



Proyecto Final de Ingeniería Industrial

Aumento de Productividad en Proceso de Fabricación de Cal Hidráulica de Segunda

Autor: Fernando Artigas
Legajo: 42021
e-mail: fernandoartigas@fibertel.com.ar
Teléfono: 15-5423-1508

Director de Proyecto: Claudio Jorge Rancan

2018

Agradecimientos

A Marta, mi abuela.

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. EL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE LA CAL	1
1.1.1. LA PIEDRA CALIZA	1
1.1.1.1. Tipos de piedra caliza	1
1.1.1.2. Propiedades de la piedra caliza	2
1.1.1.2.1. Propiedades físicas	2
1.1.1.2.2. Propiedades químicas	4
1.1.2. EXTRACCIÓN DE PIEDRA EN CANTERA	4
1.1.2.1. Prospección	5
1.1.2.2. Perforación	5
1.1.2.3. Voladura	6
1.1.2.4. Carga y transporte	6
1.1.3. TRITURACIÓN	7
1.1.3.1. Piedra útil para hornos (PUH)	9
1.1.3.2. Piedra no útil para hornos (Descarte)	9
1.1.4. CALCINACIÓN	9
1.1.4.1. Hornos verticales de carga mixta	10
1.1.4.2. Termólisis	12
1.1.4.3. La cal viva	14
1.1.5. HIDRATACIÓN O “APAGADO” DE LA CAL VIVA	17
1.1.6. SEPARACIÓN Y MOLIENDA	22
1.1.7. ENVASADO	25
1.2. TIPOS DE CALES HIDRÁULICAS	27
1.2.1. CALES DE PRIMERA Y DE SEGUNDA	27
1.3. LA FÁBRICA	28
1.3.1. LOCALIZACIÓN	30
1.3.2. LAYOUT	33
1.3.3. MODALIDADES DE PRODUCCIÓN	36
1.3.4. DIAGRAMA DE PROCESOS	37
2. ESTADO DE LA CUESTIÓN Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	39
2.1. ESQUEMA PRODUCTIVO	39
2.2. SEMIELABORADOS Y PRODUCTOS TERMINADOS	41
2.2.1. MATRIZ DE TRASFORMACIÓN	41
2.3. PRODUCCIÓN	42
2.3.1. PRODUCTIVIDADES	42
2.3.2. EFICIENCIAS DE MARCHA	43
2.3.3. PULMONES	44
2.3.4. VOLÚMENES DE PRODUCCIÓN Y MIX	45
2.3.5. DOTACIONES Y TURNOS DE TRABAJO	45
2.3.6. CUELLOS DE BOTELLA	46
2.4. CALIDAD	47
2.5. MANTENIMIENTO	50
2.6. COSTOS DE PRODUCCIÓN	51
2.6.1. MATERIAS PRIMAS, INSUMOS, RECURSOS Y SERVICIOS	51

2.6.2.	COSTOS POR ETAPA	53
2.6.3.	SEMIELABORADOS, PRODUCTOS TERMINADOS Y COSTOS “CASCADA”	54
2.7.	RENTABILIDADES	55
2.8.	DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	58
3.	SOLUCIÓN PROPUESTA	59
3.1.	APROVECHAMIENTO DE ACTIVOS Y RECURSOS.	59
3.1.1.	BALANCE DE LÍNEA	59
3.1.1.1.	CH1	59
3.1.1.2.	CH2	60
3.1.2.	DISPONIBILIDAD MECÁNICA Y UTILIZACIÓN	60
3.1.3.	APROVECHAMIENTO	61
3.1.4.	PRODUCTIVIDAD EFECTIVA	65
3.1.5.	TURNOS DE TRABAJO	67
3.2.	CONSUMO ESPECÍFICO DE MATERIAS PRIMAS Y RECURSOS	70
3.2.1.	MERMAS Y DESPERDICIOS	70
3.2.2.	RENDIMIENTOS Y MATRIZ DE CONVERSIÓN	71
3.3.	REDEFINICIÓN DEL PROCESO	93
3.3.1.	ALIMENTACIÓN IDEAL DE FILLER	95
3.3.2.	CAPACIDAD DE PRODUCCIÓN FINAL DE CH2	97
3.3.3.	ALIMENTACIÓN ALCANZABLE DE FILLER CON LOS EQUIPOS DISPONIBLES	98
3.3.4.	DOTACIÓN NECESARIA	104
3.3.5.	IMPACTO EN EL MANTENIMIENTO Y ELEMENTOS DE DESGASTE	104
3.3.5.1.	Carga de bolas	105
3.3.6.	LAYOUT	107
3.3.7.	CAPACIDAD DE PRODUCCIÓN DEL CIRCUITO PARALELO DE FILLER	111
3.4.	RESUMEN DE ALTERNATIVAS A EVALUAR	112
3.5.	COSTOS E INVERSIONES POR ALTERNATIVA	112
4.	RESULTADOS	116
4.1.	CRITERIOS DE ANÁLISIS Y CONSIDERACIONES COYUNTURALES	116
4.2.	ALTERNATIVA SELECCIONADA	122
4.2.1.	VOLUMEN CONSTANTE, PUNTO DE EQUILIBRIO	122
4.2.2.	CONTINGENCIAS	123
4.3.	IMPACTO SOCIAL	124
4.4.	IMPACTO POLÍTICO	124
4.5.	IMPACTO AMBIENTAL	124
5.	CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	125
6.	BIBLIOGRAFÍA	126

Resumen Ejecutivo

El presente estudio selecciona la mejor alternativa para contrarrestar la gradual degradación del margen económico de una fábrica de cales hidráulicas, producto de años de inflación sostenida con la consecuente transformación de la estructura de costos, y de fenómenos indirectos de mercado, resultado de políticas económicas tales como el control de precios.

Limitada por la capacidad de inversión, sólo se consideran alternativas de corto alcance, en las que finalmente a través de una inversión menor, se amplía la capacidad de producción de la fábrica en un 35%, permitiendo afrontar el recupero de la inversión y logrando aumentar el margen bruto absoluto en un 49% en los primeros tres años.

El estudio repasa los conceptos básicos del proceso de fabricación, buscando asegurar la factibilidad de dicha alternativa, aplicando conocimientos de organización de la producción, conceptos específicos de los equipos de este tipo de industria, y por supuesto análisis de costos.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. El proceso de producción de la cal

El proceso de producción de la cal puede interpretarse como una sucesión de transformaciones químicas y físicas, que comienza con la piedra caliza de origen natural, alcanza el estado intermedio de cal viva, y culmina como cal. A lo largo del mismo existen transferencias de energía en forma de calor y trabajo.

1.1.1. La piedra caliza

Piedra caliza es un término amplio que abarca rocas y fósiles compuestos primariamente por carbonato de calcio (CaCO_3) o combinaciones de carbonato de calcio y magnesio ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), con cantidades variables de “impurezas” dentro de las cuales las más comunes se componen de silicio y aluminio. Es la más importante y abundante roca sedimentaria de uso comercial, generalmente de origen orgánico, producto de la fosilización de conchas y esqueletos de plantas y animales marinos. Se estima que entre un 3,5% y un 4,0% de la corteza terrestre puede clasificarse como alguna manifestación de piedra caliza.ⁱ

1.1.1.1. Tipos de piedra caliza

Desde el punto de vista mineralógico, la piedra caliza puede estar compuesta por distintos minerales, cada una con sus respectivas características y comportamientos físico-químicos. Entre ellos los más importantes y/o frecuentes son la calcita, la aragonita, la dolomita y la magnesita, cuyas características se muestran en la Tabla 1.

Mineral	Fórmula química	Estructura molecular	Peso molecular (u.m.a.)	Densidad (kg/m ³)	Dureza (Moh)
Calcita	CaCO_3	Romboédrica	100,1	2,72	3
Aragonita	CaCO_3	Ortorrómbica	100,1	2,94	3,5 - 4
Dolomita	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	Romboédrica	184,4	2,83	3,5 - 4
Magnesita	MgCO_3	Romboédrica	84,3	3,00	3,5 - 4,5

Tabla 1. Principales variedades de piedra caliza y sus características principales.

Con estos minerales como principales componentes, se distinguen múltiples variedades de formas, tipos y purezas de piedra. Las dos más importantes - sin impurezas - son:

- Alto tenor cálcico: 100% CaCO_3 (aragonita y calcita).

ⁱ Boynton, Robert S. 1980. Chemistry and Technology of Lime and Limestone. 578 páginas. Editorial John Wiley & Sons, Inc. Segunda edición. ISBN 0-471-02771-5

- Dolomítica: compuesta en un 54,3% por CaCO_3 y 45,7% por MgCO_3 . Estos dos tipos son difíciles de encontrar en la naturaleza en cantidades comercializables, sin embargo se consideran aceptables impurezas del orden del 1% al 3%. Cuando las impurezas superan el 3% comienzan a alterar las propiedades de la piedra caliza, en función del tipo y la proporción que contienen (en muchos casos mayores al 1% - 3% antes mencionado), surgen nuevas clasificaciones, dentro de las cuales las más frecuentes son:

- Caliza arcillosa: contiene cantidades considerables de arcilla o pizarra (altos contenidos de sílice SiO_2 y alúmina Al_2O_3).
- Caliza cementicia: similar a la arcillosa, contiene las proporciones adecuadas de sílice, alúmina y CaCO_3 para la obtención de cemento Pórtland u otro material para cementación hidráulica.
- **Caliza hidráulica:** contiene mayores proporciones de CaCO_3 que la caliza cementicia, por lo cual disminuyen sus propiedades de cementación. Este tipo de piedra es el que se utiliza en este proyecto.
- Caliza cálcica o dolomítica para industria (grado químico): contiene un mínimo de 95% de carbonato en cualquiera de sus dos formas, hasta un 98% - 99%.
- Caliza dolomítica: generalmente cualquier caliza que contenga más de 20% de MgCO_3 .
- Caliza bituminosa / carbonosa: puede contener tejidos vegetales descompuestos, asfalto natural, o incluso petróleo.
- Mármol: formado por CaCO_3 o MgCO_3 cristalizado.
- Tiza: una forma blanda y de grano fino de carbonato de calcio de origen fósil. La tiza blanca contiene un 98%-99% de CaCO_3
- Conchas marinas: ostras y almejas fosilizadas.

1.1.1.2. Propiedades de la piedra caliza

1.1.1.2.1. Propiedades físicas

Las propiedades físicas de este compuesto varían de acuerdo a la composición y estructura cristalográfica del mineral. Las más importantes a los efectos de este estudio son:

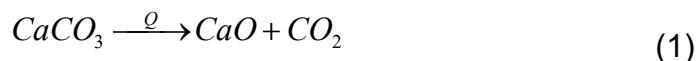
- a) Dureza: 2 a 4 en la escala de Mohsⁱⁱ.

ⁱⁱ La escala de Mohs se basa en la capacidad que posee un mineral de rayar a otro; el más duro raya al menos duro. Las equivalencias con otras escalas son las que se muestran a continuación.

Hardness Comparison Reference Chart						
Mohs (MM)	Knoop (HK)	Brinell Indentation	Brinell 10mm Standard 500	Rockwell A-Scale (HRA)	Vickers (HV)	Material Example

	INTRODUCCIÓN	Aumento de Productividad
---	--------------	--------------------------

- b) Densidad: 2,72 kg/dm³.
- c) Índice de Bond (molturabilidad o índice de trabajo de molienda): 10,18 kWh/tⁱⁱⁱ.
- d) Curva de disociación térmica^{iv} para la reacción representada en la ecuación química 1:



, donde las curvas representadas son las que se indican en la Tabla 2:

Curva	Elemento	Rango de temperatura
1	CaCO ₃ + SiO ₂	400–590°C
2	CaCO ₃ + 2CaO×SiO ₂	400–750°C
3	CaCO ₃	650–890°C

Tabla 2: Curvas de disociación del CaCO₃ en función de la temperatura y presión parcial del CO₂. Las curvas se corresponden con las del Gráfico 1. Al tratarse de calizas hidráulicas, el caso de estudio puede asimilarse a un intermedio entre las curvas 1 y 2.

(HB Indentation) kgf (HB 500)						
1	--	--	--	--	27	Talc
2	--	--	--	--	61	Gypsum
2.5	117	--	90	--	102	-
3	169	4.9	136	--	157	Calcite
3.5	239	4.10	189	60	229	-
4	327	3.50	--	66	315	Fluorite
4.5	436	3.08	--	72	418	-
5	564	2.76	--	77	535	Apatite
5.5	705	2.44	--	81	669	-
6	839	2.27	--	84	817	Feldspar
6.5	929	--	--	86	982	-
7	--	--	--	--	1161	Quartz
8	--	--	--	--	1567	Topaz
9	--	--	--	--	2035	Corundum
10	--	--	--	--	--	Diamond

ⁱⁱⁱ El índice de trabajo de Bond indica el trabajo medido en kWh, que hay que aplicar para reducir 907 kg (1 TC = tonelada corta) desde un tamaño teóricamente ilimitado hasta lograr un 80% de material pasante en malla 100 µm en sistemas abiertos de molienda de bolas.

Duda, Walter H. 1977. Manual Tecnológico del Cemento 3. 340 páginas. Editorial Reverté S.A. ISBN 84-7146-095-5

^{iv} Operating and Maintenance Instructions, Maerz Lime Kiln AK 604 Manual. Maerz Ofenbau AG

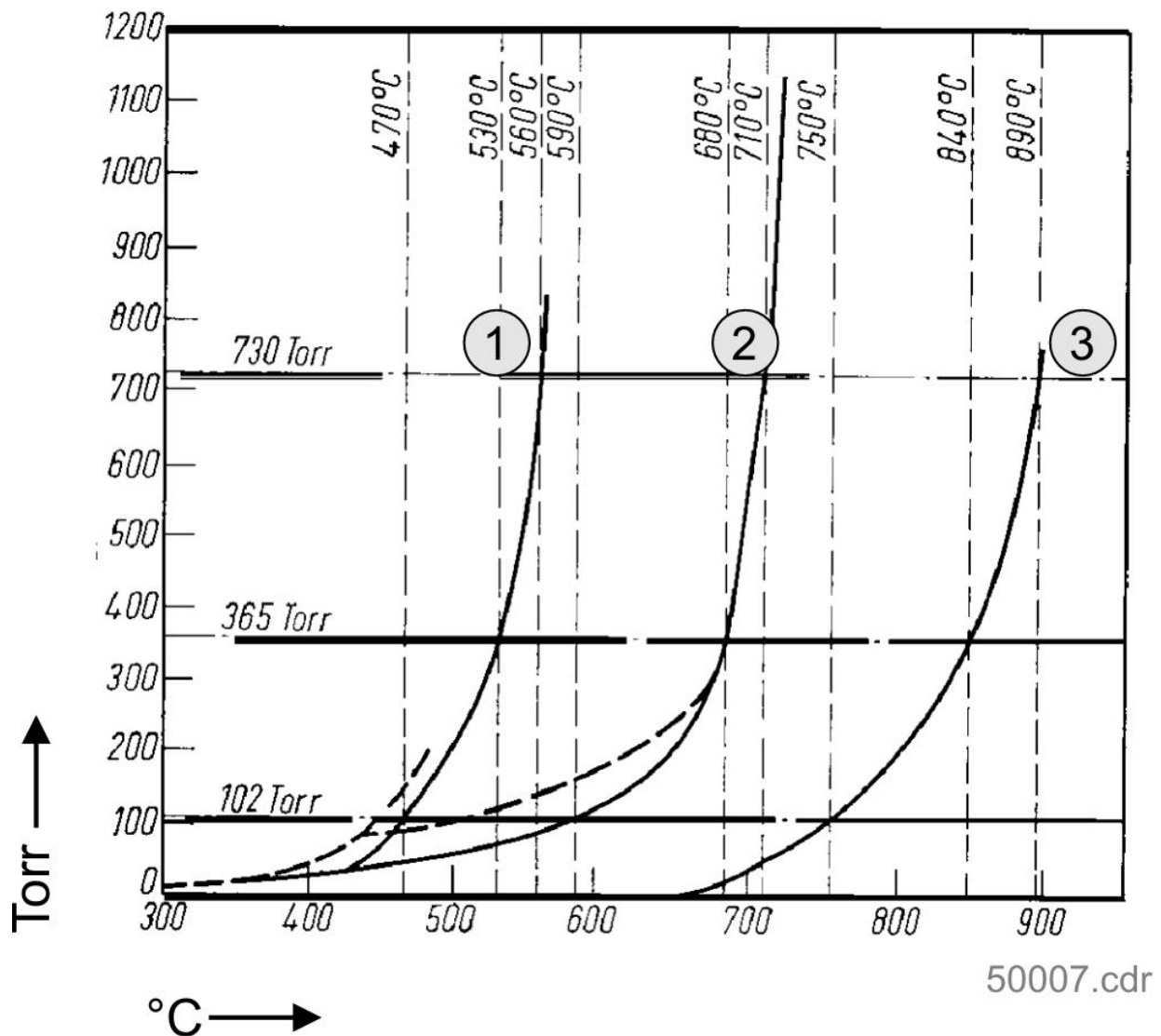


Gráfico 2. Curva de disociación del CaCO_3 en función de la temperatura y presión parcial del CO_2 . La temperatura necesaria disminuye en función del contenido de SiO_2 .

- e) Punto de fusión: una de las particularidades de este compuesto, es que no posee punto de fusión, ya que alcanzada cierta temperatura y presión se produce la disociación descrita en el punto 4.

1.1.1.2.2. Propiedades químicas

La piedra caliza como mineral no tiene propiedades químicas de interés para este estudio.

1.1.2. Extracción de piedra en cantera

El proceso de producción de la cal comienza a partir del estudio de la materia prima en el yacimiento.

	INTRODUCCIÓN	Aumento de Productividad
---	--------------	--------------------------

1.1.2.1. Prospección

Existen diversos métodos de estudio de yacimientos, que se eligen en función de la homogeneidad y la continuidad del mismo. Esta información por lo general es conocida cuando los yacimientos se encuentran en zonas previamente explotadas, polos mineros, etc.

Para este proyecto el yacimiento se encuentra en una zona ampliamente conocida, y el sistema aplicado para su estudio inicial es a través de perforación con diamantina. Este tipo de perforación extrae un testigo cilíndrico de los metros lineales perforados para determinar con precisión las distintas calidades del material en función de la profundidad. Con los análisis de una cierta cantidad de pozos y sus respectivas localizaciones georreferenciadas, se trazan los planos necesarios para que el Departamento de Geología defina el Plan Maestro de Explotación de Cantera. Según la homogeneidad del yacimiento puede validarse la interpolación de los contenidos de CaCO_3 obtenidos en los análisis; de lo contrario deberán realizarse estudios más exhaustivos y utilizar criterios geológicos que permiten modelizar la variación de la composición química de la piedra de un pozo a otro. Estos criterios contemplan las fallas y diversas formas y orientaciones en las que yace el material. Para el caso en cuestión las interpolaciones han sido validadas.

En el Plan Maestro de Explotación, en función de la cantidad de material a remover, se definen la maquinaria que se utilizará para la extracción, y en función de ella los caminos principales y secundarios a desarrollar, la cantidad de frentes a abrir, la altura de los bancos de explotación, los anchos y las pendientes de los caminos, los canales de evacuación, la ubicación de las bombas de desagote, la ubicación de los distintos materiales a remover (encapes: tierra negra, arcillas, toscas, calizas de bajo tenor, etc.). Todo ello para las distintas etapas de la explotación.

Una vez resuelta la forma en que se abordará el yacimiento se procede a destapar la cantera. El destape no siempre es necesario; en el caso de los yacimientos de Olavarría por lo general sí lo es ya que la caliza no aflora naturalmente, y son precisamente la relación entre el nivel de encape con la potencia del yacimiento (profundidad en términos de material útil para producción), y la distancia hasta su planta de procesamiento, los que definen si una cantera es rentable y justifica ser explotada.

En este caso en particular, el yacimiento ya se encuentra desarrollado al punto en que no hay necesidades de destape.

1.1.2.2. Perforación

La perforación se realiza mediante un perforador Atlas Copco ROC 442, cuyo principio de funcionamiento es neumático. Salvo excepciones las perforaciones se realizan en bancos de hasta 17 metros de altura, con brocas de 3" de

	INTRODUCCIÓN	Aumento de Productividad
---	--------------	--------------------------

diámetro, y una inclinación de 5°. La grilla de perforación se determina en función de las características de la piedra caliza con el objetivo de generar la menor cantidad de piedra por debajo de 1 ¼" (31,75 mm) luego de la trituración en planta. Por lo general la grilla utilizada es de 3,5 m x 4,5 m en tresbolillo.

El detrito o "cutting" de perforación es aspirado por la máquina perforadora y el perforista lo almacena en bolsas de polietileno y las rotula con su ubicación para luego entregarlas al laboratorio. Si bien el análisis de este material carece de rigor estadístico y no está normalizado, es un muy buen estimador de la calidad de piedra a obtener en la voladura.

1.1.2.3. Voladura

El servicio de voladura es tercerizado ya que el volumen a explotar no justifica almacenar explosivos en polvorín. Se selecciona el explosivo principalmente en función de la presencia o ausencia de agua en el pozo, y la cantidad a colocar se calcula de acuerdo a las características del banco y la grilla previamente definida.

Las voladuras se realizan de acuerdo al Plan Maestro de Explotación. Por lo general el mismo contempla voladuras semanales, pero en ciertas oportunidades se realizan adelantos de producción. Los adelantos obedecen a las paradas previstas por mantenimiento de los equipos de perforación (perforadora y compresor), o de los equipos de trituración. Adicionalmente puede haber adelantos por tareas específicas de desarrollo en la misma cantera, o de estudio en otras canteras de la empresa que está previsto se exploten en un futuro cercano.

1.1.2.4. Carga y transporte

La carga es realizada con una pala cargadora Komat'Su WA470, cuya configuración es de trabajo pesado (balde "roquero" reforzado y cubiertas L5 de 16 telas), con un balde de 4,3 m³ y una capacidad de carga de alrededor de 310 Tn/hora efectiva.

El trabajo del chofer de la pala cargadora es vital en el proceso de homogenización de la piedra, ya que visualmente debe descartar el material de baja calidad, mezclar el material de calidad superior a la requerida con material de menor calidad, y hacer a un lado el material cuyo tamaño es superior a la abertura de la trituradora y que puede generar atascamientos. Esto reduce significativamente la productividad del equipo, ya que parte de estas tareas pueden realizarse fuera del turno de carga, pero la mayoría se hace durante la carga para evitar realizar movimientos adicionales.

La piedra separada por ser de tamaño excesivo para la trituradora es reducida mediante voladura secundaria. Este tipo de voladura se realiza perforando y colocando explosivos nuevamente o con explosivos de contacto (superficiales).

	INTRODUCCIÓN	Aumento de Productividad
---	--------------	--------------------------

Por supuesto, esto puede considerarse como un retrabajo y en ese sentido implica un costo adicional, pero a la vez para evitar este retrabajo habría que realizar voladuras que generen mayor cantidad de material fino y este material no es útil para los hornos verticales. En definitiva, hay un nivel óptimo de voladura secundaria a realizar y es el que maximiza la cantidad de piedra útil para los hornos.

