020.

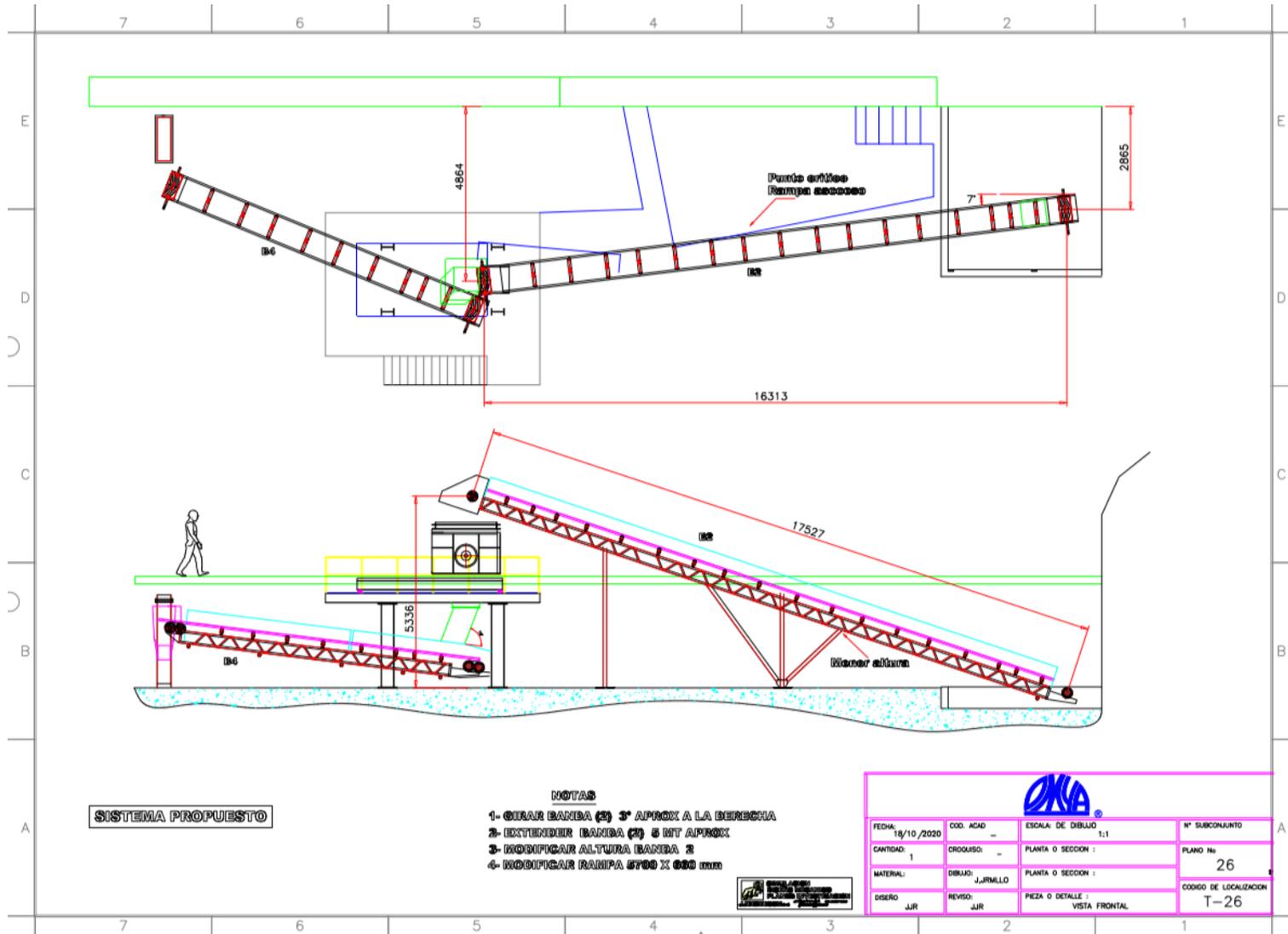
Universidad de Cantabria (España) (2020). Sitio web ocw.unican.es. Consultado en octubre de 2020.