El transporte es tercerizado. Se realiza mediante una flota de 5 camiones con una capacidad de carga de alrededor de 11 t cada uno. La distancia a recorrer es de 4,1 km desde la cantera hasta la planta de trituración. A esta distancia se le suma el trayecto dentro de la cantera, que no debiera superar los 500 metros, según el frente desde el cual se esté cargando la piedra.

La flota tiene una capacidad de transporte máxima de 140 Tn/hora efectiva, y está en línea con la capacidad de la trituradora.

1.1.3. Trituración

Existen diversas alternativas para reducir materiales. La selección de un triturador debe contemplar las siguientes características del material a reducir:

1. Molturabilidad (mediante el work index): mide el trabajo a realizar para reducir la piedra de un tamaño a otro, y es función del tipo de triturador o molino a utilizar.
2. Lajosidad: algunos materiales tienden a romperse generando “lajas” o fragmentos con una dimensión mucho más corta que las otras dos. Esta tendencia está íntimamente ligada a la naturaleza estratigráfica del yacimiento y la cristalografía del mismo, que definen los planos por donde el material se fractura. Para la calcinación en hornos verticales es conveniente ingresar al horno con piedra lo más esférica posible, o cúbica en su defecto, para que la calcinación sea lo más homogénea posible y asegurar el correcto flujo de gases calientes dentro del horno (asegurar la permeabilidad). De acuerdo al principio de funcionamiento del equipo de trituración puede favorecerse o minimizarse el grado de lajosidad de la piedra. Los principios de funcionamiento son:
 - a. Compresión.
 - b. Impacto.
 - c. Abrasión/fricción.
 - d. Corte.
3. Curva granulométrica deseada (a obtener): en función de los sistemas de reducción posteriores u hornos a alimentar. La granulometría óptima de los hornos verticales debe ser tal que garantice una buena permeabilidad (medida a través del Δp del aire en el ingreso y la salida, o simplemente a través de la potencia de los ventiladores que ingresan

	INTRODUCCIÓN	Aumento de Productividad
---	--------------	--------------------------

el aire de combustión), y una buena calcinación ya que la piedra de tamaño más grande necesita más energía y/o tiempo de residencia en el horno que la piedra más pequeña.

4. Curva granulométrica en el ingreso: el tamaño máximo de piedra de alimentación define el tamaño de la boca de ingreso. El tamaño de la piedra de alimentación se define en el diseño de la voladura, a través de la grilla, el diámetro de perforación, el explosivo a utilizar (cantidad y características), etc. A mayor tamaño de piedra de ingreso, menores costos de perforación y voladura; pero a su vez mayores costos de trituración porque se necesitará un equipo más grande para lograr el resultado deseado.

La planta de trituración consta de un acarreador tipo Grizzly, un impactor Hazemag APK-40 (tamaño máximo de alimentación: 500 mm), un elevador de cangilones metálicos con banda de 6 telas (25 m de altura), una primera zaranda de clasificación de tres paños, y tres pares de silos metálicos de 40 m³ cada uno. El material pasante del paño más fino es enviado a una segunda zaranda cuyo objetivo es separar la tierra y el polvillo de caliza de la piedra fina que se utiliza como filler o para la venta.

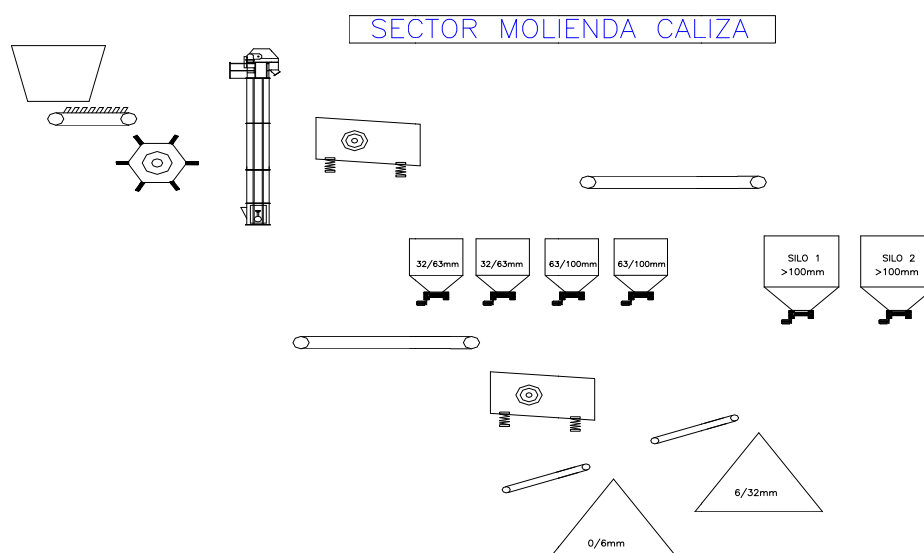


Ilustración 1. Sector de trituración (sólo elementos activos).

	INTRODUCCIÓN	Aumento de Productividad
---	--------------	--------------------------

Como equipos inactivos, se pueden mencionar una instalación de lavado de piedra y un clasificador tipo trommel, ambos destinados a agregar valor a las fracciones más finas.

Los paños seleccionados para ambas zarandas se detallan en el punto 1.1.3.1.

1.1.3.1. Piedra útil para hornos (PUH)

Así como para la trituración, existen diversas tecnologías de calcinación que permiten optimizar el proceso de acuerdo a distintas variables de costos. Entre los factores a considerar se encuentra la granulometría de la piedra que ingresa a los hornos.

Idealmente la piedra debería tener una granulometría acotada, es decir poca dispersión, pero calcinar piedra de un tamaño específico implica descartar el resto (a menos que existan otros procesos o clientes que puedan absorberla). A su vez la granulometría define el consumo energético, la calidad y la productividad de un horno, lo que hace que esta sea una decisión de compromiso.

Para la tecnología de calcinación de la que se dispone, la piedra útil para hornos (PUH) tiene un tamaño mínimo de 28,6 mm (1 ⅛") y máximo de 101,6 mm (4"). En resumen, **PUH: 28,6 – 101,6 mm**, clasificada a su vez en dos franjas granulométricas: 28,6 - 63,5 mm (2 ½"), y 63,5 – 101,6 mm. Los paños de clasificación de la primera zaranda son entonces de 4" el superior, de 2 ½" el inferior.

1.1.3.2. Piedra no útil para hornos (Descarte)

Como consecuencia del punto 1.1.3.1, todo el material menor a 28,6 mm se considera no útil para hornos. Esto no significa que este material no tenga otros usos; puede servir para otras tecnologías de calcinación como hornos horizontales, para venderse micronizado, etc.

1.1.4. Calcinación

El proceso de calcinación consiste en disociar el CO₂ del CaO o MgO (en el caso de la piedra dolomítica). Este proceso es gobernado por la energía, el tiempo de exposición y la presión, por lo cual existen diversas tecnologías de calcinación que permiten aprovechar al máximo el recurso más escaso o más costoso.

Algunos hornos permiten calcinar piedra de menor granulometría que otros, ampliando el espectro de PUH, mejorando el aprovechamiento de la piedra. Otros hornos son más eficientes energéticamente, en principio por las características de la aislación térmica, pero más importante aún, por la capacidad de recuperar la energía de los gases de salida y utilizarlos para precalentar la piedra de ingreso o inyectar estos gases en algún punto del

	INTRODUCCIÓN	Aumento de Productividad
---	--------------	--------------------------

horno. Generalmente la calcinación se realiza a presión atmosférica, pero existen hornos que funcionan con presión positiva (son sellados e insuflados con soplantes) y otros con presión negativa (aspirados).

Desde el punto de vista energético también hay que tener en cuenta el tipo de combustible del que se dispone en cuanto a sus características físicas: sólido (con su granulometría), líquido, o gaseoso (con su presión), y sus características químicas (con su variabilidad): composición (fórmula química), poder calorífico superior e inferior, humedad e impurezas. A su vez algunos diseños de hornos permiten que el intercambio de calor se efectúe en el mismo sentido de circulación del material, o contracorriente, dando características distintas al resultado de la calcinación.

1.1.4.1. Hornos verticales de carga mixta

En este caso, el establecimiento cuenta con seis hornos verticales de carga o lecho mixto dispuestos de a pares en línea recta. Estos hornos están diseñados con una zona de precalentamiento, una zona de calcinación (conocida como “zona de fuego”) y una zona de enfriamiento de forma cónica. Cada zona del horno está revestida con material refractario especialmente calculado para soportar las temperaturas propias de la instancia del proceso de calcinación, el comportamiento químico (ácido o base), el estado de agregación y el efecto abrasivo del material que la recorre. La altura de los hornos es de 12,22 metros y el diámetro interno es de 3,65 metros, definiendo una esbeltez relativamente baja de 3,35.

Estructuralmente, cada horno cuenta con su bóveda y tres chimeneas equidistantes en su parte superior, y una descarga sobre canasto vibratorio que desemboca en una cinta metálica. El material extraído de los primeros cinco hornos converge a una fosa en la que una única cadena de arrastre lo mueve hasta un elevador a cadena de cangilones metálicos. El sexto horno descarga directamente sobre la caída que alimenta al elevador, sin necesidad de la cadena de arrastre.

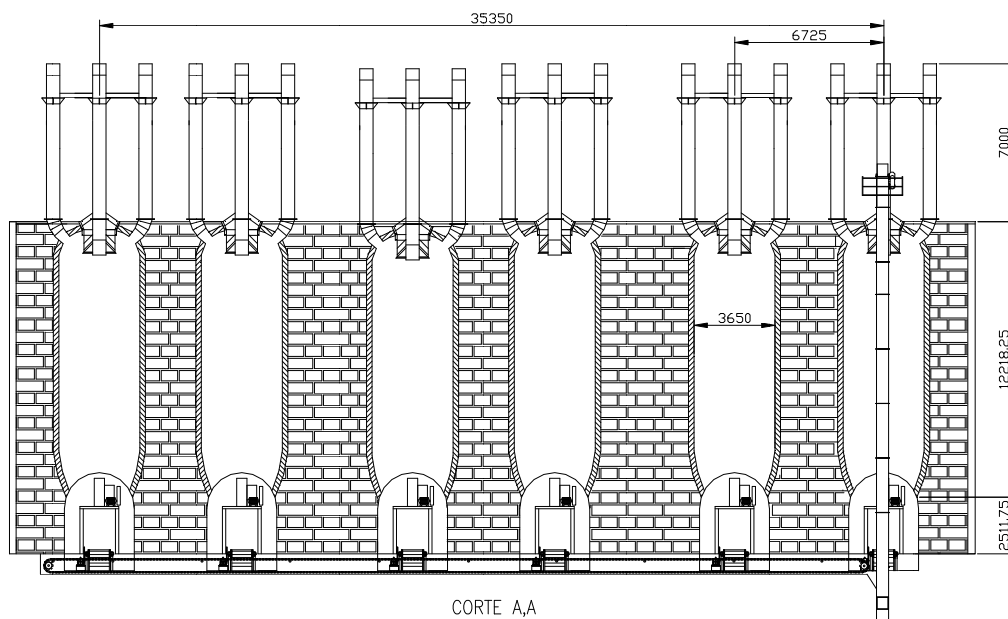


Ilustración 2. Hornos verticales.

El elevador descarga a un pantalón de derivación que permite alimentar directamente un silo metálico, o una cinta transportadora de goma de alta temperatura. Esta cinta a su vez descarga en un pantalón que permite alimentar directamente un segundo silo metálico o una segunda cinta transportadora que alimenta un tercer silo metálico de menor tamaño, tal como se muestra en la Ilustración 3.

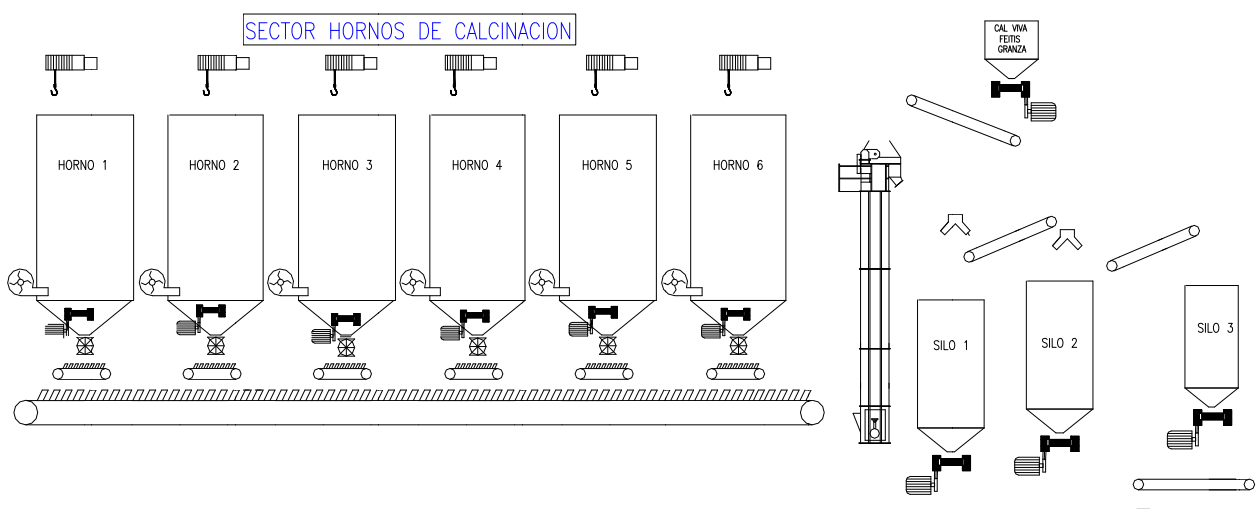


Ilustración 3. Sector hornos de calcinación.

1.1.4.2. Termólisis

Como reacción, la calcinación puede encuadrarse dentro de un tipo de reacción más amplio denominada termólisis. Esto permite entender el proceso como una descomposición térmica en la cual la granulometría del material a descomponer y la forma en que se presenta el combustible son sólo casos particulares en una infinidad de manifestaciones posibles.

La piedra, por ser fósil y sedimentaria, tiene distintas estructuras cristalinas y porosidades, como se observa en la Ilustración 4.

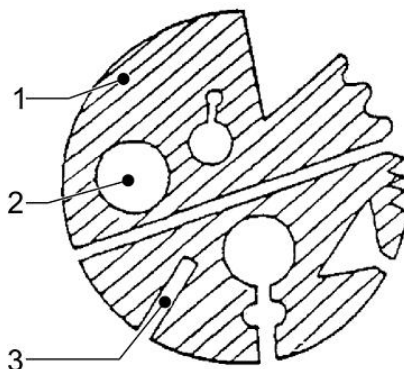


Ilustración 4. Distintos tipos de poros presentes en la piedra caliza. 1: Poro sólido- 2: Poro inaccesible – 3: Poro accesible.^v

En la reacción de calcinación, se calienta la superficie de la piedra y se empieza a disociar el CO_2 , como se observa en la Ilustración 5. A medida que el calor avanza hacia el centro por radiación, convección y conducción, el CO_2 removido va saliendo por los poros accesibles, mientras que la presión en los poros inaccesibles aumenta al punto que puede llegar a fracturar la piedra. La crepitación es un fenómeno frecuente e indeseado en el proceso, ya que a medida que el material se fractura el horno va perdiendo permeabilidad y por ende dificulta el flujo de gases.

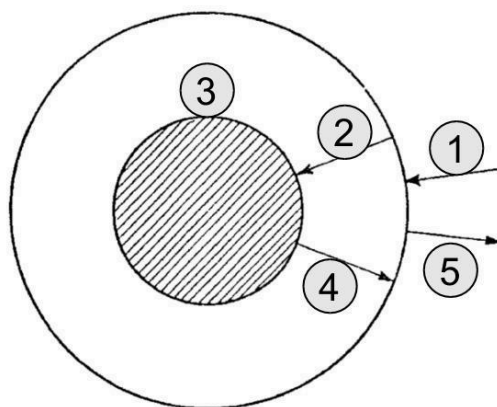


Ilustración 5. Calcinación. 1: El proceso comienza en la superficie. – 2: Con los gases calientes como vehículo, el calor penetra a través de los poros por convección, también

^vOperating and Maintenance Instructions, Maerz Lime Kiln AK 604 Manual. Maerz Ofenbau AG.

	INTRODUCCIÓN	Aumento de Productividad
---	--------------	--------------------------

lo hace por conducción del material mismo, y radiación. – 3: El centro de la partícula es la zona más inaccesible, ya que a su vez el CaO de la superficie aísla mejor del calor que el CaCO_3 . - 4: El CO_2 sale a través de los poros. – 5: Finalmente el CO_2 llega a la superficie y es eliminado.

Como se observa en la Ilustración 6, el fenómeno comienza con una dilatación de la piedra, luego se calcina la superficie, luego la calcinación continúa hasta el centro de la piedra, y por último el material se contrae levemente respecto de su tamaño original. Según la velocidad en la que esto ocurre y la distribución de energía dentro del horno y en el entorno del material a calcinar, es posible que altas concentraciones de calor produzcan el efecto que se observa en el punto 5 de la Ilustración 6, antes de completar los 4 anteriores. Este fenómeno, ocurriendo en la superficie de la piedra, dificulta la salida del CO_2 , aumentando su presión parcial en el centro de la piedra haciendo que se remueva menor cantidad de CO_2 . Esto ocurre con mayor frecuencia en los hornos de carga mixta, como es el caso de estudio, ya que el carbón incandescente está en contacto directo con la piedra.

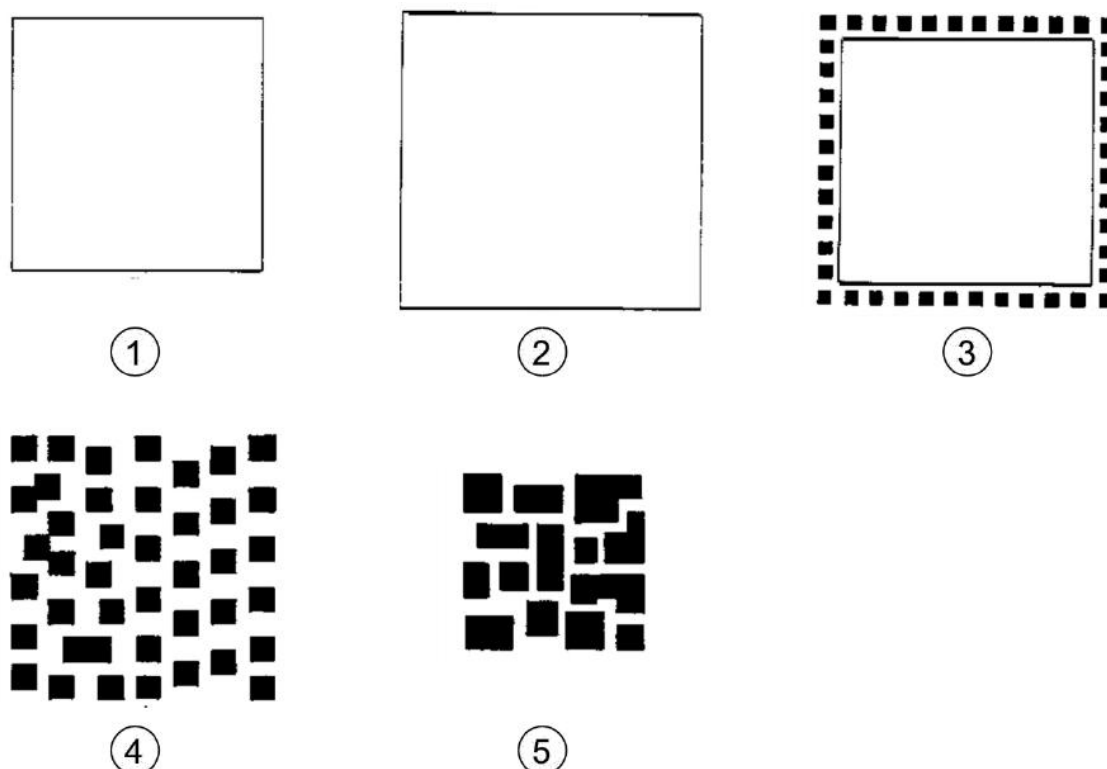


Ilustración 6. La calcinación comienza con un fenómeno de dilatación (de 1 a 2), luego la disociación del CO_2 del CaCO_3 o $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ en la superficie (de 2 a 3), luego el mismo fenómeno en todo el volumen (de 3 a 4), y Finalmente una contracción (de 4 a 5). Si todo este proceso ocurre rápidamente, la superficie se contraerá antes de remover el CO_2 en todo el volumen, dificultando la entrada de gases calientes para la calcinación por convección, y dificultando la salida de CO_2 (aumentando su presión parcial) que pueda producirse por la menor convección y menor conducción (disminuye ya que el CaO superficial conduce el calor menos que el CaCO_3).

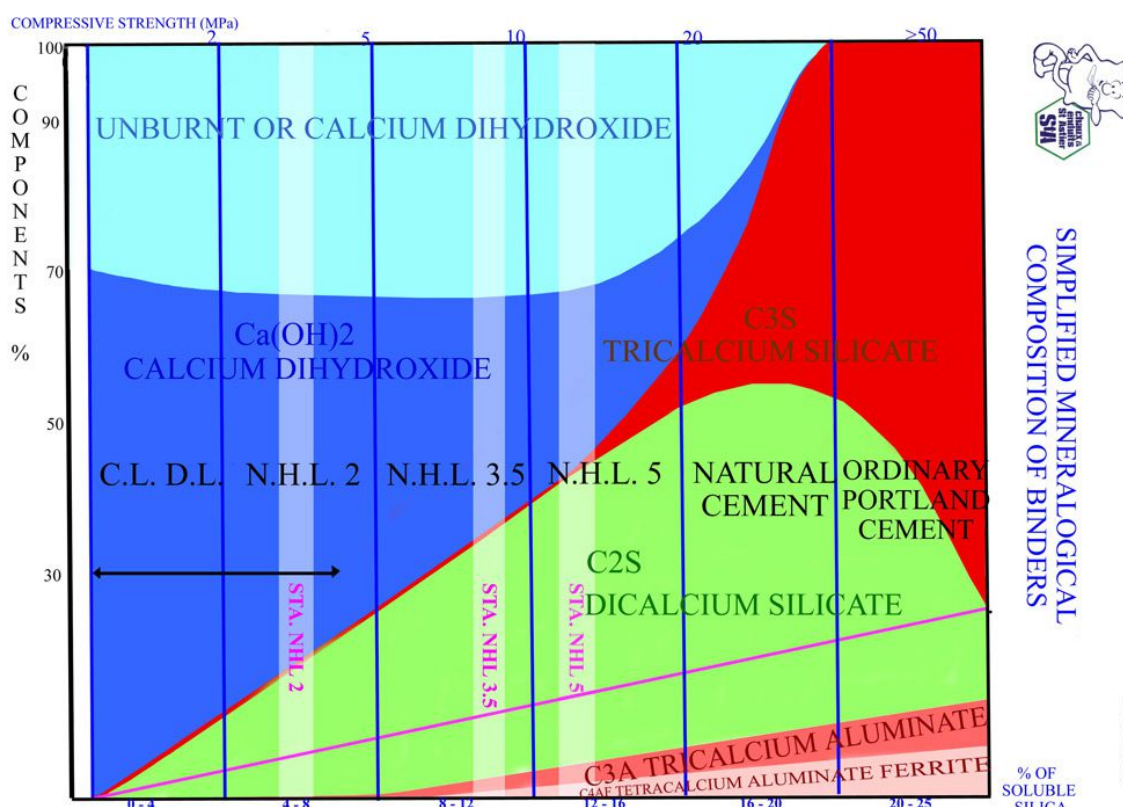
1.1.4.3. La cal viva

El resultado de la calcinación de la piedra caliza es llamado cal viva, independientemente del grado de calcinación alcanzado. En un proceso de calcinación perfecta, la ecuación química es como se muestra en la Ecuación 2:



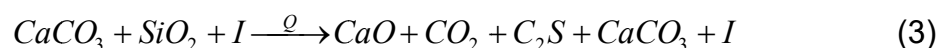
, donde I representa las impurezas que no se transforman por exposición al calor.

En el caso de la caliza hidráulica, la presencia de SiO_2 da como resultado la formación de silicatos cálcicos, que son los que le confieren propiedades hidráulicas y resistencia mecánica. El contenido y los tipos de silicatos dependen de la cantidad de SiO_2 soluble presente en la materia prima, pero en su mayoría se trata de silicatos dicálcicos (C_2S , ó $2CaO \cdot SiO_2$), tal como se muestra en la Ilustración 7.



^{vi}<http://www.limes.us/technical-info/simplified-composition-of-lime-binders/>

Por lo cual lo que realmente ocurre en mayor o menor medida es lo que se muestra en la Ecuación 3, que por supuesto es ilustrativa y no está balanceada estequiométricamente:



, es decir que además de persistir las impurezas, parte del $CaCO_3$ no se calcina quedando como tal y el CaO resultante disminuye debido a la combinación de una parte con el SiO_2 . Lo que queda libre se denomina CaO útil y es el que en el proceso de hidratación efectivamente se combina con el H_2O para formar $Ca(OH)_2$.

La composición química de la piedra caliza, la tecnología de calcinación y la operación de esta tecnología son determinantes a la hora de obtener un alto contenido de CaO útil en la cal viva. En cuanto a composición química, los valores promedio son los que se muestran en el Gráfico 3, donde $RI+SiO_2$ responde a los Residuos Insolubles y SiO_2 , y R_2O_3 son en su mayoría óxidos de hierro (Fe) y aluminio (Al).

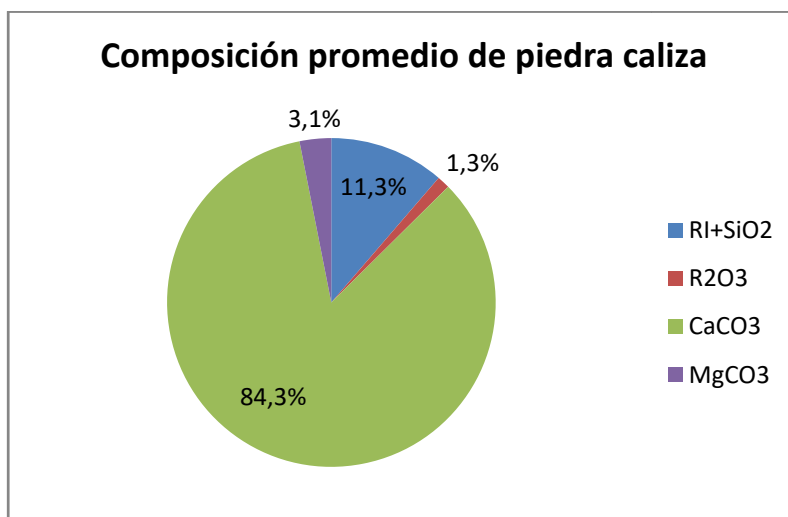


Gráfico 4. Composición de la piedra caliza.

En el proceso de calcinación, el CO_2 combinado con MgO y CaO es removido, eliminándose como gas. La cantidad de CO_2 pasible de ser removida con piedra de estas características es alrededor de un 38,7% en condiciones ideales, como se muestra en el Gráfico 5.

Las clasificaciones que figuran en la Ilustración 4 se corresponden con la norma europea EN-459, donde existen 3 tipos de cales hidráulicas “naturales”: NHL2, NHL3.5 y NHL5. Los valores 2, 3.5 y 5 hacen referencia a la resistencia mínima a la compresión lograda a 28 días, en Newtons. Para mayor detalle ver la ilustración en Anexo II.

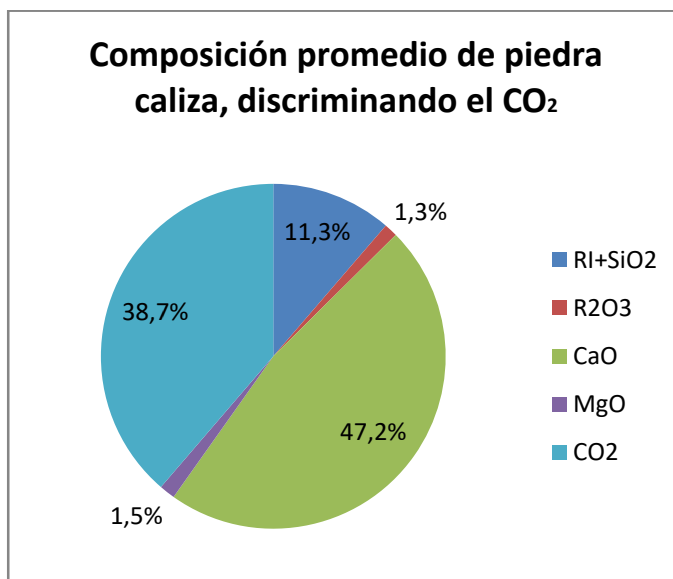


Gráfico 6. Composición química de la piedra caliza. El %CO₂ es el compuesto removible en el proceso de calcinación.

Cada tipo de horno tiene un valor óptimo de %CO₂ remanente, que conserva la integridad estructural del horno (cuidado de refractarios) y determina un eficiente uso de la energía en el proceso de calcinación. Para hornos verticales de estas características la composición de la cal viva obtenida es la que se muestra en el Gráfico 7, en concordancia con la Ecuación 3. En el mismo se agrupan los RI con el SiO₂ insoluble ya que se comportan en forma similar. El MgO, al ser la temperatura de calcinación del MgCO₃ muy inferior a la del CaCO₃, siempre resulta sobrequemado (inerte).

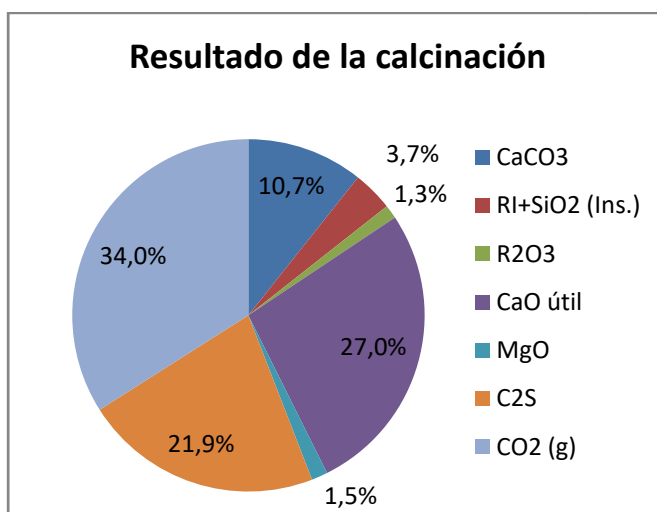


Gráfico 8. Resultado de la calcinación. Se observa que el CO₂ removido es 34%, sobre un total de alrededor de 38,7%. El CO₂ remanente se encuentra todavía combinado con el CaO en forma de carbonato.

Al eliminarse el CO_2 (gas obtenido en la reacción), las proporciones de los sólidos resultantes son las que se muestran en el Gráfico 9, donde se observa que el contenido de CaO útil es de un 40,9%.

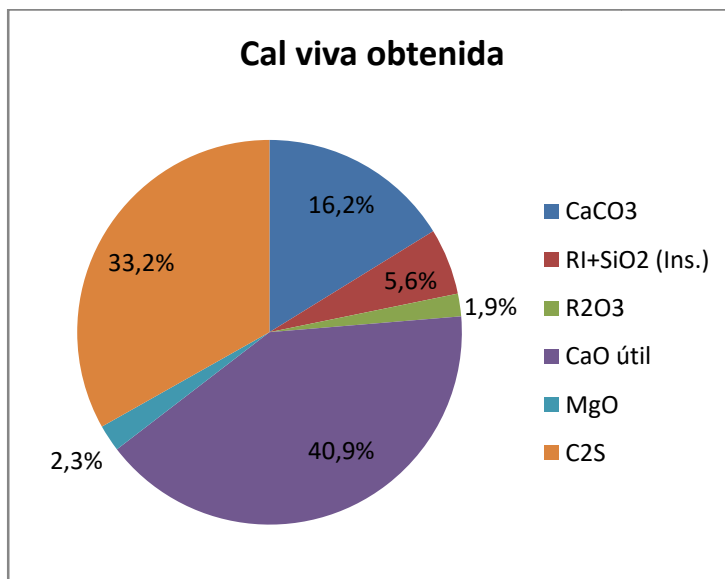


Gráfico 10. Composición de la cal viva obtenida. El CaCO_3 se obtiene a partir del análisis de determinación del CO_2 residual (PPC1000 – pérdidas por calcinación a 1000°C), el CaO útil, el MgO y los R_2O_3 a partir de análisis por ataque químico, el C_2S a partir de la diferencia entre el CaO total (ataque químico) y el CaO útil + el CaO contenido en el CaCO_3 residual. Finalmente los $\text{RI}+\text{SiO}_2$ insolubles (no combinables con el CaO) se obtienen por diferencia entre los iniciales y los combinados en el C_2S ^{vii}.

El CO_2 residual es un 7,1%; este parámetro puede no decir mucho en el caso de estudio pero es considerado un indicador importante de calidad.

Luego del proceso de calcinación, sólo el 40,9% del material obtenido puede reaccionar con el H_2O en el proceso de hidratación. No sólo eso, sino que por cada tonelada de piedra caliza que ingresa a los hornos, se obtienen 0,66 toneladas de cal viva; el resto se elimina como CO_2 (gas).

En definitiva, por cada 1.000 kg de piedra caliza calcinada, 270 kg de cal viva reaccionarán en el hidratador.

1.1.5. Hidratación o “apagado” de la cal viva

El óxido de calcio CaO es una sustancia altamente higroscópica. En presencia de agua la reacción ocurre en tres etapas claramente identificables (en especial en las cales más reactivas), esquematizadas en la Ilustración 8:

1. Cinética
2. Transitoria
3. Difusión

^{vii} Las normas utilizadas para efectuar los ensayos de determinación del contenido de estos compuestos son las ASTM C25-93a e IRAM 1613.

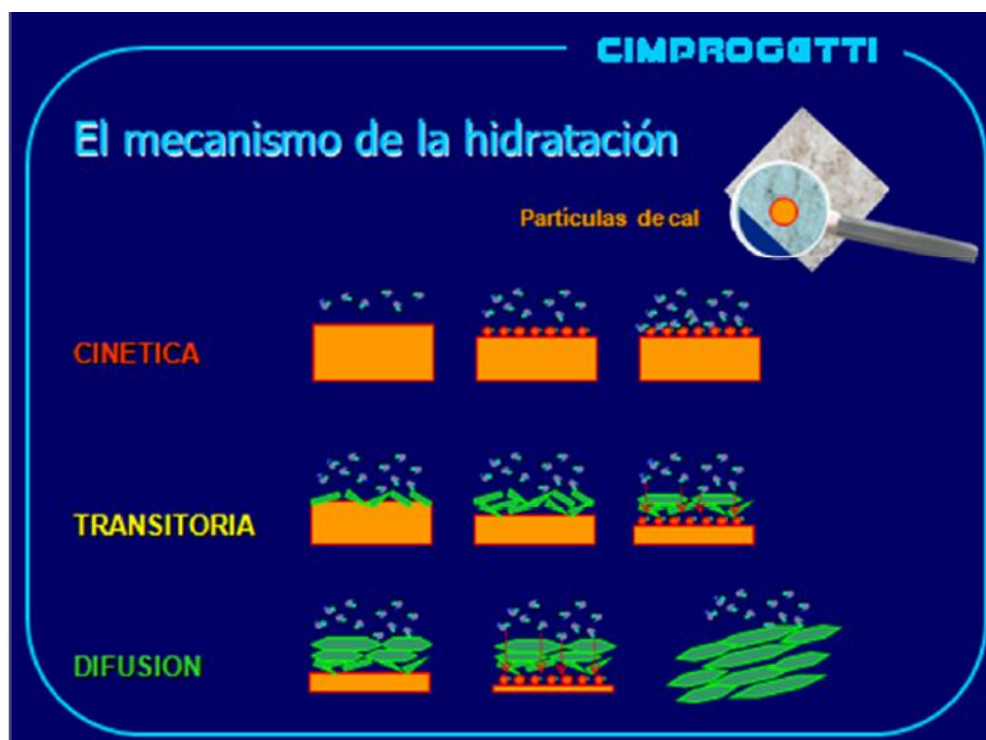
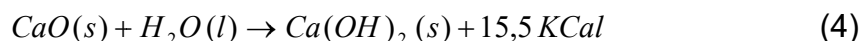


Ilustración 8. Fases de la reacción de hidratación.^{viii}

A su vez, esta reacción es exotérmica, liberando calor conforme la Ecuación 4.



La velocidad de esta reacción depende de la capacidad del agua para encontrar y ponerse en contacto con partículas de CaO libre. Es en este momento cuando cobra importancia la mineralogía y el cómo fue calcinada la piedra caliza que le dio origen. La velocidad de la reacción es medible y de hecho importante para ciertos procesos industriales: en los procesos continuos una alta reactividad implica equipos de menor tamaño porque el material no necesita tanto tiempo de residencia; en otros procesos, como la fabricación de “hormigones celulares” curados en autoclave (HCCA), la reactividad debe cumplir con algunos requisitos para no fragilizar el hormigón ni demorar el proceso. En la Ilustración 9 se puede observar una curva típica de cal de alta reactividad, y se discriminan las fases de la reacción.

^{viii} Desarrollo del Proceso de Hidratación de la Cal, O. Collarini (Director General de Cimprogetti S.p.A), Dalmine, Italia. Presentado en LimeCon Diciembre 2012.

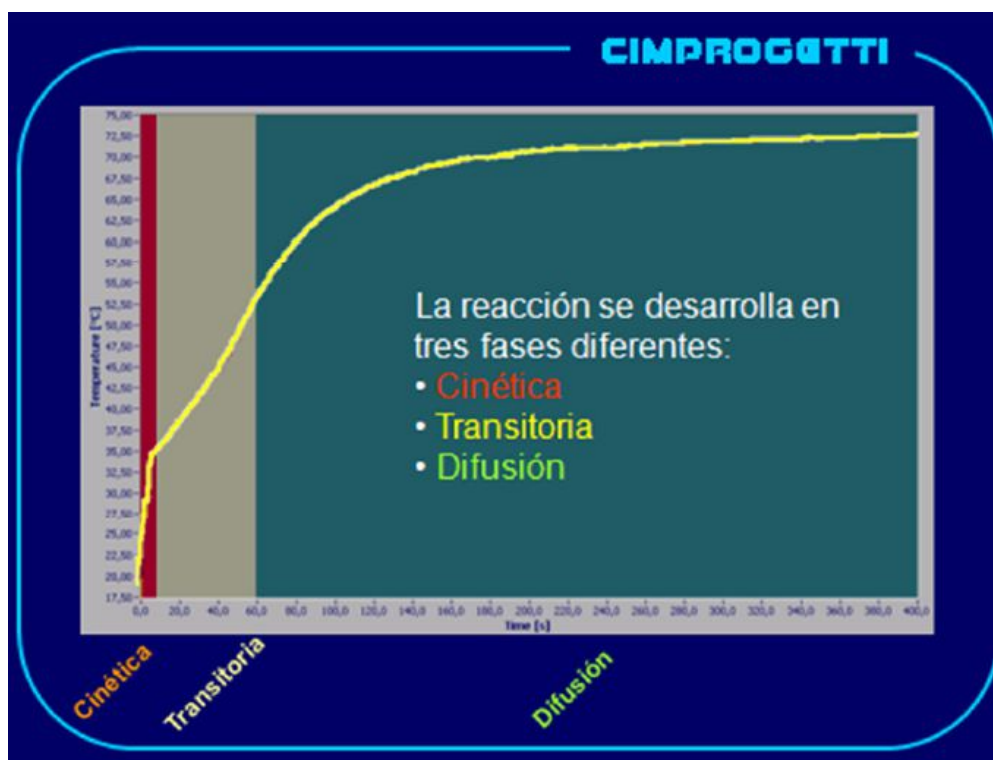


Ilustración 9. Curva de reactividad: tiempo (segundos) vs. elevación de temperatura (°C).^{ix}

La primera fase de la reacción es la más violenta por el contacto sin obstrucciones entre el agua y la cal viva. La cal hidratada generada previene el contacto del agua con la siguiente capa de cal viva, razón por la cual la velocidad de reacción disminuye (etapa transitoria). Finalmente las partículas de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ empiezan a separarse cuando se forman definitivamente los cristales, y el agua ayudada por una mayor temperatura y menor tensión superficial, termina penetrando con más facilidad, completando la reacción.

En el caso de estudio el resultado de la calcinación es una cal viva pobremente calcinada y de baja reactividad. Por lo general lo que se usa para acelerar el proceso de hidratación, es una molienda previa al hidratador para exponer la mayor cantidad de superficie posible. Esto posibilita una hidratación más controlada y así efectiva, ya que la necesidad de H_2O se satisface en su mayoría dentro del “apagador”, y la cal hidratada obtenida sale del equipo totalmente seca (con un contenido de humedad de alrededor de 0,5%).

Tradicionalmente los equipos hidratadores son como los que se muestran esquemáticamente en la Ilustración 10^x.

^{ix} Desarrollo del Proceso de Hidratación de la Cal, O. Collarini (Director General de Cimprogetti S.p.A), Dalmine, Italia. Presentado en LimeCon Diciembre 2012.

^x Oates, Joseph A. H.. 1998. Lime and Limestone: chemistry and technology. production and uses. 474 páginas. Editorial Wiley-VCH Variag GmbH, ISBN 3-527-29527-5.

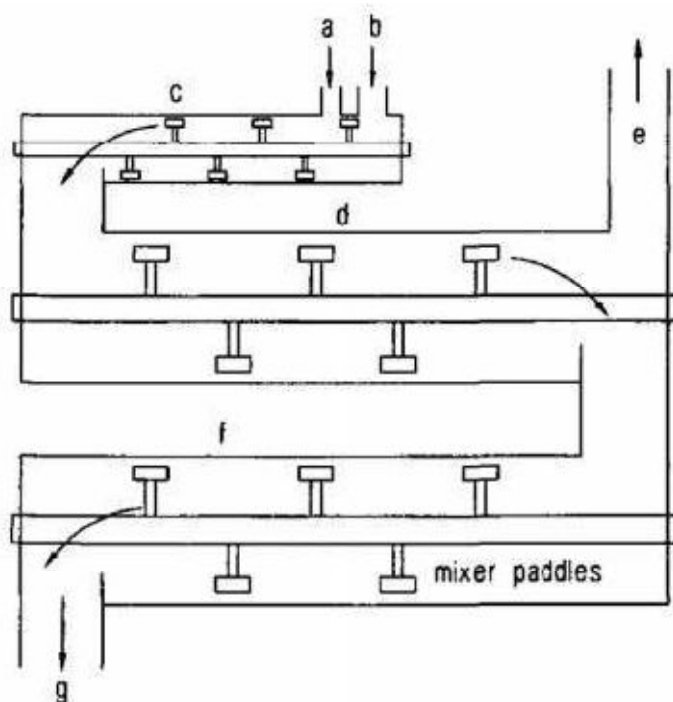


Ilustración 10. Hidratador tradicional de 3 etapas. (a) Agua; (b) Cal viva; (c) Pre-hidratador; (d) Hidratador; (e) Vapor y aire hacia colector de polvo; (f) Etapa final; (g) Hidrato "crudo"

En el caso de estudio, el sector de hidratación comienza en la descarga de los silos de cal viva y filler y termina en los silos de cal hidratada, tal como se observa en la Ilustración 11.

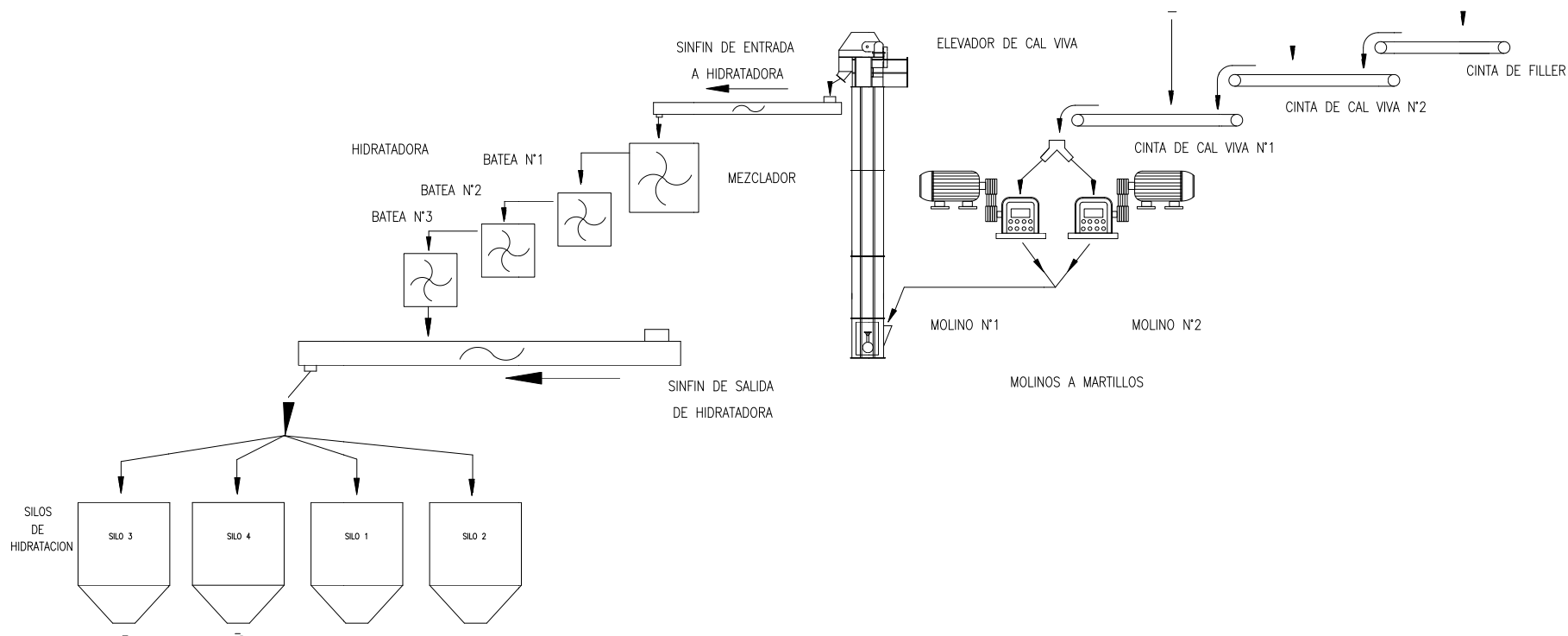


Ilustración 11. Equipos que componen el sector de hidratación. El sector comienza con las cintas de descarga de los silos de cal viva y filler. Estas cintas alimentan dos molinos de martillos que trabajan en paralelo para reducir la cal viva a un tamaño 100% pasante de tamiz 8. La cal viva molida es elevada mediante cangilones hasta un tornillo de alimentación de la primera batea denominada “mezcladora”, donde hace contacto con el agua que ingresa por un circuito paralelo. Por rebalse el material ingresa a una segunda batea, denominada “primera batea de hidratación”, luego a una segunda y tercera batea de hidratación, que le dan tiempo de residencia suficiente para poder completar su apagado. La cal hidratada puede enviarse a cualquiera de los 4 silos de hormigón, que tienen una capacidad de 36 m³ cada uno.