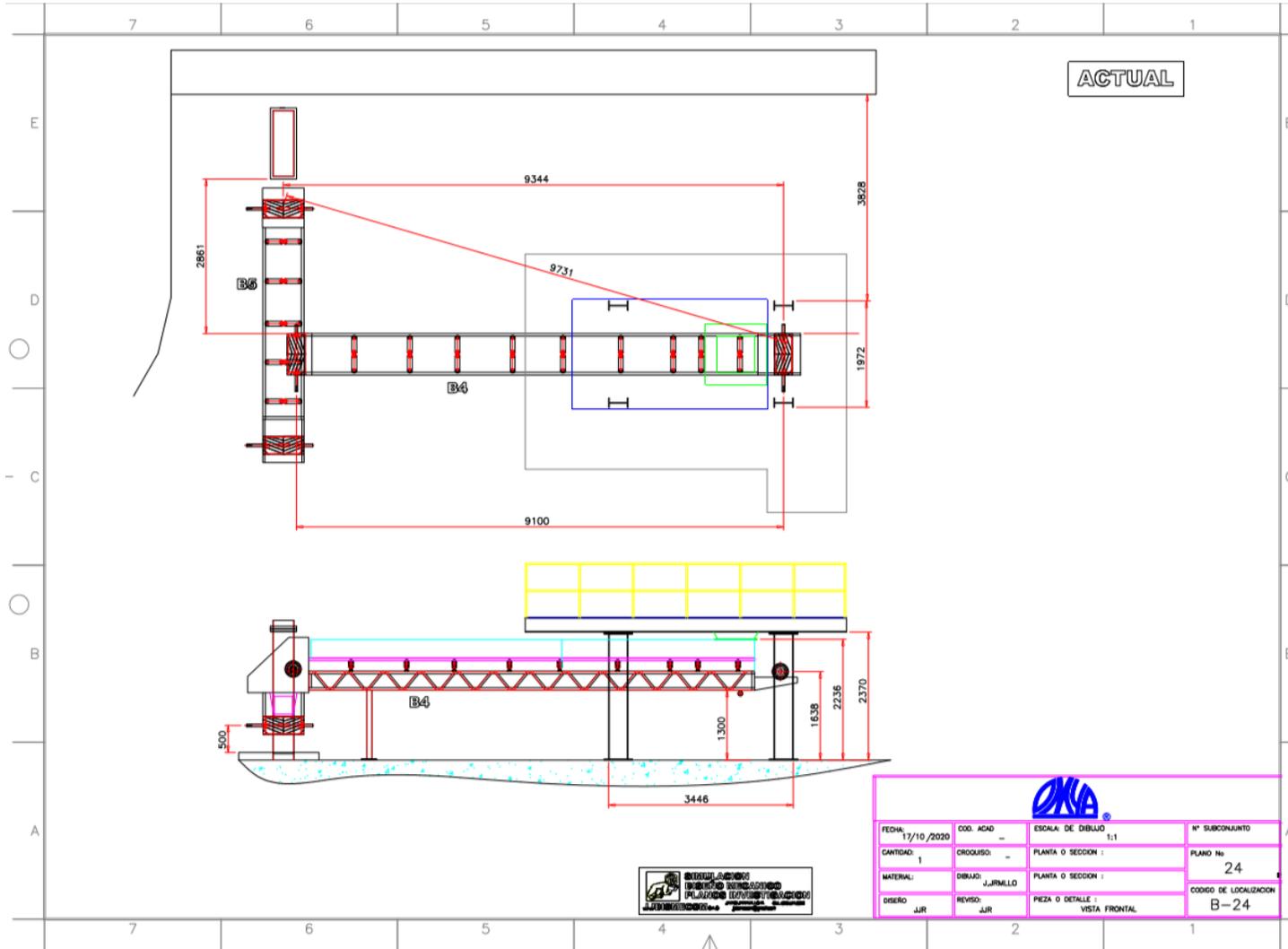
ANEXOS
Anexo 1



Anexo 2



Anexo 3



Anexo 4