	INTRODUCCIÓN	Aumento de Productividad
---	--------------	--------------------------

Adicionalmente, ya que la planta originalmente no fue diseñada previendo la incorporación de filler en el producto, el sistema más sencillo, controlado y económico que se encontró fue incorporarlo mediante uno de los silos de cal viva. Es decir que al hidratador además de cal viva y agua, para algunos productos ingresa filler, que por supuesto se comporta como un inerte.

1.1.6. Separación y molienda

Luego del proceso de hidratación, y en función de la granulometría de ingreso al hidratador, puede ser necesaria una molienda para llevar el material a especificaciones de comercialización.

Existen diversas alternativas productivas que satisfacen esta necesidad, por supuesto cada una con sus costos asociados de instalación, operación y mantenimiento, que permiten mayor o menor control de las características del producto terminado.

Todo lo que se realiza en esta etapa del proceso no afecta la composición química del producto, sólo sus características físicas tales como granulometría y densidad aparente.

La elección de los equipos de molienda y clasificación depende como siempre de las cantidades que debe procesar por unidad de tiempo, la dureza del material, la granulometría de ingreso y la granulometría deseada en la salida. Para este tipo de aplicaciones, son frecuentes los molinos de bolas en circuito cerrado con uno o más separadores dinámicos. Este sistema asegura la granulometría deseada de acuerdo con la eficiencia del separador.

En el caso de estudio, la planta originalmente contaba con una terna de separadores que funcionan en paralelo y un molino doble rotador, que es un circuito cerrado en sí mismo (contaba con un separador estático). Luego se hizo una inversión en la que el molino doble rotador fue reemplazado por un molino de bolas de mayor productividad y con la capacidad de moler filler calcáreo, cuyo uso original era en molienda de clinker. Adicionalmente se montaron dos separadores: uno de uso habitual y otro de respaldo; y un filtro de mangas que aumenta la productividad del molino de bolas.

El molino de bolas, a su vez fue modificado internamente, ya que contaba con dos cámaras:

1. Molienda gruesa: normalmente esta primera cámara ocupa alrededor del 30% del largo del molino, y está revestida de placas que permiten una mayor elevación de los elementos moledores que la ocupan. Las bolas con las que muele tienen diámetros desde los 60 mm hasta los 90 mm, aunque también pueden ser mayores. El principio de molienda es por impacto, razón por la cual una vez calculado el tamaño máximo de bola

	INTRODUCCIÓN	Aumento de Productividad
---	--------------	--------------------------

se busca igualar la cantidad de bolas por tamaño, a fines de igualar la cantidad de impactos.

2. Molienda fina: el resto del equipo está revestido con placas con menor capacidad de elevación, pero por supuesto no puede diferir mucho de la de las placas de la cámara primaria, ya que la velocidad de rotación debe servir para ambas cámaras. El principio de molienda en este caso es por fricción o abrasión. Los diámetros utilizados van desde 25 mm a 60 mm, y si es posible, se busca mantenerlos medianamente clasificados de mayor a menor en el sentido en el que circula el material. Esto se busca para ir acompañando la granulometría del material con el tamaño de bola que debe molerlo; las bolas de mayor diámetro muelen el material más grueso, y a medida que disminuye la granulometría debe ir disminuyendo el tamaño de bola, aumentando la superficie efectiva de molienda. En el caso de estudio esto se lograba mediante unos anillos internos denominados “dánulas” que si bien no estaban conformados por placas ciegas, mantenían cierto orden interno que periódicamente debía restituirse en los operativos de clasificación.

Las modificaciones que se hicieron posteriormente, fueron las de quitar el diafragma que separaba las dos cámaras (se hizo “monocámara”) y eliminar las dánulas. Sin embargo no hubo modificaciones en el tamaño máximo de bola ni la curva de bolas con la que debía trabajar este molino.

Los equipos que componen el sector pueden observarse en la Ilustración 12.

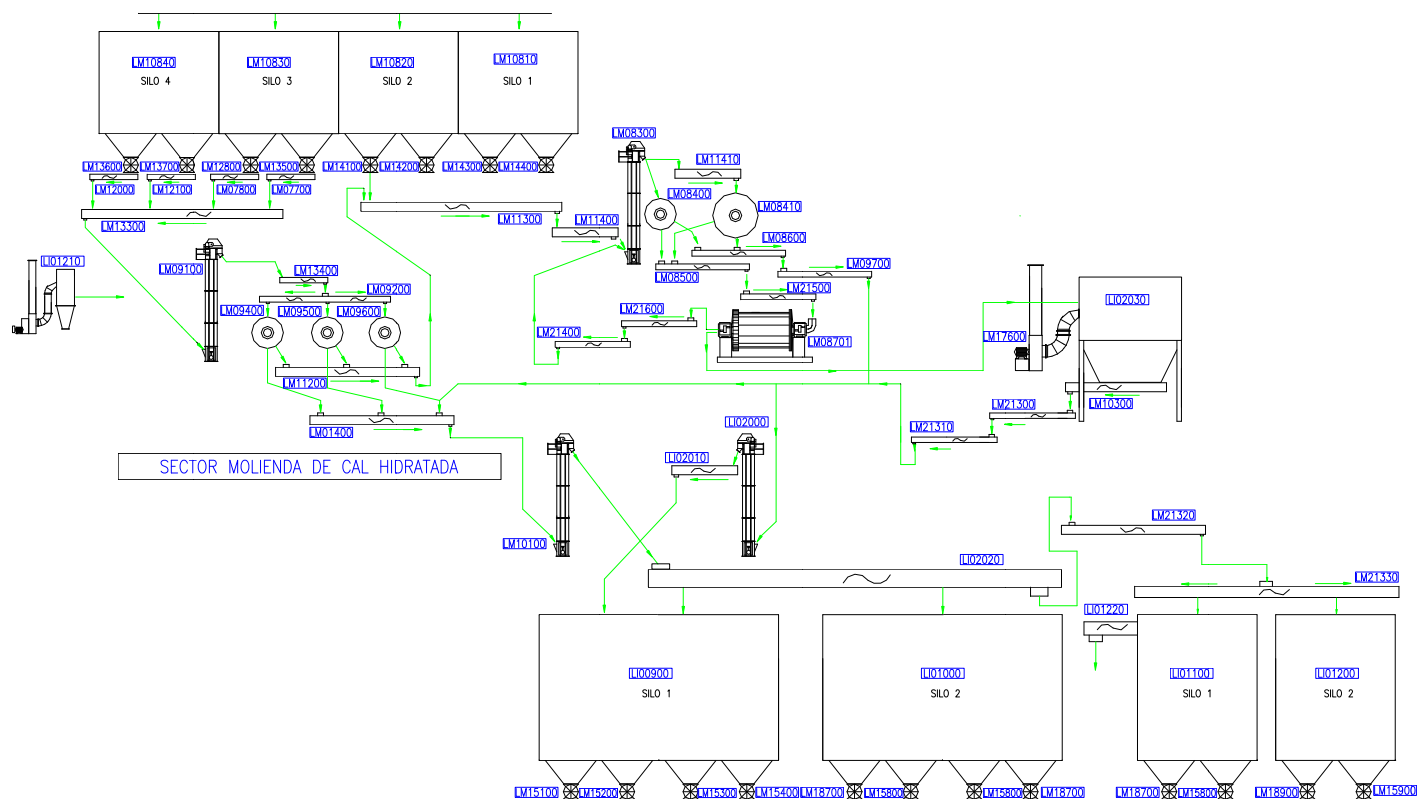


Ilustración 12. Equipos que componen el sector de molienda y separación de cal hidratada. Los 4 silos de hormigón se descargan a través de válvulas rotativas de velocidad variable y alimentan los primeros 3 separadores que trabajan en paralelo. El material que cumple con las especificaciones es enviado directamente a los 4 silos de producto terminado, mientras que el rechazo es enviado al circuito cerrado de separación y molienda. A medida que el material recircula va disminuyendo su granulometría hasta que el separador lo clasifica y envía a los silos de producto terminado, junto con lo que previamente se había enviado desde los primeros tres separadores. El filtro de mangas aspira el molino y también envía el material aspirado a los silos de producto terminado.

	INTRODUCCIÓN	Aumento de Productividad
---	--------------	--------------------------

1.1.7. Envasado

Para su comercialización, el producto es envasado en distintas presentaciones:

1. Bolsones tipo “big bag” de 1,0 y 1,5 toneladas.
2. Bolsas de papel de 20, 25 y 30 Kg.

Por cuestiones de transporte, las bolsas se consolidan en pallets de 1,5 Tn.

Existen diversas tecnologías para realizar el embolsado y palletizado; por lo general son dos equipos separados que se compran en conjunto al mismo fabricante ya que es importante que haya una buena comunicación a nivel programación entre ellos. Es decir, para poder aprovechar al máximo ambos equipos es necesaria una buena sincronización y esto por lo general viene resuelto cuando se compran ambos equipos al mismo fabricante.

El diseño de los envases juega un papel fundamental en esta etapa, ya que si el volumen resultante es chico, la embolsadora tardará mucho tiempo en lograr que el envase alcance el peso previsto. Esto hace que la embolsadora retenga el envase más tiempo del debido hasta que haya desalojado suficiente aire (que ingresa con el producto fluidificado) y libere la bolsa.

Por contrapartida los envases chicos logran bolsas más densas y compactas, y la paletizadora trabaja mejor con este tipo de bolsas. Por lo general este tipo de equipos necesita que la bolsa se comporte como un sólido indeformable.

Por lo cual el diseño del envase debe satisfacer las necesidades de la paletizadora y a la vez debe rendir en productividad para ambos equipos. Es por esto que la mayoría de los equipos nuevos vienen con sistemas que ayudan a desalojar aire del envase o a ingresar la menor cantidad posible, así hay menor cantidad para desalojar. La calidad del material del envase también debe favorecer la respiración, ya sea por la porosidad de la celulosa misma, como por la trama de microperforaciones que se le pide al proveedor.

En el caso de estudio, los envases están hechos de celulosa de segunda, y tienen dos capas de papel de 70 g/m² cada una. Ambas capas están microperforadas, pero los poros no están alineados para generar un efecto “laberinto” al material y que sólo salga aire. La embolsadora es frontal de 4 boquillas, e impulsa el material fluidificado con paletas giratorias. Permite dos velocidades de llenado mediante un sistema de poleas, pero durante el ciclo de llenado mantiene siempre la misma velocidad. El control del peso se hace mediante un sistema basado en un brazo de palanca, que puede regularse con una serie de contrapesos que van desde los 50 hasta los 500 gramos.

Los equipos que componen el sector pueden observarse en la Ilustración 13.

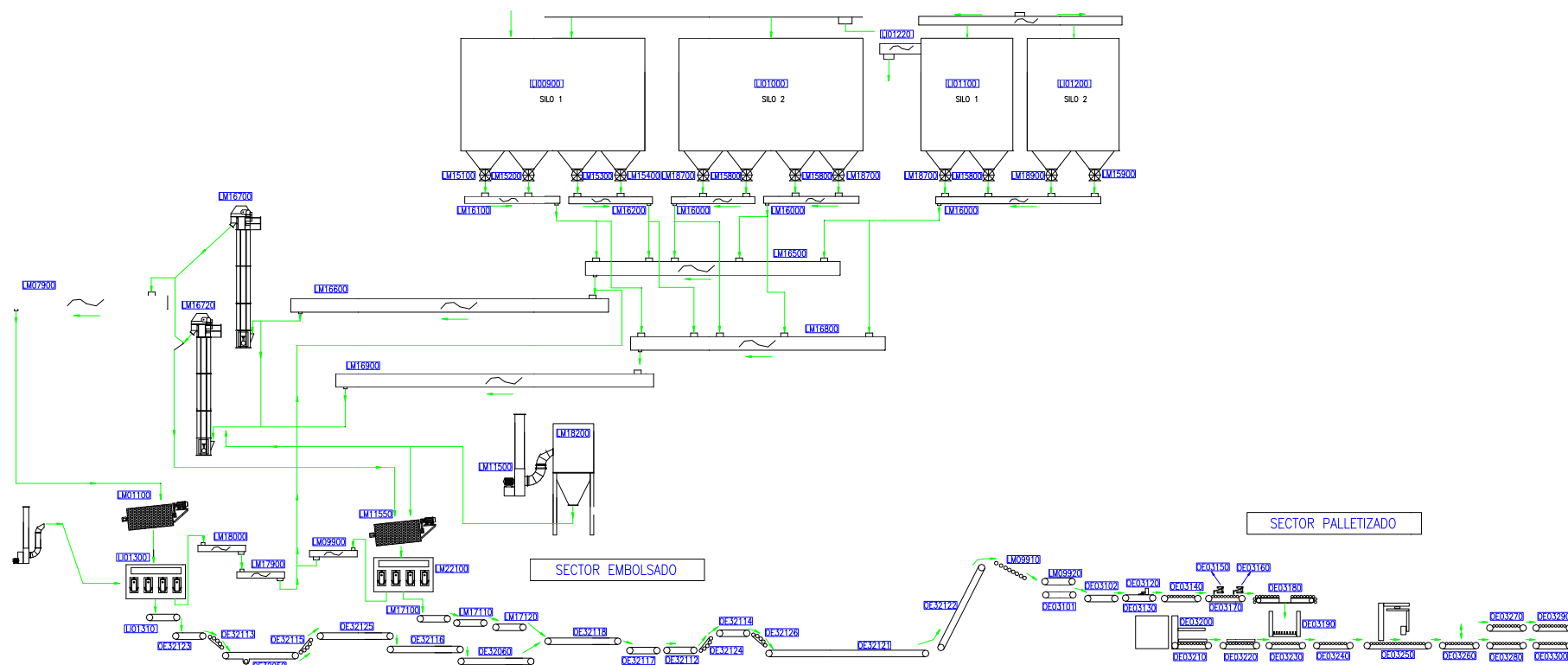


Ilustración 13. Sector de Embolsado. El sector cuenta con dos embolsadoras frontales de 4 boquillas, de las cuales una sola se encuentra en funcionamiento, y con una palletizadora automática. La embolsadora se opera manualmente, y según el operador puede llegar a producir hasta 400 bolsas/hora/boquilla (bolsas de 25 kg.). La palletizadora tiene una capacidad de 1960 bolsas/hora, independientemente del peso de la bolsa.

	INTRODUCCIÓN	Aumento de Productividad
---	--------------	--------------------------

1.2. Tipos de cales hidráulicas

Existen distintas formas de clasificar la cal; las más utilizadas tienen en cuenta la composición química, y otras simplemente el grado de pureza.

De acuerdo con la norma IRAM 1508^{xi}, se define:

Cal hidráulica de origen natural, hidratada, en polvo, para construcción: *producto obtenido por un proceso de hidratación, que transforma la cal hidráulica viva en un polvo seco, constituido en su mayor parte por hidróxido de calcio e hidróxido de magnesio y que contiene, además, cantidades apropiadas de compuestos hidráulicos silicoaluminosos cálcicos, que aseguran el endurecimiento duradero bajo el agua de los morteros que con él se preparan.*

Los requisitos físicos que debe cumplir se muestran en la Tabla 3.

Características		Unidades	Requisitos				Métodos de ensayos
			Tipo A		Tipo B		
			Mín	Máx	Mín	Máx	
Residuo sobre tamiz	IRAM 300 μm	g/100g	-	1	-	1	IRAM 1695
	IRAM 150 μm		-	7	-	7	
	IRAM 75 μm		-	15	-	15	
Resistencia a la compresión promedio	a los 7 d	MPa	1,5	-	0,5	-	
	a los 28 d		Igual o mayor que el valor logrado a los 7 d				
Expansión en autoclave		cm/100cm	-	1	-	1	

Tabla 3. Requisitos físicos de las cales hidráulicas

Los requisitos químicos que debe cumplir se muestran en la Tabla 4.

Características	Unidades	Requisitos				Métodos de ensayos
		Tipo A		Tipo B		
		Mín	Máx	Mín	Máx	
Residuo insoluble	g/100g	-	5	-	5	IRAM 1613
Dióxido de silicio, (SiO ₂), de silicatos atacables por ácido clorhídrico más cationes precipitables por amoníaco		10	-	10	-	
Índice de cal útil, expresado como CaO		30	-	33	-	
Dióxido de carbono, de carbonatos		-	7	-	7	

Tabla 4. Requisitos químicos de las cales hidráulicas

1.2.1. Cales de primera y de segunda

Independientemente de los tipos de cal hidratada normalizados, con el correr del tiempo se han instaurado en el mercado dos productos de calidades muy diferentes, tanto para cales aéreas como hidráulicas: las cales de primera y las de segunda.

^{xi}Por mayor detalle sobre la norma, referirse al Anexo I.

Las cales hidráulicas de primera, si bien no todas las empresas comercializan productos normalizados, se acercan más al especificado en la norma IRAM 1508.

En cales hidráulicas de segunda, en cambio, la diferencia es mucho mayor respecto de las tipo B normalizadas. En el caso en cuestión el producto contiene un 40% de finos calcáreos que lo rebajan en su índice de cal útil de 33% a 20%. Es un producto más denso y sus usos son distintos. Según las materias primas de las que se disponga, estos productos pueden lograrse sin agregados calcáreos, por ejemplo con la calcinación e hidratación de dolomita, o calizas “chocolatas” o “de contacto”, de muy bajo tenor cálcico.

1.3. La fábrica

El origen de la fábrica data de principios del siglo XX, bajo la razón social Canteras Cerro Negro. En sus comienzos la fábrica consistía simplemente en los hornos de cal, y se abastecía del yacimiento sobre el cual se encuentra emplazada. Con el tiempo se incorporó la hidratación, que se hacía sencillamente sobre un tornillo sinfín con una flauta regadora para la incorporación de agua; este proceso se continuaba con una clasificación y molienda (en un molino tipo doble rotador, como el de la Ilustración 14), y Finalmente un embolsado manual.

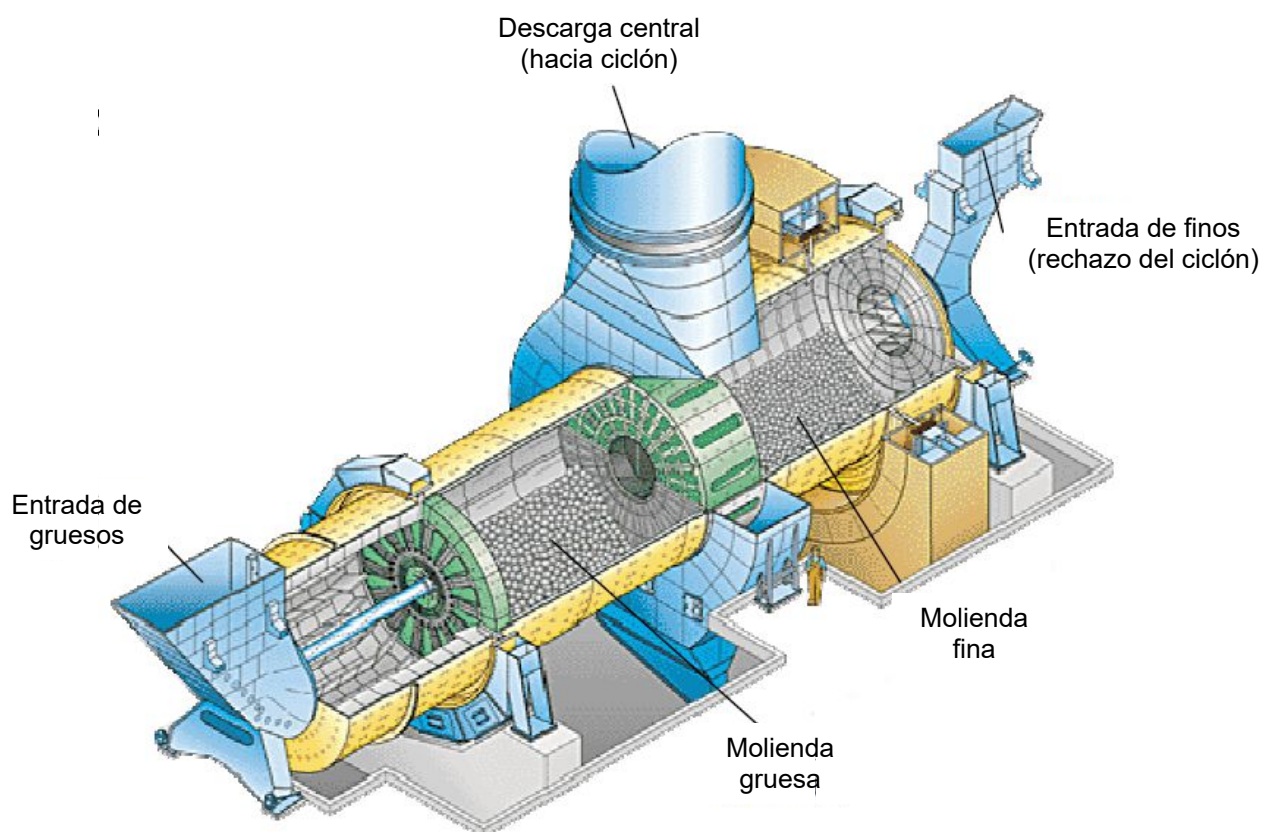


Ilustración 14. Esquema de un molino doble rotador (doppel rotator/double rotator). Con este tipo de molino la fábrica contaba originalmente.

Con el correr de los años Canteras Cerro Negro desarrolló también el negocio de ladrillos, tejas y cerámicos, productos elaborados a partir de los yacimientos de arcilla que se encuentran generalmente por debajo de las calizas (si bien hay casos en los que se encuentran invertidos).

En el año 1996 Cerro Negro decide retirarse definitivamente del negocio de las cales hidráulicas, vendiendo la fábrica y los pocos yacimientos de caliza cálcica que le quedaban a la empresa Cefas S.A. Comprometida con la continuidad del negocio, Cefas adquiere dos yacimientos cercanos a la fábrica y arrienda un tercero, con el que se abastecería al menos durante los siguientes 20 años.

Durante los 10 años anteriores a la venta de la fábrica, Cerro Negro montó una planta más moderna en la que desarrollaría el resto de sus negocios, por lo cual cuando Cefas adquiere la planta también adquiere el resto de las instalaciones (hornos de ladrillos, galpones, etc.). La mayoría de ellas se convertirían en depósito de producto terminado, maquinaria y el predio quedaría disponible para acopio de piedra y equipos de gran tamaño.

Entre las inversiones que Cefas realiza sobre la planta están el cambio del molino de bolas por uno de mayor tamaño (marca Romaer SRL), similar al de la Ilustración 15, el montaje de un separador Sturtevant de mayor capacidad, y el montaje de un equipo de palletizado automático Ocme Taro (subsidiaria de Haver & Boecker).

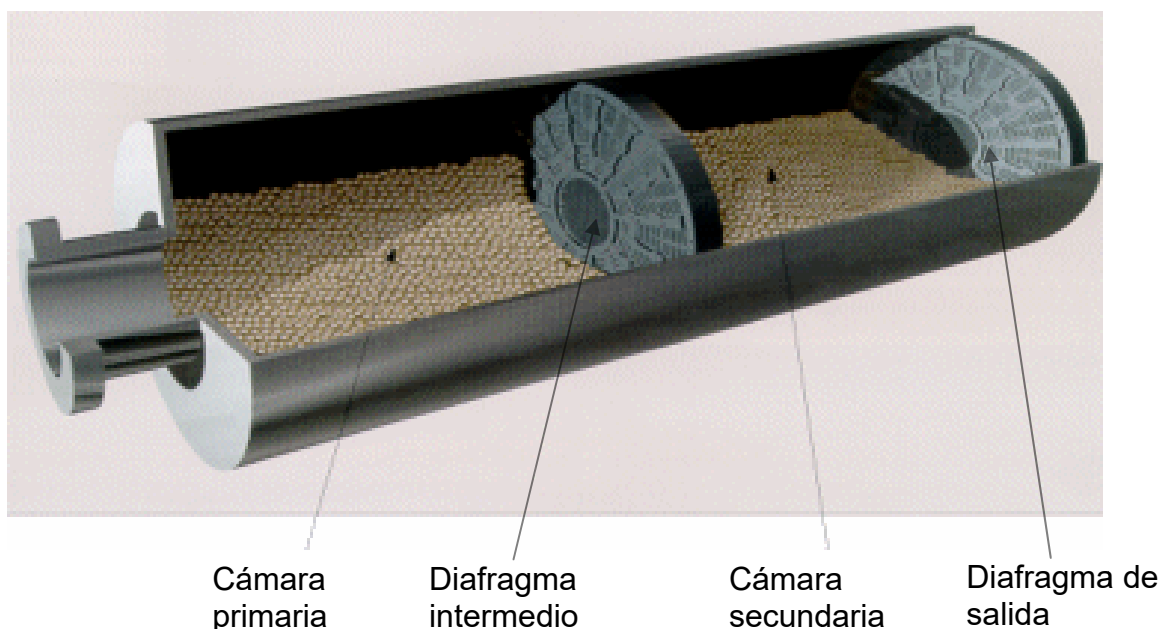


Ilustración 15. Esquema del molino de bolas que reemplazaría el doble rotador de la fábrica. Finalmente se decidió retirar el diafragma intermedio.

	INTRODUCCIÓN	Aumento de Productividad
---	--------------	--------------------------

1.3.1. Localización

El establecimiento se ubica a 25 km de la ciudad de Olavarría, Provincia de Buenos Aires, Argentina (Imágenes 1 y 2).

Consta de una superficie de 29 hectáreas en total, incluyendo las canteras aledañas (Imagen 3), si bien la empresa en el momento del estudio se encuentra explotando un yacimiento que no se visualiza en esta imagen.

El establecimiento cuenta con su propia fuente de agua para el proceso de hidratación, una estación transformadora de 33 KV a 380 V (no hay equipos de media tensión en la planta), y se abastece de combustible (gas y gasoil) mediante una instalación propia cuya reposición es programada con el proveedor de combustible.



Imagen 1. Ubicación de la ciudad de Olavarría en la Provincia de Buenos Aires, Argentina.

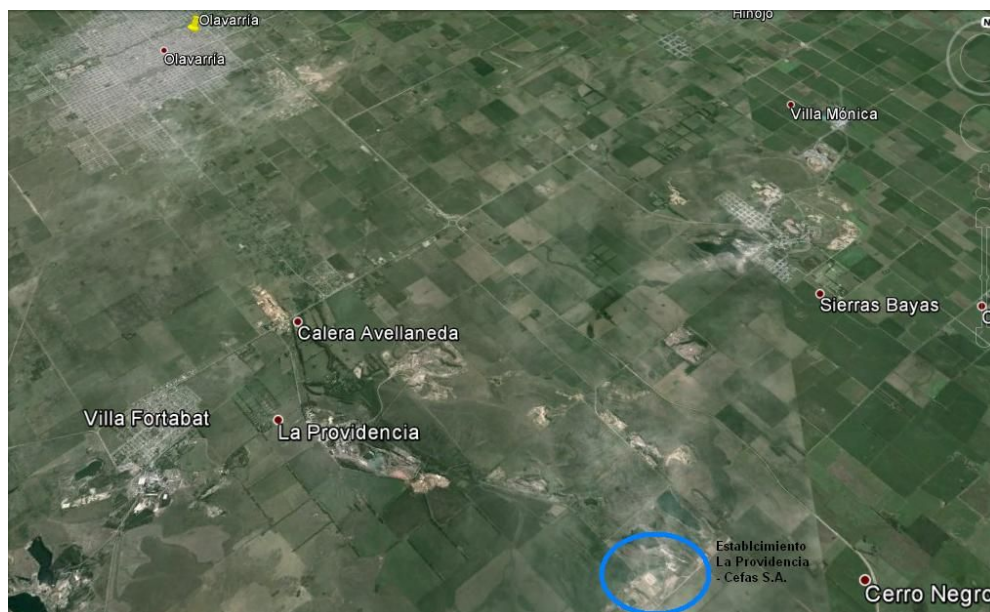


Imagen 2. Ubicación del establecimiento. Se encuentra a 25 km de la ciudad de Olavarría.

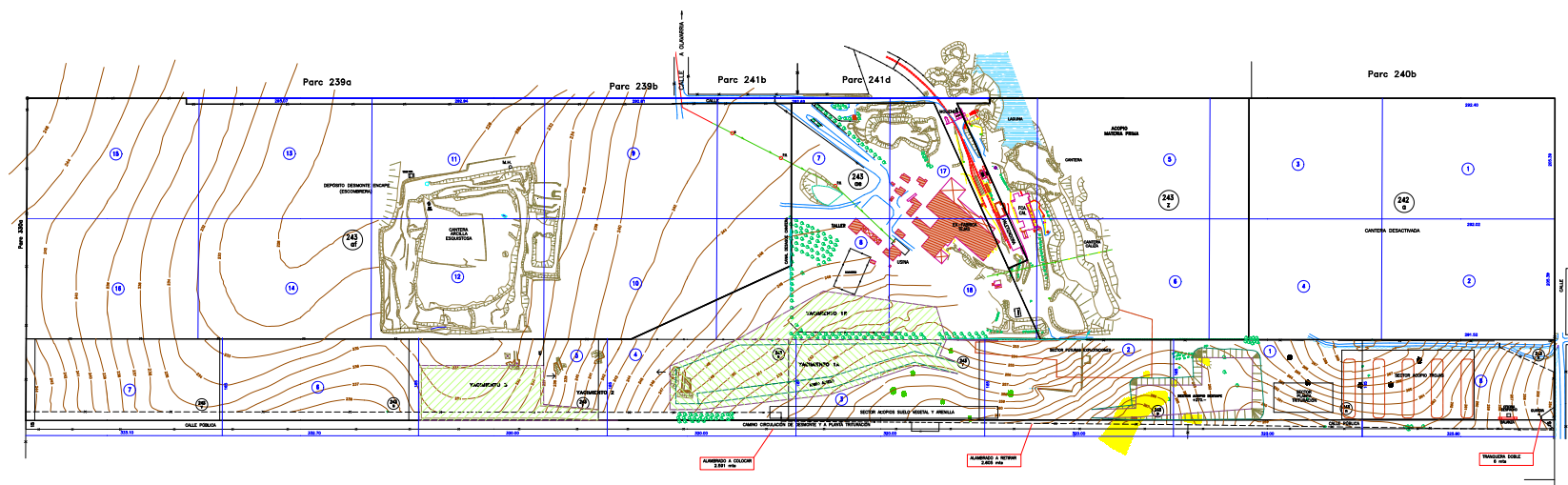


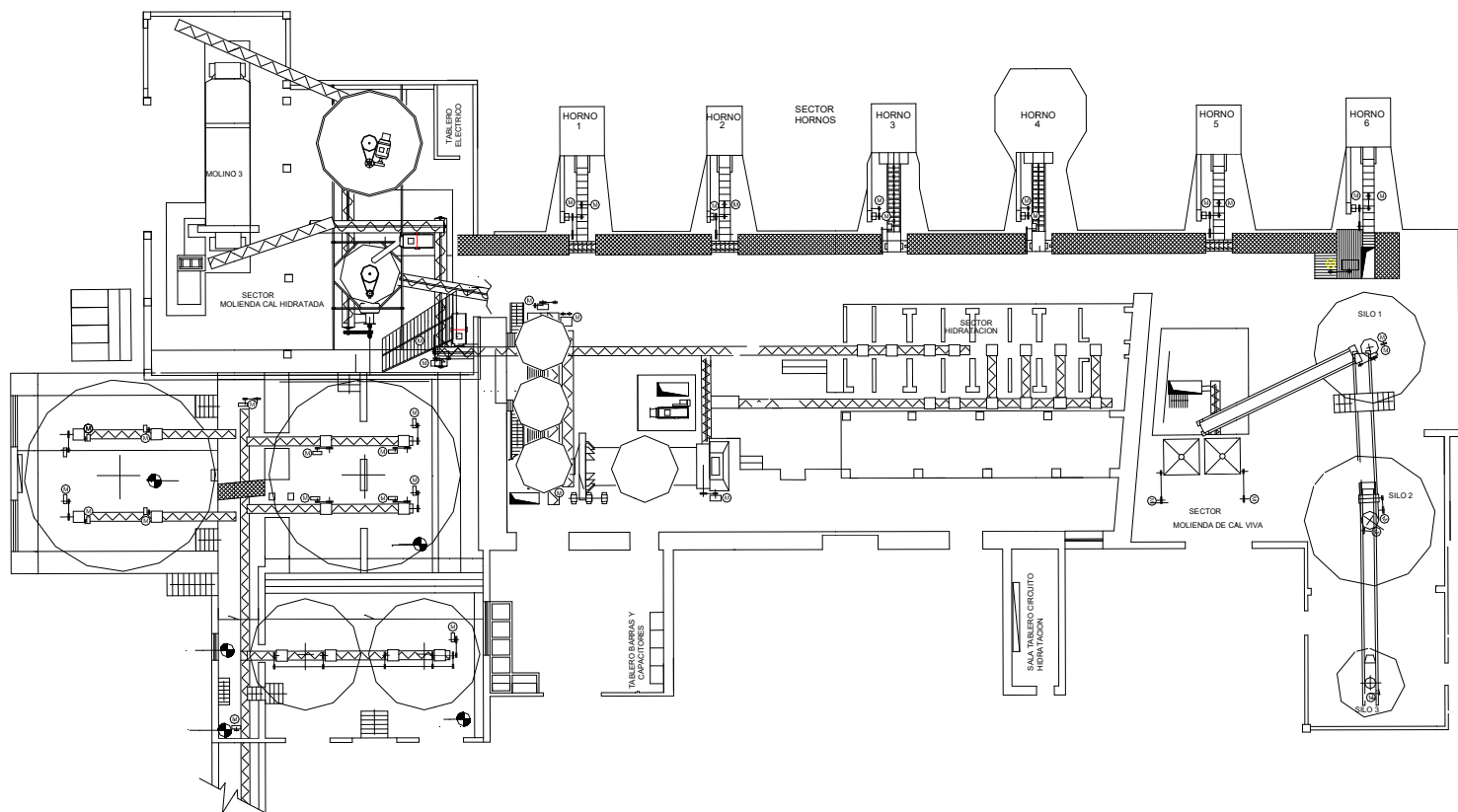
Imagen 3. Vista satelital del establecimiento (superior) y detalle planialtimétrico de la imagen superior (inferior). En el mismo se pueden observar las canteras y los edificios que conforman el establecimiento.

	INTRODUCCIÓN	Aumento de Productividad
---	--------------	--------------------------

1.3.2. Layout

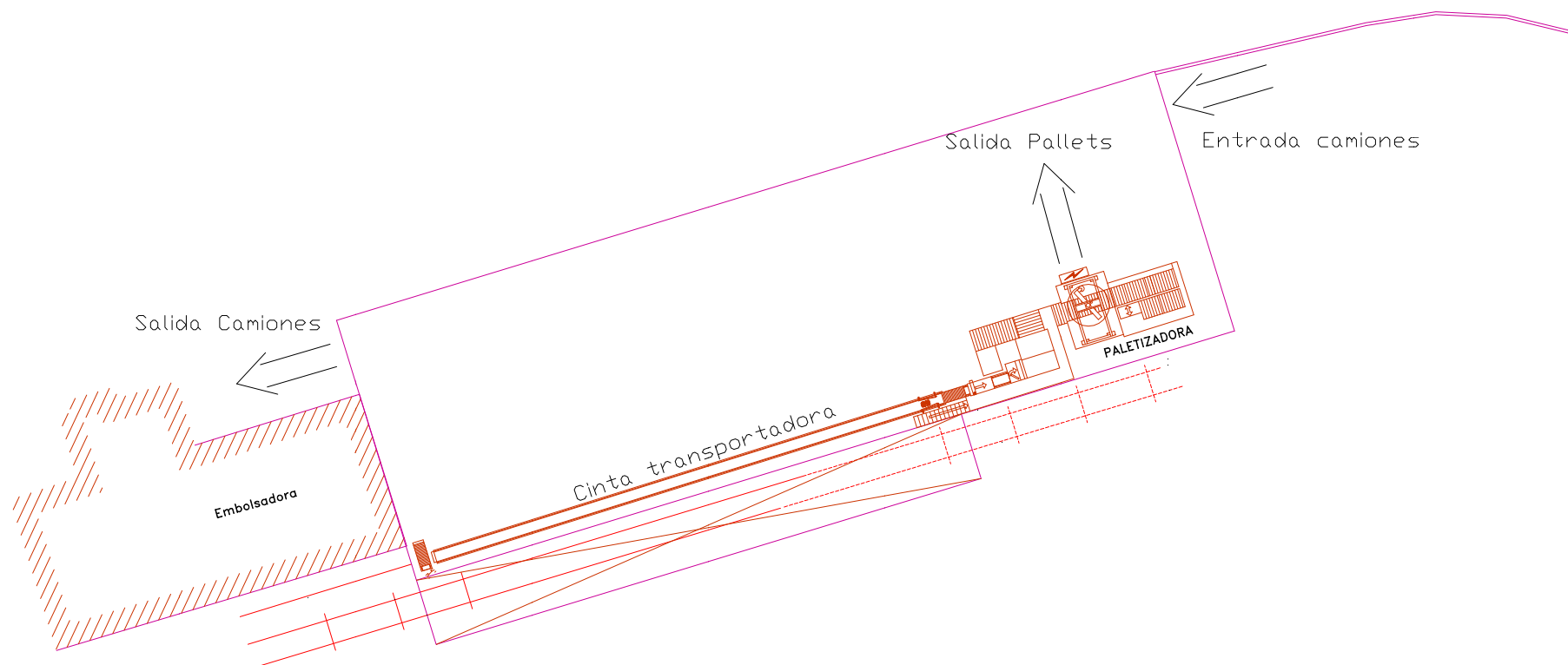
El plano 1 muestra el nivel inferior de la fábrica de cal. En el nivel superior sólo se encuentra el hidratador que alimenta los silos de cal hidratada y los tornillos sinfín que alimentan los silos de producto terminado.

Este sector alimenta el sector de Embolsado y Paletizado, representado en el Plano 2.



Plano 1. Layout de la fábrica de cal (primer nivel). En la región superior derecha se observan los 6 hornos de carga mixta; a la derecha los silos de cal viva y filler (de arriba hacia abajo); en el centro se observan los molinos de martillos y silos de cal hidratada (sobre ellos se encuentra montado el hidratador que los alimenta); a la izquierda de los silos de cal hidratada se observan tres separadores dinámicos de primera generación que en segundo nivel alimentan los 4 silos de cal terminada (región inferior izquierda); el rechazo de estos tres separadores alimenta un sistema cerrado de separación y molienda constituido por un molino de bolas y dos separadores dinámicos de primera generación (región superior izquierda del plano).

	INTRODUCCIÓN	Aumento de Productividad
---	--------------	--------------------------



Plano 2. Sector de Embolsado y Palletizado. El material es transportado hasta este sector a través de un tornillo sinfín subterráneo. Las instalaciones permiten embolsar en envases de papel de 20, 25 y 30 Kg, bolsones big-bag de 1.000 y 1.500 Kg, o granel en camión tolva o vagones tolva. La capacidad de acopio de este galpón es aproximadamente de 50.000 bolsas; una vez superada esa capacidad el producto es derivado a otro galpón de mayor superficie pero más alejado, con una capacidad aproximada de 150.000 bolsas.

1.3.3. Modalidades de producción

Si bien se utiliza uno solo, la planta permite dos modos de producción conceptualmente muy diferentes. La Ilustración 16^{xii} muestra tres salidas del proceso, de las cuales sólo dos son las que se utilizan para lograr el producto terminado (los finos primarios y los finos secundarios).

La primera modalidad de producción consiste en unificar ambas salidas en un solo silo de almacenamiento; la segunda modalidad consiste en destinar cada salida a un silo distinto, dando como resultado dos productos muy diferentes en composición química y física, ya que la cola primaria rechazada por el clasificador primario (en el caso de estudio son tres clasificadores en paralelo) es más densa que los finos primarios. Posiblemente luego del proceso de molienda la granulometría de ambos finos sean similares, pero con seguridad la composición química y la densidad serán diferentes.

El problema con la segunda modalidad radica en una alta dependencia de la calidad de la cal viva que alimenta el proceso y la molienda previa a la hidratación (que varía en función del grado de desgaste de los martillos). Esta dependencia es un problema para la programación de la producción ya que las cantidades de cada producto elaborado son más difíciles de controlar, pero por contrapartida es un beneficio para la constancia en la calidad.

De todas maneras la decisión estratégica de la empresa es producir unificando los finos primarios y secundarios, y generar productos de primera y segunda a través de la incorporación de filler calcáreo únicamente.

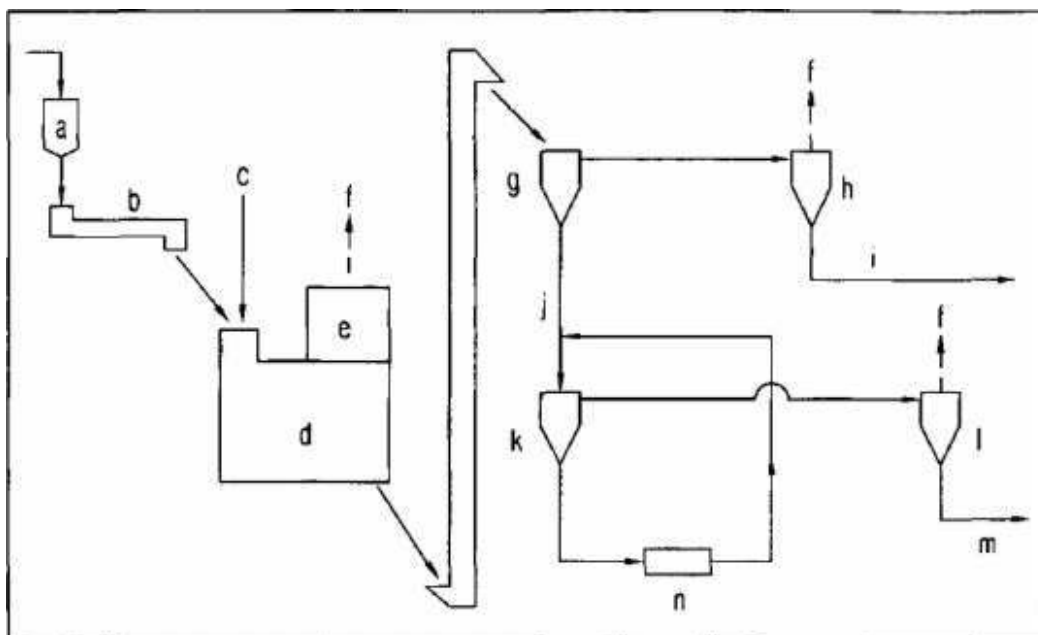


Ilustración 16. Diagrama de una planta de hidratación básica: (a) Silo de cal viva; (b) Alimentador; (c) Agua; (d) Hidratador; (e) Filtro colector de polvo; (f) Descargas hacia la

^{xii} Oates, Joseph A. H.. 1998. Lime and Limestone: chemistry and technology. production and uses. 474 páginas. Editorial Wiley-VCH Variag GmbH, ISBN 3-527-29527-5.

	ESTADO DE LA CUESTIÓN Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	Aumento de Productividad
---	--	-----------------------------

atmósfera; (g) Clasificador primario; (h) Ciclón; (i) Finos primarios; (j) Colas primarias; (k) Clasificador secundario; (l) Ciclón; (m) Finos secundarios; (n) Molino

1.3.4. Diagrama de procesos

En resumen, el proceso vigente en el caso de estudio es el descrito en el diagrama de procesos de la Ilustración 17.

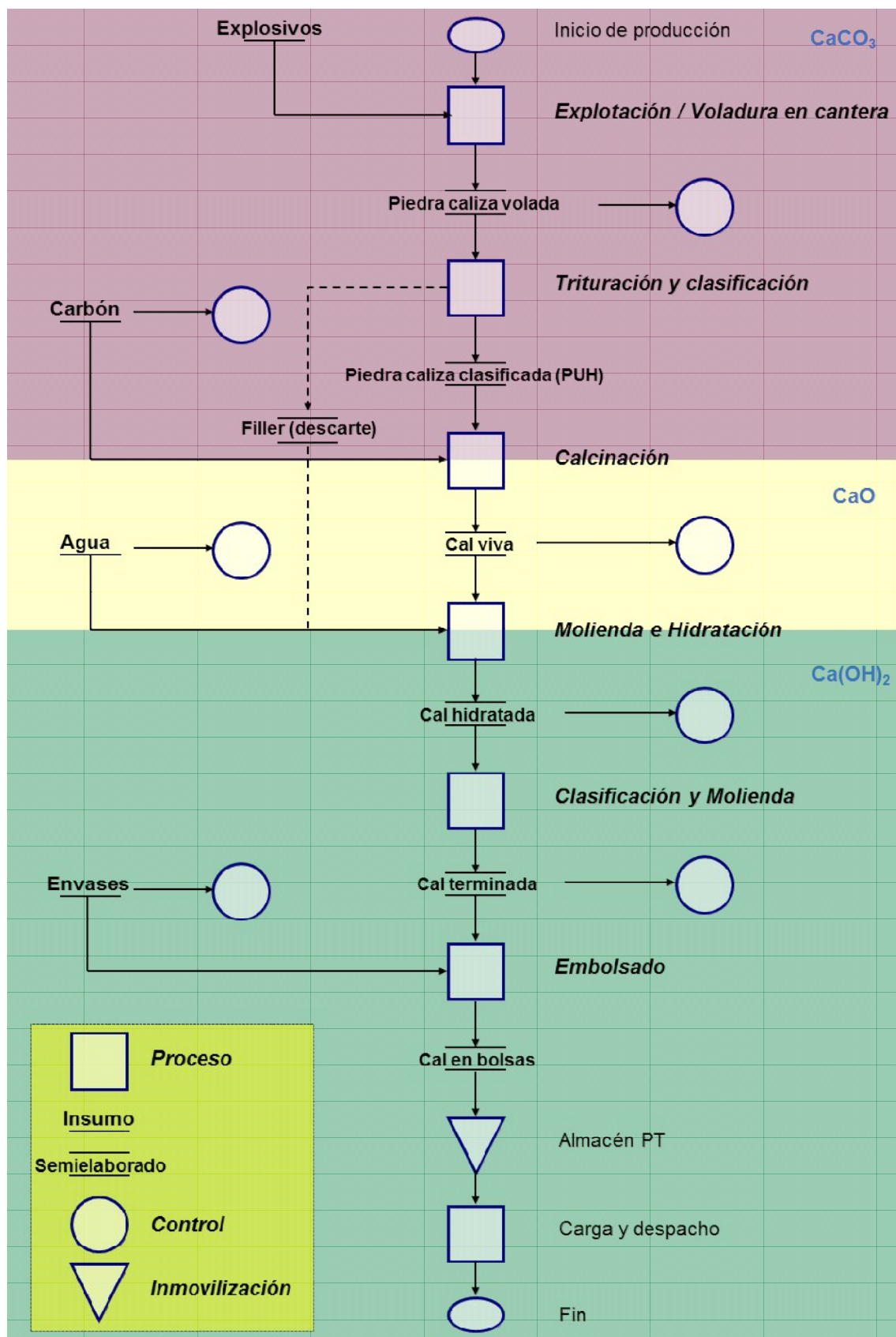


Ilustración 17. Diagrama de procesos vigente.

2. ESTADO DE LA CUESTIÓN Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

2.1. Esquema productivo

Existen diversos planteos para la producción de cal hidratada. En la Ilustración 18 se muestra la solución de Cimprogetti y en la Ilustración 19 se observa el diseño del fabricante Metso, que pueden resumirse:

1. Hidratación de cal viva finamente molida (por lo general los hidratadores requieren de una granulometría de ingreso menor a 10 mm).
2. Molienda en circuito cerrado de molino de bolas y clasificador.
3. Al haber un solo clasificador, Finalmente todo el material termina en el mismo silo de producto terminado.



Ilustración 18. Esquema básico de planta de hidratación de cal según Cimprogetti. El material corre de derecha a izquierda.

	ESTADO DE LA CUESTIÓN Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	Aumento de Productividad
---	--	-----------------------------

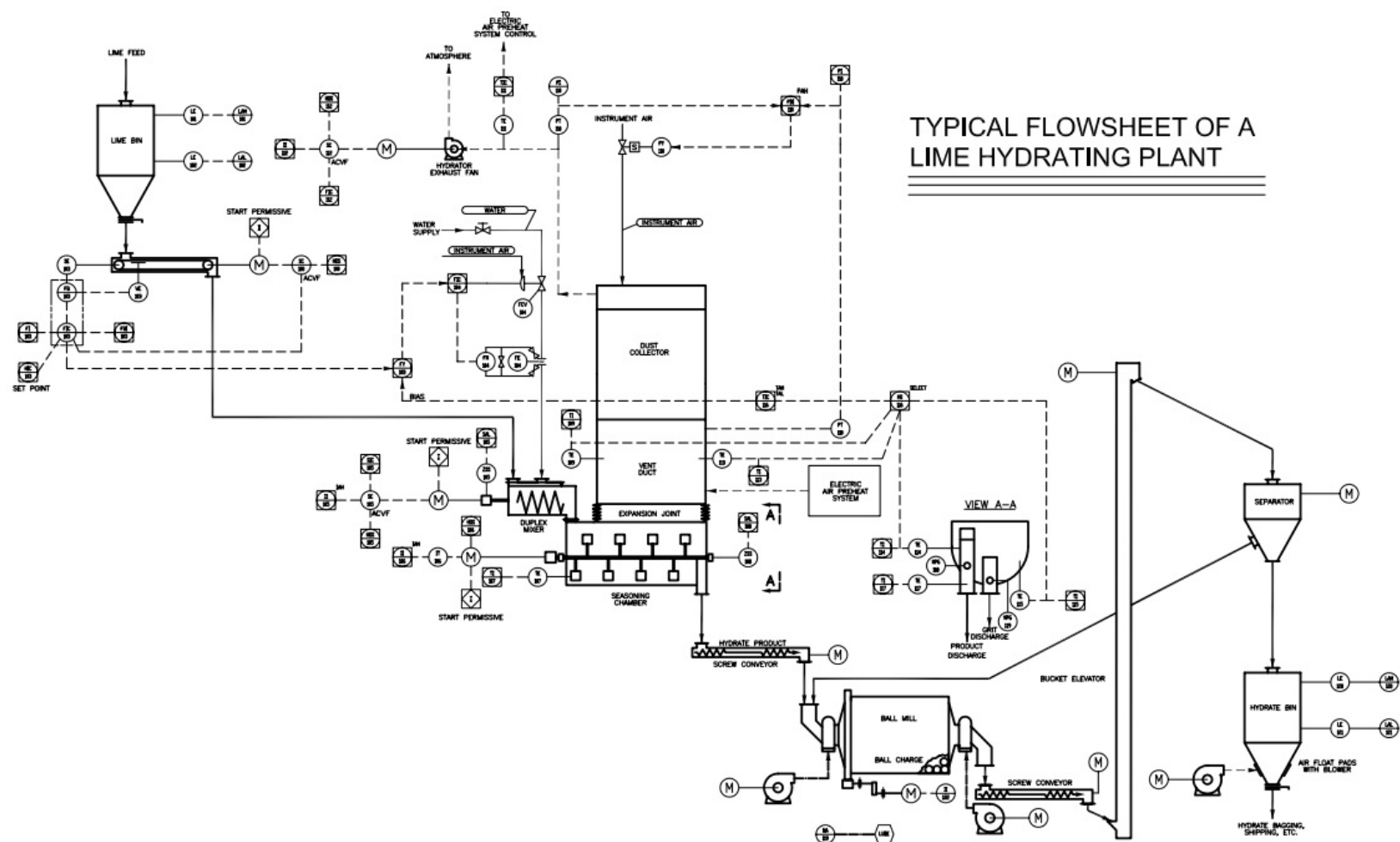


Ilustración 19. Esquema típico de planta de hidratación de cal según Metso. El material corre de izquierda a derecha.

Planteos más complejos habilitan posibilidades de realizar una mayor variedad de productos, ya que los planteos básicos de Metso y Cimprogetti sólo permiten elaborar distintos productos cambiando la composición química de la materia prima y alterando la configuración del circuito cerrado de molienda y clasificación (si es que la tecnología del clasificador lo permite). Es decir, no está prevista la incorporación de otros materiales o aditivos.

En el caso de estudio se elaboran dos productos:

- a. Cal hidratada de primera (en adelante **CH1**), elaborada simplemente a partir de cal viva y el agua necesaria para su hidratación.
- b. Cal hidratada de segunda (en adelante **CH2**), elaborada incorporando caliza molida junto con la cal viva. Ambas materias primas ingresan al hidratador y circulan por los mismos equipos juntas. La cantidad de filler a incorporar es tal que represente un 40% del peso del producto terminado.

2.2. Semielaborados y Productos Terminados

Tal como se fue mostrando a medida que se describía el layout de planta, es posible discriminar distintas etapas del proceso, cada una con una productividad, eficiencia de marcha y sus pulmones (capacidad de almacenamiento del producto de cada etapa).

Las etapas del proceso identificadas con sus correspondientes semielaborados/producto terminado son, tal como se muestran en la Ilustración 17:

- | | |
|-----------------------------------|-------------------------------|
| 1. Trituración (y clasificación)→ | PUH (Piedra Útil para Hornos) |
| 2. Calcinación→ | CV (Cal Viva) |
| 3. Molienda e Hidratación→ | CH (Cal Hidratada) |
| 4. Clasificación y Molienda→ | CT (Cal Terminada) |
| 5. Embolsado→ | Bolsas |

Sólo las bolsas son producto terminado.

2.2.1. Matriz de transformación

En las Tablas 5 y 6 se presentan las relaciones entre semielaborados y terminados, a modo de síntesis de las pérdidas y ganancias de masa en cada etapa del proceso, para cada producto. Se incorpora a la lista la Piedra Volada (en adelante PV), como materia prima aunque en rigor de verdad es un semielaborado también, sólo a efectos de mostrar el rendimiento global que tiene una tonelada de piedra extraída del yacimiento.

Por supuesto, a lo largo de la diagonal principal el factor es 100%. No se consideran mermas o pérdidas de producto, sólo las relaciones estadísticas (que coinciden con las estequiométricas) entre semielaborados.

	ESTADO DE LA CUESTIÓN Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	Aumento de Productividad
---	---	--------------------------

CH1	PV	PUH	CV	CH	CT	Bolsas
PV	100%	73%	48%	55%	55%	55%
PUH	137%	100%	66%	75%	75%	75%
CV	208%	152%	100%	113%	113%	113%
CH	183%	134%	88%	100%	100%	100%
CT	183%	134%	88%	100%	100%	100%
Bolsas	183%	134%	88%	100%	100%	100%

Tabla 5. Factores de conversión entre los distintos semielaborados y terminados que intervienen en la producción de CH1. Por cada tonelada de PV se obtienen 0,55 toneladas en bolsas. El único insumo que se suma es el agua de hidratación: 11,6% del producto terminado.

CH2	PV	PUH	CV	CH	CT	Bolsas
PV	100%	73%	48%	91%	91%	91%
PUH	137%	100%	66%	124%	124%	124%
CV	208%	152%	100%	189%	189%	189%
CH	110%	80%	53%	100%	100%	100%
CT	110%	80%	53%	100%	100%	100%
Bolsas	110%	80%	53%	100%	100%	100%

Tabla 6. Factores de conversión entre los distintos semielaborados y terminados que intervienen en la producción de CH2. Por cada tonelada de PV se obtienen 0,91 toneladas en bolsas. Los insumos que se suman son el agua de hidratación y el filler: 7,0% y 40,0% del producto terminado, respectivamente.

Estos factores son de utilidad para agilizar los cálculos de costos.

2.3. Producción

2.3.1. Productividades

Según el producto que se quiera elaborar puede cambiar la productividad de cada etapa del proceso. Las productividades dependen de las condiciones de ingreso, el seteo de los equipos y de la calidad que se desea obtener, según si esa etapa dispone de algún sistema de control.

Por lo tanto, las productividades pueden entenderse como curvas en función de parámetros de ingreso, seteo y salida. Las productividades actuales para cada producto son las que se muestran en la Tabla 7.

	ESTADO DE LA CUESTIÓN Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	Aumento de Productividad
---	---	--------------------------

Etapas del proceso	t/h (efectiva)		t/h (efectiva)	
	Ingreso	CH1 CH2	Salida	CH1 CH2
Trituración	Piedra volada	95,3	PUH	69,5
Calcinación	PUH	18,4	CV	13,4
Molienda e Hidratación	CV+Agua(+Filler)	33,5 30,6	CH	29,9 28,3
Clasificación y Molienda	CH	24,4 17,4	CT	24,4 17,4
Embolsado	CT	23,7 30,1	Bolsas	23,7 30,1

Tabla 7. Productividades efectivas de cada etapa. El término “efectivas” refiere a las horas trabajadas realmente.

Las productividades de ingreso en algunos casos son distintas a las de salida. Esto se debe a que la de salida se mide en términos del producto obtenido en cada etapa y la de ingreso en términos de la alimentación. En el caso de la trituración hay un 27% de material de descarte (que luego será utilizado como filler en la CH2); en el caso de la calcinación hay un 36% que se elimina en forma gaseosa (CO₂ removido); en la hidratación hay pérdidas de agua por evaporación (alrededor del 50% del agua que ingresa); y en la clasificación y embolsado no hay diferencias de productividad (en t/h) entre entrada y salida.

Una forma alternativa de medir la productividad de la clasificación y molienda podría ser en términos de superficie específica (m²/h o Blaine/h), ya que lo que hace este proceso es justamente aumentar la superficie específica (t/h efectiva · m²/t = m²/h efectiva). Este enfoque no es de interés para el caso de estudio.

2.3.2. Eficiencias de marcha

Así como las productividades son curvas, los rendimientos de marcha dependen del tiempo que queda disponible para hacer mantenimiento. Cada configuración supone estrategias de mantenimiento distintas para lograr los mismos niveles de eficiencia de marcha.

Se define la Disponibilidad Mecánica como el porcentaje del tiempo durante el cual los equipos estuvieron en condiciones óptimas de operación. Se define Utilización como el porcentaje del tiempo efectivamente utilizado para producir, respecto del tiempo que el equipo/sector estuvo disponible para operar. Se define aprovechamiento como el porcentaje del tiempo de producción respecto del tiempo total.

Cuando un equipo/sector se detiene por factores ajenos a ellos mismos, no se afectan los indicadores de utilización y disponibilidad mecánica pero sí su aprovechamiento, ese tiempo inutilizado se atribuye a factores externos como falta de alimentación, falta de espacio para almacenar el producto del proceso (estos pueden ser por un problema operativo o mecánico de la etapa anterior, posterior o subsiguientes), o mismo una decisión operativa para no inmovilizar capital.

	ESTADO DE LA CUESTIÓN Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	Aumento de Productividad
---	---	--------------------------

De no mediar problemas externos el aprovechamiento puede calcularse como el producto de disponibilidad mecánica y utilización.

	Disponibilidad		Aprovechamiento	Problemas Externos
	Mecánica	Utilización		
Trituración	91,1%	84,0%	76,5%	0,0%
Calcinación	97,3%	94,4%	86,6%	5,7%
Molienda e Hidratación	82,6%	93,7%	53,8%	30,5%
Clasificación y Molienda	87,5%	97,5%	77,3%	9,4%
Embolsado	85,7%	94,9%	79,5%	2,2%

Tabla 8. Rendimientos de marcha por etapa.

Como se observa en la Tabla 8, hay una utilización baja del sector de molienda e hidratación; esto se debe a que por momentos debe detenerse porque la productividad de la clasificación y molienda es más baja y se llenan rápidamente los pulmones (en especial cuando se está clasificando y moliendo cal de segunda). Es importante el correcto análisis de las causas de las detenciones para entender las oportunidades de aumentar la producción total.

También es importante identificar cuándo un sector no está trabajando a máxima capacidad, por ejemplo, si val al ritmo de su alimentación. Puede pasar que si una etapa es más productiva que la anterior, y se agota el pulmón intermedio, la segunda trabaje subutilizada, a una productividad menor que la que podría lograr. Un buen diseño de planta contemplaría esta situación, pero en el caso de estudio la planta ha sufrido numerosas modificaciones y se ha introducido un producto nuevo que altera el balance de línea.

2.3.3. Pulmones

Entre etapa y etapa la fábrica dispone de lugares de almacenamiento, que definen la autonomía de trabajo a la etapa siguiente según el producto que se esté trabajando.

En la Tabla 9 se expresan los tamaños de los pulmones y cómo están constituidos. No sólo la capacidad total es importante, sino su constitución, ya que la cantidad de compartimentos hace a la flexibilidad operativa y capacidad de alternar producciones sin mezclar productos.

Etapas del proceso	Unidades	Capacidad	Unidades	Capacidad	Total
Trituración	Acopio a la intemperie				>200.000 t
Calcinación	1	150 m ³	2	250 m ³	400 m ³
Molienda e Hidratación	4	36 m ³			144 m ³
Clasificación y Molienda	2	500 m ³	2	160 m ³	1.320 m ³
Embolsado	1	7.400 m ²			7.400 m ²

Tabla 9. Capacidad de almacenamiento posterior a cada etapa. Estas capacidades no sólo definen el tiempo en que un sector puede marchar sin reposición de materias primas, sino también el tiempo que puede marchar sin que el sector siguiente vaya consumiendo su producto. Los volúmenes expresados son útiles, es decir que

	ESTADO DE LA CUESTIÓN Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	Aumento de Productividad
---	---	--------------------------

contemplan que siempre existe un espacio que no se podrá ocupar según el punto de ingreso del material y su talud natural. La superficie para almacenar pallets con bolsas también es la útil, supone espacios para movimiento de camiones, autoelevadores, entre pallets, etc.

Ya que las productividades están expresadas en t/h, tiene sentido traducir las capacidades de los pulmones, expresándolos en las toneladas de producto que pueden albergar. Al ser distintas las densidades de la CH1 y la CH2, las capacidades también serán diferentes, y si bien la densidad es una variable con una media y un desvío, a efectos de simplificar se tomará una media de 0,55 Kg/dm³ para la CH1 y una de 0,7 Kg/dm³ para la CH2. Se expresan las capacidades en la Tabla 10.

Etapa del proceso	Capacidad (t)	
	CH1	CH2
Trituración	>200.000	
Calcinación	400	
Molienda e Hidratación	79	101
Clasificación y Molienda	726	924
Embolsado	18.500	

Tabla 10. Capacidades de acopio en toneladas de producto semielaborado y terminado.

La densidad adoptada para CV es de 1 Kg/dm³; las densidades de la CH y la CT se suponen iguales para la CH1 y CH2, y al apilarse los pallets de bolsas en módulos de 1,5 t, en dos niveles, con una superficie de 1,2 m²/pallet, da un factor de 2,5 t/m².

2.3.4. Volúmenes de producción y Mix

La fábrica se encuentra trabajando a máxima capacidad, produciendo un total aproximado de 100.000 t/año, de las cuales el 44,2% es CH1 y el 55,8% restante es CH2.

Si bien la demanda tiene la estacionalidad de la construcción, la fábrica cuenta con suficiente espacio para almacenar producto. La conveniencia de hacer adelantos de producción es analizada desde lo financiero y comercial, ya que es justamente cuando más se acopia que menos se vende, es decir que aumenta el capital inmovilizado cuando no hay tantos ingresos por ventas. Como estos cálculos se hacen por fuera de la fábrica, sólo se estudiarán oportunidades de bajar costos y aumentar productividades.

2.3.5. Dotaciones y turnos de trabajo

Debido a las diferentes productividades y disponibilidades mecánicas de cada etapa, se trabaja de acuerdo al esquema de la Tabla 11.

	ESTADO DE LA CUESTIÓN Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	Aumento de Productividad
---	---	--------------------------

Sector	Lunes a Sábado			Domingo
	Mañana	Tarde	Noche	
Canteras	1	-	-	Franco
Trituración	2	-	-	Franco
Calcinación	2	2	2	Franco
Hidratación y Clasificación	4	4	4	Franco
Embolsado	3	3	-	Franco
Carga y Despacho	3	3	-	Franco
Servicios Generales	1	1	-	Franco

Tabla 11. Esquema de trabajo del área Productiva. Se trabaja en turnos rotativos en un régimen de 6x1 con franco dominical. Las etapas de Molienda e Hidratación, y Clasificación y Molienda se resumen en Hidratación y Clasificación, ya que si bien hay un pulmón intermedio, no es suficiente para plantear esquemas de trabajo separados para cada una.

En la misma Tabla se observan la cantidad de personas que trabaja en cada etapa del proceso en cada turno de 8 horas; se agregan otros sectores productivos para dar un mejor contexto (Canteras, Carga y Despacho, y Servicios Generales).

El total del personal de Producción es de 35 personas, de un total de 74 que compone a toda la fábrica. Le diferencia se distribuye en Mantenimiento, Control de Calidad, Administración, Logística, Recursos Humanos, y Seguridad, Higiene y Medio Ambiente.

2.3.6. Cuellos de botella

Con el esquema de la Tabla 11, el volumen de producción y mix del punto 2.3.4 se reconocen dos cuellos de botella para la CH1, y uno para la CH2:

- **CH1:** Primero Embolsado, luego Calcinación.
- **CH2:** Clasificación y Molienda.

Para demostrar que estos son los cuellos de botella, se utiliza la información expuesta anteriormente, enfrentando las capacidades de producción de cada etapa a lo que produce la etapa anterior utilizando los factores de conversión, suponiendo que el 100% de la producción se destina a CH1 o CH2 (Tablas 12 y 13, respectivamente):

	ESTADO DE LA CUESTIÓN Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	Aumento de Productividad
---	---	--------------------------

CH1			Capacidad	MP necesaria	MP disponible	Prod. Posible
	t/h ef	h/sem ef	t/sem	t/sem	t/sem	t/sem
Trituración	69,5	36,7	2.554	3.498	N/A	2.554
Calcinación	13,4	124,7	1.671	2.532	2.554	1.671
Molienda e Hidratación	29,9	77,5	2.318	2.048	1.671	1.891
Clasificación y Molienda	24,4	111,3	2.720	2.720	1.891	1.891
Embolsado	23,7	76,4	1.810	1.810	1.891	1.810

Tabla 12. Cuello de botella en la producción de CH1. Se lo puede identificar en la etapa de Embolsado. A su vez se observa que no es posible calcinar lo suficiente como para alimentar con continuidad la Molienda e Hidratación. Desde el punto de vista del equipamiento no hay necesidades adicionales si se quiere destrabar el embolsado ya que el sector trabaja en dos turnos.

CH2			Capacidad	MP necesaria	MP disponible	Prod. Posible
	t/h ef	h/sem ef	t/sem	t/sem	t/sem	t/sem
Trituración	69,5	36,7	2.554	3.498	N/A	2.554
Calcinación	13,4	124,7	1.671	2.532	2.554	1.671
Molienda e Hidratación	28,3	77,5	2.193	1.163	1.671	2.193
Clasificación y Molienda	17,4	111,3	1.935	1.935	2.193	1.935
Embolsado	30,1	76,4	2.298	2.298	1.935	1.935

Tabla 13. Cuello de botella en la producción de CH2. Se observa que el cuello de botella en la etapa de Clasificación y Molienda.

El tener dos productos coexistiendo en la misma fábrica, con cuellos de botella que alternan según el producto que se esté fabricando, y con pulmones intermedios, sugiere la existencia de oportunidades de mejora a través de la programación de la producción.

2.4. Calidad

Se han mencionado a lo largo del documento varias cuestiones de composición química y física de los productos CH1 y CH2. Ninguna de las propuestas de aumento de productividad, optimización de procesos, cambios en la programación, debiera afectar las especificaciones de calidad ya que eso puede traer efectos inesperados en la experiencia del usuario. Una rebaja o un refinamiento en la composición física o química es un cambio en la consistencia de las marcas que debe analizarse desde lo comercial y técnico.

La Promesa de Valor^{xiii} asumida, desde las características técnicas del producto, es la que se expresa en la Tabla 14.

^{xiii} Se entiende como Promesa de Valor a los distintos compromisos asumidos por una empresa hacia sus clientes, en cuanto a características del producto, precio, condiciones de entrega, garantía e incluso hasta margen de ganancia por reventa. Estos compromisos disparan mecanismos y acciones tendientes a garantizar su cumplimiento, en línea con los objetivos organizacionales, y nutren el plan estratégico.

ITBA	ESTADO DE LA CUESTIÓN Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	Aumento de Productividad
-------------	--	---------------------------------

Promesa de Valor	CH1	CH2
Densidad (Kg/dm ³)	<0,55	<0,80
% CaO útil	>36%	>17%
Ret #50	<1%	<1%
Ret #100	<7%	<7%
Ret #200	<15%	<20%
PPC1000	N/A	<26%

Tabla 14. Extracto de la Promesa de Valor para cada producto. Las PPC1000 en la CH2 se corresponden con un 59% de CaCO₃. Los retenidos tamiz definen mínimos de granulometría/fineza del producto.

En cuanto a las características químicas, los promedios se muestran en los Gráficos 6 y 7 (CH1 y CH2, respectivamente).

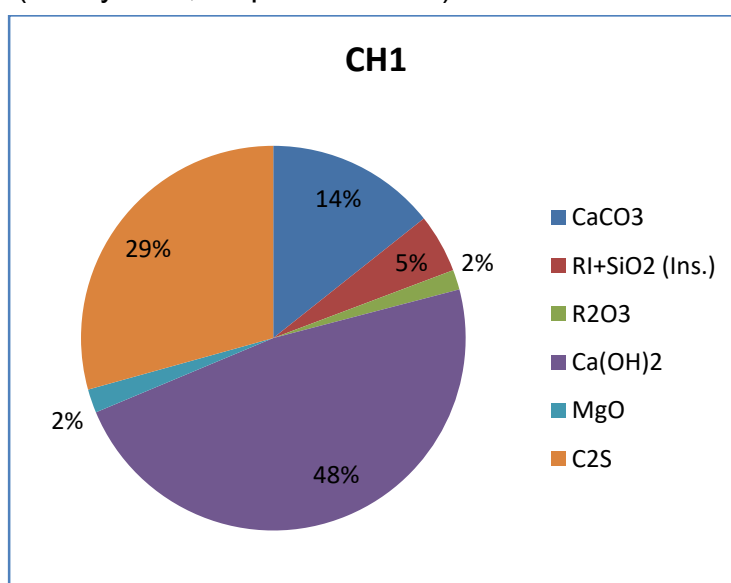


Gráfico 11. Composición química (por especie) de CH1. Estos valores concuerdan con un 36% de CaO útil y un agua de hidratación de 12%.

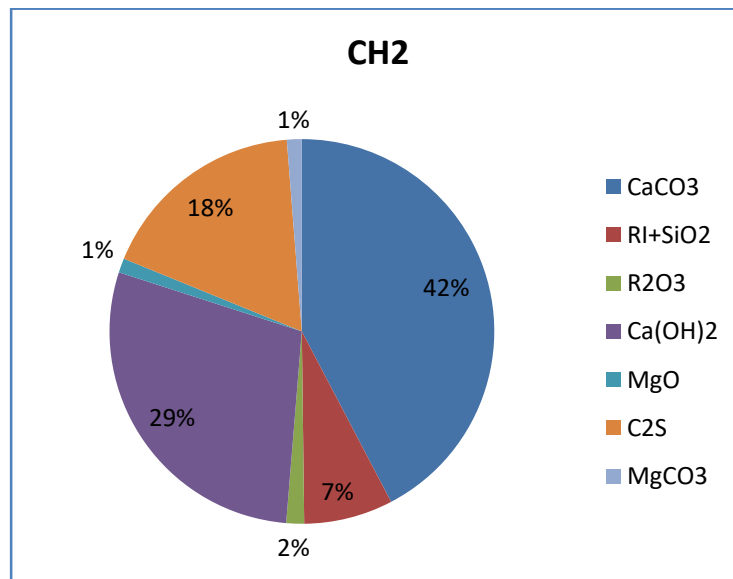


Gráfico 12. Composición química (por especie) de CH2. Estos valores concuerdan con un 22% de CaO útil, un agua de hidratación de 7% y un 40% de filler. El contenido de MgCO₃ se explica por su presencia en el filler que es material no calcinado.

Para asegurar que estos resultados se cumplan, se definieron algunos parámetros intermedios de calidad de los semielaborados, como figuran en la Tabla 15.

Ingreso a Hidratación	CV	CV + Filler
% CaO útil	>39%	>20%
PPC1000	<12%	N/A
Ret #8	<10%	<10%

Tabla 15. Objetivos de calidad internos; los objetivos sobre la CV son para la producción de CH1 y los objetivos sobre CV + Filler son para CH2. Los resultados reales en calidad no son de mayor importancia para el caso de estudio, aunque sí lo es el retenido en #8, cuyo resultado es 10%.

Las características físicas están condicionadas por la composición química pero pueden ser alteradas dentro de ciertos rangos por el proceso de hidratación, el de clasificación y molienda, o el uso de aditivos. En la Tabla 16 se exponen los resultados de calidad correspondientes a las composiciones químicas de los Gráficos 6 y 7.

	ESTADO DE LA CUESTIÓN Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	Aumento de Productividad
---	---	--------------------------

	CH1	CH2
Densidad (Kg/dm ³)	0,55	0,70
% CaO útil	36%	22%
Ret #50	0,3%	0,5%
Ret #100	1,8%	3,1%
Ret #200	7,5%	12,3%
PPC1000	N/A	19%

Tabla 16. Propiedades físicas y %CaO útil reales de CH1 y CH2. Se observa que la CH2 supera sus objetivos de calidad, cuestión que podría adecuarse incorporando mayor cantidad de filler (hay que considerar en ese caso que seguramente habría un impacto en los factores de conversión y las productividades de cada etapa).

Finalmente el comportamiento del producto en cuanto a trabajabilidad, plasticidad, capacidad de acarreo de arena es resultado de la composición química, física y hasta la cristalografía del producto (que depende de la materia prima, la calcinación, el tipo de hidratación y el tipo de molienda).

2.5. Mantenimiento

Se han expuesto en el apartado 2.3.2. indicadores de disponibilidad mecánica por sector que muestran serios problemas y deficiencias en el mantenimiento. Al momento de redacción del presente Proyecto se está redefiniendo la estrategia de gestión del mantenimiento para devolver la confiabilidad a la fábrica.

No está dentro del alcance del estudio explicar este punto, pero sí cabe mencionar que los aumentos de las disponibilidades mecánicas impactan sobre los cuellos de botella y eso puede reforzar o reducir la necesidad y el impacto de las conclusiones que se obtengan.

El Mantenimiento se realiza en 4 turnos rotativos (esquema 6x2), con una cobertura completa de mantenimiento mecánico y eléctrico. El resto es tercerizado.

Es considerado un costo directo y variable de producción (descontando al personal que lo ejecuta que se considera costo fijo), si bien es una cuestión arbitraria, pero es de esperar cierta relación entre la cantidad producida, el nivel de uso del equipamiento y la necesidad de mantenimiento. A su vez existen estándares de incidencia de costos sobre la facturación, que sugieren cierto comportamiento variable, pero es cierto que el Costo Total de Mantenimiento (CTM) es función del tiempo de vida de un equipo o sector y eso desvirtúa la linealidad con la producción.

Adicionalmente la rotura de una máquina implica un aumento en el costo de mantenimiento, por su reparación, y una disminución en la producción, cuestión que puede dar a pensar en una proporcionalidad inversa entre ambos, pero lo

cierto es que en un escenario con mantenimiento controlado, a mayor mantenimiento mayor disponibilidad mecánica y en definitiva mayor producción.

2.6. Costos de producción

Se presenta la estructura de costos de la fábrica. En cuanto a rubros a nivel fábrica, la distribución de los costos es la que se expone en el Gráfico 8.

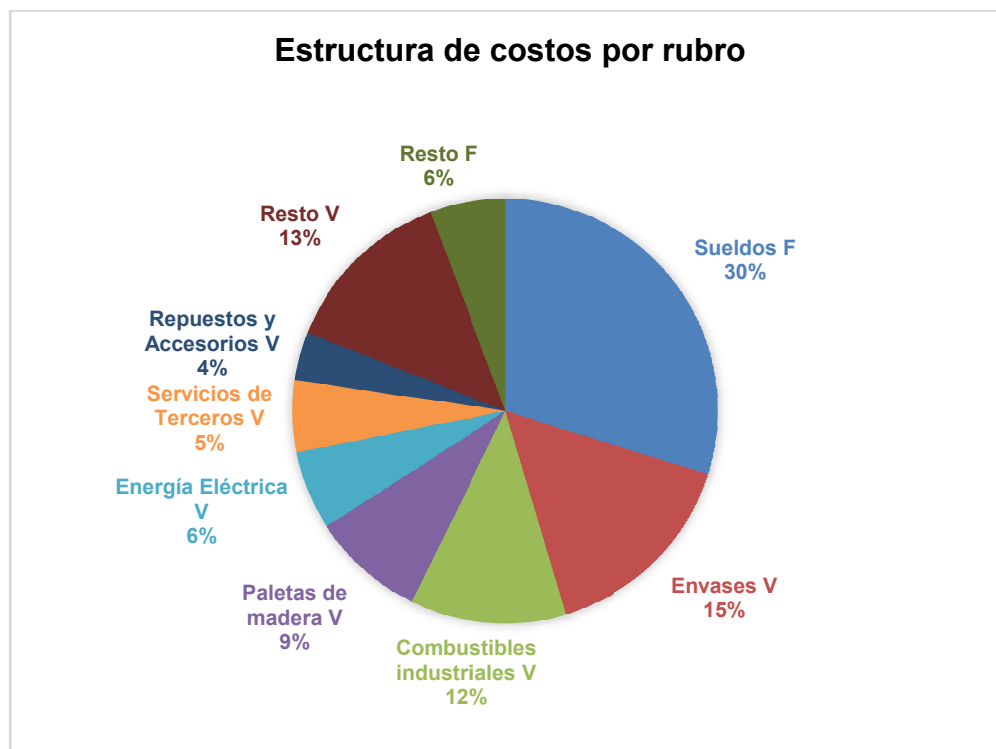


Gráfico 13. Estructura de costos de la fábrica. Se detalla el 80% de los costos más importantes. Se aclara con una F o V si el costo es Fijo o Variable.

Esta estructura de costos ha ido variando con el tiempo en función de:

1. Nivel de actividad (producción): haciendo variar la relación entre costos fijos y costos variables.
2. Consumos específicos de materias primas e insumos.
3. Precios unitarios de compra de materias primas e insumos: en este punto en particular es que el impacto de la inflación a lo largo de los años ha ido modificando sustancialmente las incidencias de cada rubro.

2.6.1. Materias primas, insumos, recursos y servicios

Los costos unitarios más importantes y representativos dentro de la estructura de costos son los que figuran en la Tabla 17:

	ESTADO DE LA CUESTIÓN Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	Aumento de Productividad
---	---	--------------------------

Concepto	Tipo	Precio unitario	Unidades
Piedra caliza	Materia Prima	\$27,02	\$/t
Carbón	Insumo	\$1.327,50	\$/t
Gas Oil	Insumo	\$15,22	\$/l
Energía	Insumo	\$1,03	\$/Kwh
Envases	Insumo	\$4,10	\$/envase
Pallets	Insumo	\$164,00	\$/pallet
Personal	Recurso	\$65,71	\$/HH AOMA
Transporte	Servicio	\$10,17	\$/t
Perforación	Servicio	\$135,20	\$/ml

Tabla 17. Precios unitarios de la materia prima, principales insumos, recursos y servicios. Todos los valores aquí expresados son valores puestos en planta a septiembre de 2016.

Para el costo de **personal** el valor sirve de referencia pero el costo total de personal del Gráfico 8 incluye cargas sociales, premios, previsión SAC, licencias, indemnizaciones, vacaciones, horas extras, etc.

En el caso de los **envases** si bien las medidas son diferentes para la CH1 y la CH2, se muestra un valor promedio.

Lo mismo ocurre con el costo de **transporte**, ya que existen dos movimientos principales que casualmente llevan un precio casi idéntico porque las distancias son similares: transporte de piedra de cantera a trituración, y transporte de PUH a hornos/transporte de Filler a Molienda.

El costo de **energía eléctrica** es el total de la facturación sobre el total de toneladas producidas; actualmente no se cuenta con elementos para medir el consumo de cada equipo o sector, por lo cual la imputación del costo se hace por potencia instalada y factores de uso/simultaneidad.

El resto de los gastos (19%), se componen de acuerdo con la Tabla 18:

Concepto	%
Flete de materias primas	14%
Impuestos y tasas	11%
Talleres externos mecánicos	8%
Transporte de personas	8%
Explosivos	8%
Amortización de bienes de uso	8%
Pegamento de bolsas	5%
Refractarios y cadenas - amortización	4%
Rodamientos y accesorios	3%
Repuestos eléctricos/electrónicos	3%
Film stretch	3%

ITBA	ESTADO DE LA CUESTIÓN Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	Aumento de Productividad
Reparaciones y Rep.	3%	
Uniformes y equipos	3%	
Honorarios profesionales	2%	
Provisiones alimenticias	2%	
Combustibles vehículos	2%	
Seguros	1%	
Bolsones	1%	
Gas natural	1%	
Hierros (chapas, perfiles, etc)	1%	
Mantenimiento de rodados	1%	
Transportes y fletes	1%	
Motores Eléctricos	1%	
Lubricantes	1%	
Mantenimiento eléctrico	1%	
Comunicaciones	1%	
Varios	1%	
Gastos de personal	1%	
Alquileres	1%	
Bulones, tuercas, arandelas	1%	
Resto	2%	

Tabla 18. Apertura de costos del 19% restante (en relación al Gráfico 8), resumida en treinta cuentas.

2.6.2. Costos por etapa

Cada etapa del proceso agrega costo y valor al producto, por la materia prima, el personal asociado a cada etapa, la energía, el combustible, el mantenimiento, el control de calidad, los gastos de higiene y seguridad, las amortizaciones de proyectos de mejora, etc. De esta forma se llega a una composición de los costos por etapa que pueden distinguirse entre fijos (o semifijos) y variables según se muestra en la Tabla 19.

	ESTADO DE LA CUESTIÓN Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	Aumento de Productividad
---	---	--------------------------

Etapas	Producción			Costos (\$)						
	CH1	CH2	Total	Fijo	Variable Total			Variable Unitario		
					CH1	CH2	Total	CH1	CH2	Total
Perforación	6.615	5.010	11.626	0	3.707	2.808	6.515	1	1	1
Voladura	6.615	5.010	11.626	15.761	121.923	92.337	214.260	18	18	18
Carga y Transporte	6.615	5.010	11.626	42.385	88.788	67.242	156.031	13	13	13
Trituración	4.829	3.657	8.487	221.102	84.650	64.109	148.759	18	18	18
Calcinación	3.187	2.414	5.601	520.540	730.364	553.129	1.283.493	229	229	229
Hidratación	3.606	4.552	8.158	189.183	58.854	74.287	133.141	16	16	16
Molienda	3.606	4.552	8.158	548.838	176.263	222.483	398.745	49	49	49
Embolsado	3.606	4.552	8.158	635.844	1.054.960	1.331.594	2.386.554	293	293	293
Filler	0	1.821	1.821	5.520	0	7.711	7.711	0	4	4
Total				2.179.173	2.319.511	2.415.698	4.735.209			

Tabla 19. Costos Fijos y Variables por etapa. Se discriminan las cantidades producidas para poder calcular los costos variables y llevarlos al nivel promedio de producción de la fábrica. El filler se lleva por fuera; ese costo luego es imputado a la producción de CH2. Los costos unitarios están expresados en las unidades de producción de cada etapa, es por eso que los costos variables unitarios de CH1, CH2 y Total no son la suma lineal de los procesos, sino que hay que utilizar los factores de conversión por producto del apartado 2.2.1.

En cuanto a la distribución de los costos fijos, a partir del proceso de hidratación en el cual cada producto tiene una productividad diferente, se prorratan los costos en función de las horas de producción, usando las productividades efectivas de la Tabla 7, quedando de acuerdo a la Tabla 20.

Etapas	Fijo			Variable Unitario		
	CH1	CH2	Total	CH1	CH2	Total
Perforación	0	0	0	3.707	2.808	6.515
Voladura	8.969	6.792	15.761	121.923	92.337	214.260
Carga y Transporte	24.119	18.266	42.385	88.788	67.242	156.031
Trituración	125.817	95.285	221.102	84.650	64.109	148.759
Calcinación	296.210	224.330	520.540	730.364	553.129	1.283.493
Hidratación	81.063	108.120	189.183	58.854	74.287	133.141
Molienda	197.830	351.008	548.838	176.263	222.483	398.745
Embolsado	318.904	316.940	635.844	1.054.960	1.331.594	2.386.554
Filler	0	5.520	5.520	0	7.711	7.711
Total	1.052.912	1.126.261	2.179.173			

Tabla 20. Costos fijos prorratados por etapa del proceso en función de las productividades de cada una. Se supone el mismo mix mencionado en el apartado 2.3.4.

2.6.3. Semielaborados, Productos Terminados y costos “cascada”

Utilizando las matrices de transformación de las Tablas 5 y 6 y los costos por etapa de la Tabla 20, es posible determinar la incidencia de cada etapa en el

	ESTADO DE LA CUESTIÓN Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	Aumento de Productividad
---	---	--------------------------

costo de los semielaborados y productos terminados, y así entender cómo se van incrementando a lo largo del proceso.

\$/t de cal embolsada	Fijo		Variable		Total	
	CH1	CH2	CH1	CH2	CH1	CH2
PV	2	1	35	21	37	22
PUH	42	25	41	25	83	50
CV	82	49	203	122	285	171
CH	22	25	16	22	39	47
CT	55	77	49	49	104	126
Bolsas	88	70	293	293	381	362

Tabla 21. Incidencia de costos por etapa y tipo (fijo o variable), en relación al costo total de la tonelada embolsada.

Acumulando los costos de la Tabla 21 en el orden de ejecución del proceso, se determinan los costos unitarios de los semielaborados, tal como se reflejan en la Tabla 22.

\$/t de cal embolsada	Fijo		Variable		Total	
	CH1	CH2	CH1	CH2	CH1	CH2
PV	2	1	35	21	37	22
PUH	44	26	76	46	120	72
CV	126	76	279	167	405	243
CH	149	101	295	190	444	290
CT	204	178	344	238	548	416
Bolsas	292	247	637	531	929	778

Tabla 22. Costos cascada por tipo de producto y comportamiento (Fijo o Variable).

Es notable el efecto del filler en los costos finales del CH2.

2.7. Rentabilidades

Desde la implementación del régimen de control de precios las estructuras de costos han ido cambiando en el peso relativo de sus componentes. Por lo general los costos han aumentado en mayor proporción que los precios, tal como se exhibe en los Gráficos 9 y 10 para cada producto.

Sin detallar demasiado las características y la dinámica del mercado de cales hidráulicas, cabe mencionar que los líderes de mercado son empresas cementeras con estructuras de costos completamente distintas a las caleras tradicionales.

En líneas generales tienen acceso a facilidades que se desprenden de la economía de escala, tales como mejores precios unitarios de sus insumos (carbón, envases, pallets, etc.), no así con los sueldos, ya que deben obedecer a los acuerdos con el Sindicato. También tienen menor incidencia de los costos de estructura, mejor aprovechamiento de sus yacimientos (la caliza de menor tenor es mejor para producir cemento), y “rebalse” tecnológico del

	ESTADO DE LA CUESTIÓN Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	Aumento de Productividad
---	---	--------------------------

equipamiento que se usa para producir cemento, en especial para molienda y clasificación, aunque hay casos en los que incluso se calcina con hornos rotativos.

En lo financiero, además de tener acceso a líneas de crédito con tasas internacionales (por ser multinacionales), logran mejores acuerdos comerciales en cuanto a plazos de pago a proveedores. En definitiva tienen mejor financiación a corto y a largo plazo.

En lo comercial tienen liderazgo de mercado, manejo de los principales canales logísticos y le representan una mayor parte de la facturación a los corralones de materiales por ser los proveedores de cemento. Eso logra otro plus financiero por tener mejores plazos de cobro, que los corralones terminan compensando con sus demás proveedores.

Todas estas condiciones y seguramente algunas más, han permitido que los líderes de mercado puedan subsistir sin trasladar a precios la totalidad de los aumentos en sus costos. En el caso de estudio los precios limitados por la competencia y la inflación han dejado una rentabilidad que arriesga la sustentabilidad del negocio y obliga a redefinir estrategias.

Una de las medidas más importantes es optimizar costos, en lo posible encontrar las oportunidades con mejores repagos y menores necesidades de inversión, ya que las condiciones financieras no están dadas para un gran endeudamiento a largo plazo.

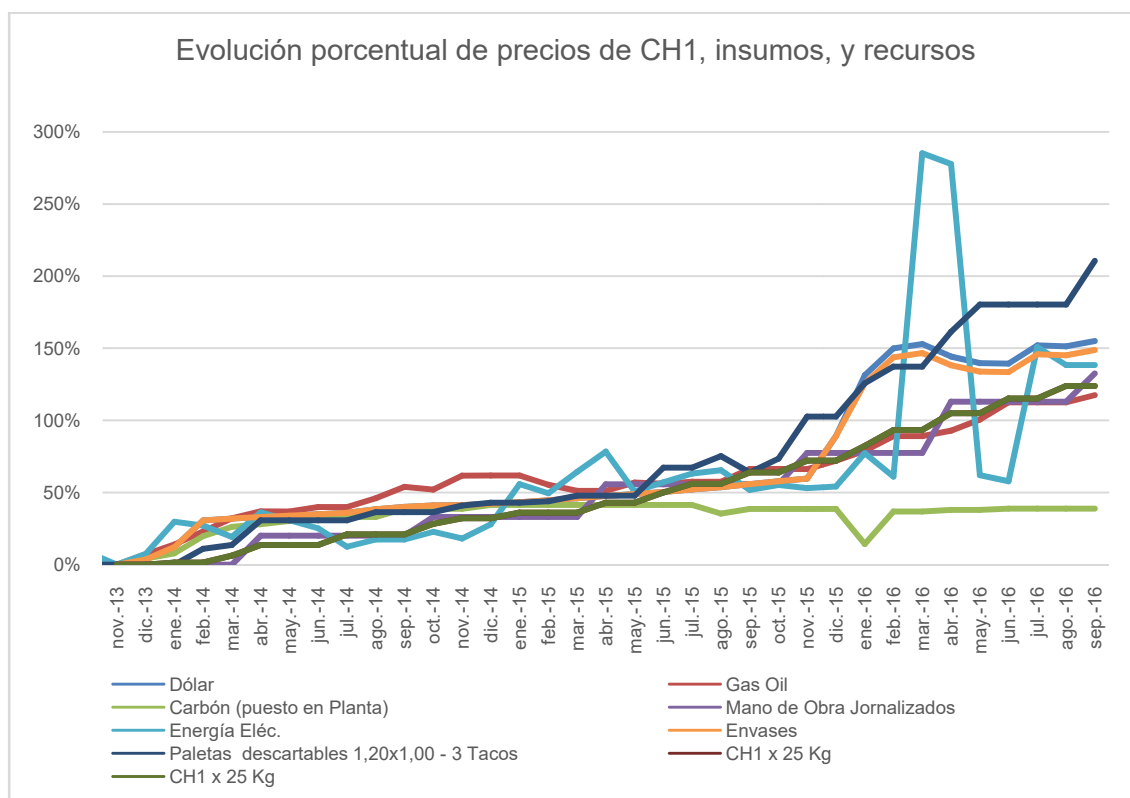


Gráfico 14. Evolución de precios de CH1 frente a los referentes de sus principales insumos, desde noviembre de 2013, mes a partir del cual hubo un cambio sustancial en la estructura de costos del producto.

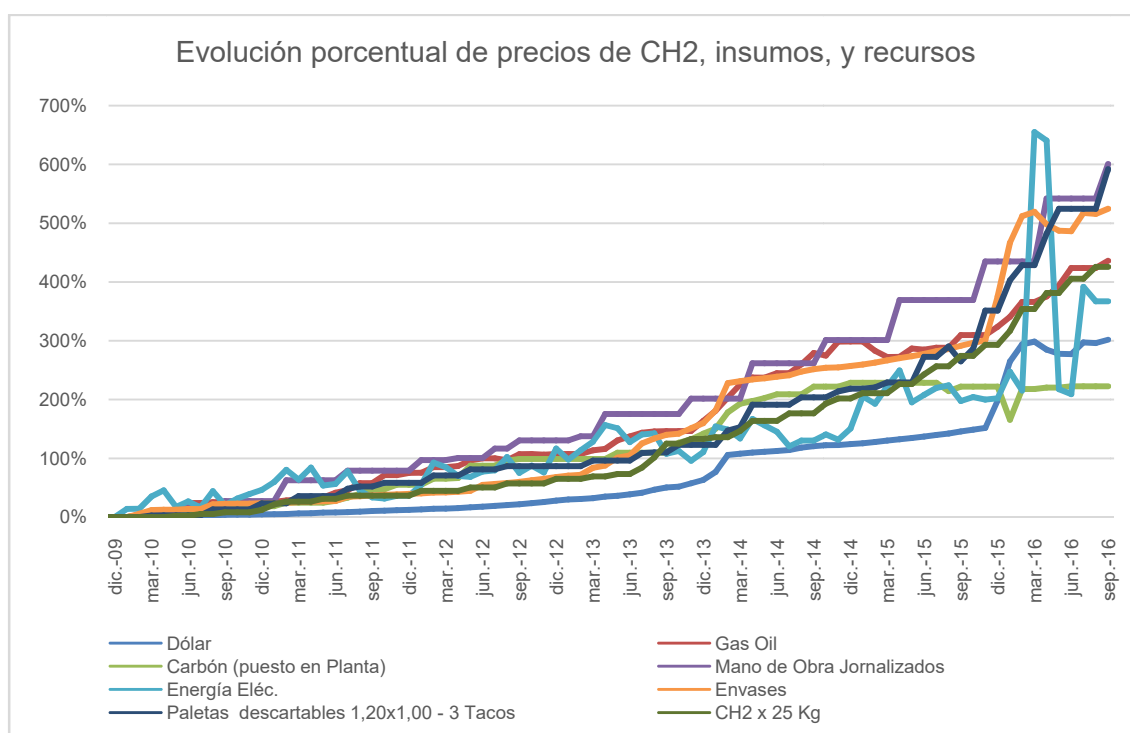


Gráfico 15. Evolución de precios de CH2 frente a los referentes de sus principales insumos, desde diciembre de 2009, mes a partir del cual hubo un cambio sustancial en la

	ESTADO DE LA CUESTIÓN Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	Aumento de Productividad
---	--	-----------------------------

estructura de costos del producto. Se observa que el costo principal (Mano de Obra) ha aumentado en mayor medida que el precio.

En resumen, la situación en precios y costos para cada producto es la que se muestra en la Tabla 23.

	Precio	Costo de Producción			Margen		Contribución
	\$/t	Fijo \$/t	Variable \$/t	Total \$/t	\$/t	%	Marginal \$/t
CH1	1.156	292	637	929	228	20%	520
CH2	914	247	531	778	136	15%	383

Tabla 23. Resumen de precios, costos de producción y contribuciones marginales para cada producto. No se consideran los costos de estructura tales como Administración de fábrica y otros sectores corporativos, así como gastos financieros (amortizaciones de deuda e intereses).

2.8. Definición del problema

En función de lo expuesto al momento, se define como problema general que el resultado de rentabilidad con esta configuración de costos y precios hace insostenible el negocio. Existe una alta incidencia de gastos de administración, comercialización y financieros que requieren que el margen bruto de la fábrica aumente. Para esto es de vital importancia disminuir los costos unitarios de producción o aumentar el volumen de producción.

	SOLUCIÓN PROPUESTA	Aumento de Productividad
---	--------------------	--------------------------

3. SOLUCIÓN PROPUESTA

Ante la necesidad de reducir los costos unitarios de los productos y/o aumentar el volumen de producción, se proponen diferentes líneas de análisis, que en principio no se consideran mutuamente excluyentes:

1. Aumentar el aprovechamiento de activos y recursos.
 - a. Aumento de disponibilidad mecánica y utilización (intraetapa).
 - b. Reducción de paradas por problemas externos (interetapa y exoetapa).
 - c. Aumento de productividad efectiva.
2. Reducir el consumo específico de materias primas e insumos.
3. Redefinir el proceso.

También es posible que los costos unitarios aumenten pero aumente en mayor medida la cantidad producida, por lo cual el margen porcentual disminuye pero el margen absoluto se incrementa. Esto también diluye los costos de estructura que aporta la administración, el área comercial y demás sectores corporativos, pero es más riesgoso desde la pérdida de apalancamiento.

3.1. Aprovechamiento de activos y recursos.

La primera de las propuestas consiste en sacarle el máximo provecho o rendimiento a las instalaciones y el personal asociado a la producción y así reducir la incidencia de los costos fijos sin necesidades de inversión. Para esto es esencial conocer las capacidades máximas y de diseño de los distintos equipos.

El objetivo es encontrar la forma de aumentar la producción a igual cantidad de horas de trabajo, o incrementando las horas de trabajo pero con una incidencia que se justifique desde los costos unitarios.

3.1.1. Balance de línea

Como se expuso en el apartado 2.3.6, cada producto tiene su cuello de botella en distintas etapas del proceso. Para cada uno se supondrá alguna medida que lo destrabe hasta encontrar el siguiente cuello de botella, y así ir aumentando los volúmenes de producción. Finalmente se buscará el escenario que genere mejores resultados.

Es importante recordar que en promedio la fábrica se encuentra produciendo 100.000 t/año, un equivalente mensual a 3.683 t de CH1 y 4.650 t de CH2, en total 8.333 t/mes.

3.1.1.1. CH1

El cuello de botella en este producto se encuentra en la capacidad de calcinación. Es un producto con un alto consumo específico de CV, y la

	SOLUCIÓN PROPUESTA	Aumento de Productividad
---	--------------------	--------------------------

calcinación es un proceso con fuerte incidencia en sus costos totales. De poder vender la totalidad de la producción, si se utilizara toda la CV para producción de CH1, la máxima producción sería de 7.864 t/mes, un 94,3% de la producción promedio.

3.1.1.2. CH2

El cuello de botella en este caso está en la capacidad de clasificación y molienda. Si se decidiera bajo las condiciones actuales producir sólo CH2, la producción máxima sería de 8.408 t/mes, un 0,9% más que la producción promedio.

3.1.2. Disponibilidad mecánica y utilización

En el apartado 2.3.2 se han expuesto las utilizaciones y disponibilidades mecánicas de cada etapa del proceso. Una mejora en el nivel de servicio de mantenimiento o renovación de los equipos que más problemas traen a la hora de sostener la eficiencia de marcha, aumentaría la capacidad de producción en cada etapa.

Suponiendo que es posible recobrar la confiabilidad de la fábrica, logrando disponibilidades mecánicas y utilizaciones máximas en los cuellos de botella del orden del 95% y del 98%, respectivamente, logrando así las producciones finales de las Tablas 24 y 25.

	Disponibilidad Mecánica		Utilización		Producción CH1		Incremento
	Original	Propuesta	Original	Propuesta	Original	Alcanzada	
Embolsado	85,7%	90,0%	94,9%	94,9%	1.810	1.891	4,5%
Calcinación	97,3%	97,3%	94,4%	98,0%	1.891	1.900	0,5%
Embolsado	90,0%	91,0%	94,9%	94,9%	1.900	1.907	0,3%
Total							5,4%

Tabla 24. Incremento de producción posible para la CH1, aumentando la disponibilidad mecánica del Embolsado y la utilización de la Calcinación. La disponibilidad mecánica del Embolsado debe aumentarse por segunda vez porque vuelve a ser cuello de botella una vez que se aumenta la utilización de la Calcinación. Se logra un aumento de productividad total de 5,4%.

	Disponibilidad Mecánica		Utilización		Producción CH2		Incremento
	Original	Propuesta	Original	Propuesta	Original	Alcanzada	
Clasificación y Molienda	87,5%	95,0%	97,5%	98,0%	1.936	2.112	9,1%

Tabla 25. Incremento de producción posible para la CH2, aumentando la disponibilidad mecánica y Utilización de la Clasificación y Molienda. Se logra un aumento de productividad de 9,1%.

De esta forma los nuevos cuellos de botella se ubican en las etapas de Calcinación y Clasificación y Molienda para la producción de CH1 y CH2, respectivamente. Un segundo aumento de disponibilidad mecánica y utilización

	SOLUCIÓN PROPUESTA	Aumento de Productividad
---	--------------------	--------------------------

en estos puntos vuelve a aumentar la capacidad total de producción de acuerdo a las Tablas 26 y 27.

CH1	t/h ef	h/sem ef	Capacidad t/sem	MP	MP	Prod.
				necesaria t/sem	disponible t/sem	Posible t/sem
Trituración	69,5	36,7	2.554	3.498	N/A	2.554
Calcinación	13,4	124,7	1.671	2.532	2.554	1.671
Molienda e Hidratación	29,9	77,5	2.318	2.048	1.671	1.891
Clasificación y Molienda	24,4	120,8	2.953	2.953	1.891	1.891
Embolsado	23,7	81,1	1.922	1.922	1.891	1.891

Tabla 26. Cuello de botella luego de aumentar la disponibilidad mecánica del Embolsado y la utilización de la Calcinación. Se observa que ahora predomina la Calcinación, y en segundo lugar el Embolsado, que aún tiene posibilidades de aumentar su disponibilidad mecánica y utilización.

CH2	t/h ef	h/sem ef	Capacidad t/sem	MP	MP	Prod.
				necesaria t/sem	disponible t/sem	Posible t/sem
Trituración	69,5	36,7	2.554	3.498	N/A	2.554
Calcinación	13,4	124,7	1.671	2.532	2.554	1.671
Molienda e Hidratación	28,3	77,5	2.193	1.163	1.671	2.193
Clasificación y Molienda	17,4	120,8	2.101	2.101	2.193	2.101
Embolsado	30,1	81,1	2.441	2.441	2.101	2.101

Tabla 27. Cuello de botella luego de aumentar la disponibilidad mecánica y utilización de la Clasificación y Molienda. Se observa que aun cuando se logre destrabar este cuello de botella se alcanza rápidamente el límite con la Molienda e Hidratación.

Este ejercicio se realizó hasta que no sea posible seguir aumentando la capacidad total de producción, siempre manteniendo las productividades tal cual están. En cuanto a la factibilidad de lograr esos resultados, un análisis de los causales de detención permite identificar las oportunidades de aumento de estos dos indicadores, haciendo más realista esta alternativa y permitiendo dimensionar la necesidad de inversión o aumento de costos correspondiente.

3.1.3. Aprovechamiento

Para cada etapa existen factores externos que causan detenciones y que pueden atacarse según la naturaleza de cada uno. Merecen especial atención las detenciones originadas a partir de las detenciones del sector precedente o siguiente, con pulmones insuficientes para continuar con la producción. En particular, la etapa de Hidratación y Molienda presenta un 30,5% de su tiempo detenida por encontrarse los silos de CH llenos. Es esperable que siendo una etapa más productiva exista este problema, pero esos niveles de detención prácticamente justificarían la reducción del esquema de trabajo a dos turnos, si el pulmón intermedio fuera suficiente como para abastecer a la Molienda y Clasificación ininterrumpidamente. Sólo por la diferencia de productividades, y

	SOLUCIÓN PROPUESTA	Aumento de Productividad
---	--------------------	--------------------------

maximizando la duración de las detenciones, es posible estimar el tiempo de detención mínimo del sector de Molienda e Hidratación, como se visualiza en la Tabla 28:

	SOLUCIÓN PROPUESTA	Aumento de Productividad
---	--------------------	--------------------------

Hora	Producción		Producción		Silos CH	
	Hidratación		Clasificación		CH1	CH2
	CH1	CH2	CT1	CT2		
0					79,2	0
1	0,0	0,0	24,4	0,0	54,8	0,0
2	0,0	0,0	24,4	0,0	30,3	0,0
3	0,0	0,0	24,4	0,0	5,9	0,0
4	0,0	21,5	5,9	13,2	0,0	8,3
5	0,0	28,3	0,0	17,4	0,0	19,2
6	0,0	28,3	0,0	17,4	0,0	30,2
7	0,0	28,3	0,0	17,4	0,0	41,1
8	0,0	28,3	0,0	17,4	0,0	52,0
9	0,0	28,3	0,0	17,4	0,0	63,0
10	0,0	28,3	0,0	17,4	0,0	73,9
11	0,0	28,3	0,0	17,4	0,0	84,8
12	0,0	28,3	0,0	17,4	0,0	95,7
13	0,0	22,4	0,0	17,4	0,0	100,8
14	0,0	0,0	0,0	17,4	0,0	83,4
15	0,0	0,0	0,0	17,4	0,0	66,0
16	0,0	0,0	0,0	17,4	0,0	48,6
17	0,0	0,0	0,0	17,4	0,0	31,2
18	0,0	0,0	0,0	17,4	0,0	13,8
19	6,1	0,0	5,0	13,8	1,1	0,0
20	29,9	0,0	24,4	0,0	6,6	0,0
21	29,9	0,0	24,4	0,0	12,1	0,0
22	29,9	0,0	24,4	0,0	17,6	0,0
23	29,9	0,0	24,4	0,0	23,1	0,0
24	29,9	0,0	24,4	0,0	28,5	0,0
25	29,9	0,0	24,4	0,0	34,0	0,0
26	29,9	0,0	24,4	0,0	39,5	0,0
27	29,9	0,0	24,4	0,0	45,0	0,0
28	29,9	0,0	24,4	0,0	50,5	0,0
29	29,9	0,0	24,4	0,0	56,0	0,0
30	29,9	0,0	24,4	0,0	61,4	0,0
31	29,9	0,0	24,4	0,0	66,9	0,0
32	29,9	0,0	24,4	0,0	72,4	0,0
33	29,9	0,0	24,4	0,0	77,9	0,0
34	25,7	0,0	24,4	0,0	79,2	0,0
35	0,0	0,0	24,4	0,0	54,7	0,0
36	0,0	0,0	24,4	0,0	30,3	0,0
37	0,0	0,0	24,4	0,0	5,8	0,0
38	0,0	21,5	5,8	13,2	0,0	8,3

Tabla 28. Minimización de tiempos de detención del sector de Molienda e Hidratación considerando las diferencias de productividades.

Este tipo de detenciones puede minimizarse mediante una programación de la producción más eficiente que busque aprovechar las diferencias de productividades de cada producto en cada etapa haciendo uso de los pulmones.

La programación define ciclos productivos continuos de 33,9 horas y tiene como resultado una producción de 451 toneladas de CH1 en 15,1 horas, y de

	SOLUCIÓN PROPUESTA	Aumento de Productividad
---	--------------------	--------------------------

270 toneladas de CH2 en 9,6 horas. El tiempo inutilizado es de 9,2 horas, es decir un 27,3% del tiempo total.

Para el resto de los sectores es factible suponer que no habrá ineficiencias por problemas externos, ya que en Calcinación una detención por silos llenos sólo puede explicarse por una producción excesiva de CH2, ya que para la CH1 es justamente uno de los limitantes en la producción.

En la Clasificación y Molienda ocurre que al trabajar el Embolsado en dos turnos, existe la posibilidad de llenar los silos de cal terminada durante el turno en el que el Embolsado no trabaja, obligando a detener el proceso. No es necesario hacer una simulación como se hizo enfrentando la Hidratación y la Clasificación para demostrar que esas ineficiencias pueden eliminarse con una mejor programación.

	Disponibilidad Mecánica	Utilización	Aprovechamiento	Problemas Externos
Trituración	91,1%	84,0%	76,5%	0,0%
Calcinación	97,3%	94,4%	91,9%	0,0%
Molienda e Hidratación	82,6%	93,7%	56,3%	27,3%
Clasificación y Molienda	87,5%	97,5%	85,3%	0,0%
Embolsado	85,7%	94,9%	81,3%	0,0%

Tabla 29. Nuevos aprovechamientos luego de minimizar las detenciones por problemas externos.

Con estos resultados, el mix de producción queda en un 62% de CH1 y 38% de CH2, frente a un 44,2% y 55,8% actual. La productividad de la CH2 en la etapa de Clasificación y Molienda es una limitación muy grande. Este mix amplía la capacidad de producción en un 5,7% ya que el aprovechamiento aumenta de 53,8% a 56,3%, tal como se observa en la Tabla 29.

En los extremos, la capacidad de producción de la CH1 es aumentada en un 2,2% y la de la CH2 en un 10,4%, tal como se expresa en las Tablas 30 y 31, respectivamente, donde se puede observar que los cuellos de botella se mantienen en las mismas etapas.

	SOLUCIÓN PROPUESTA	Aumento de Productividad
---	--------------------	--------------------------

CH1	t/h ef	h/sem ef	Capacidad	MP	MP	Prod.
			t/sem	necesaria	disponible	Posible
Trituración	69,5	36,7	2.554	3.498	N/A	2.554
Calcinación	13,4	132,3	1.772	2.685	2.554	1.685
Molienda e Hidratación	29,9	81,0	2.424	2.143	1.685	1.907
Clasificación y Molienda	24,4	122,9	3.002	3.002	1.907	1.907
Embolsado	23,7	78,1	1.850	1.850	1.907	1.850

Tabla 30. Capacidad de producción de CH1 por etapa, con los aprovechamientos de la Tabla 29. La capacidad aumenta un 2,2%.

CH2	t/h ef	h/sem ef	Capacidad	MP	MP	Prod.
			t/sem	necesaria	disponible	Posible
Trituración	69,5	36,7	2.554	3.498	N/A	2.554
Calcinación	13,4	132,3	1.772	2.685	2.554	1.685
Molienda e Hidratación	28,3	81,0	2.294	1.217	1.685	2.294
Clasificación y Molienda	17,4	122,9	2.136	2.136	2.294	2.136
Embolsado	30,1	78,1	2.350	2.350	2.136	2.136

Tabla 31. Capacidad de producción de CH2 por etapa, con los aprovechamientos de la Tabla 29. La capacidad aumenta un 10.4%.

3.1.4. Productividad efectiva

Se analiza el impacto en el costo unitario de aumentar la productividad de cada etapa. Sobre todo en los casos en los que los pulmones de materia prima pueden estar vacíos y la etapa posterior está subalimentada, guiarse por la productividad lograda en estas condiciones es subestimar la capacidad de aquella etapa.

Según la etapa del proceso que se analice, existen distintas formas de estimar la capacidad real de producción. Todo aumento de productividad efectiva debe ser sustentable, y asegurar la calidad del producto obtenido y la integridad de los equipos, más allá de no trabajar en el punto óptimo del costo total de operación individual.

Para el caso de la Calcinación, internamente se ha definido que los resultados deben poder mantenerse durante 15 días para validar una nueva capacidad de producción. En cuanto al costo unitario de producción de la CV, a pesar de disminuir la incidencia del costo fijo, es posible que un aumento de productividad aumente el costo variable unitario porque a menor tiempo de residencia en el horno mayor es la necesidad de enfriar el material en la descarga, y sin tecnología para recuperar esa energía se termina perdiendo calor, necesitando más carbón y más ventilador. Aunque existe la posibilidad de que el costo unitario final de la CV sea mayor, también es posible que el costo unitario final de la bolsa sea menor.

	SOLUCIÓN PROPUESTA	Aumento de Productividad
---	--------------------	--------------------------

En el caso de la Molienda e Hidratación, la Clasificación y Molienda, y el Embolsado, no es necesario sostener durante tanto tiempo las productividades para definir la máxima posible. Así como en la Calcinación, en la Molienda un aumento de la productividad podría significar un desgaste de elementos moledores en mayor proporción a la productividad, o menor si es que los equipos se encuentran subutilizados.

A tener en consideración, si se supone la disponibilidad mecánica como la sumatoria de tiempos de detención por falla respecto del tiempo en que el equipo pudo haber producido (se cumplieran todas las necesidades de materias primas, insumos y recursos asociados al equipo), tal cual se ve en la Ecuación 5 donde dm es la disponibilidad mecánica, t_{total} el tiempo nominal en el que un equipo/sector es puesto a disposición para su uso, t_{ext} el tiempo en el que un equipo/sector no es utilizable por factores externos (no dispone de materia prima, espacio para disponer de su producción, personal para operarlo, energía para accionarlo, etc.), d_i la duración de cada detención, y n la cantidad de detenciones:

$$dm = \frac{t_{total} - t_{ext} - \sum_{i=0}^n d_i}{t_{total} - t_{ext}} \quad (5)$$

A su vez esa sumatoria de detenciones tendrá una frecuencia y tiempo promedio de detención, es decir que puede escribirse según la Ecuación 6.

$$\sum_{i=0}^n d_i = n \cdot \frac{\sum_{i=0}^n d_i}{n} = n \cdot \bar{d} \quad (6)$$

Independientemente del valor de disponibilidad mecánica, a mayor n menor productividad efectiva, ya que los equipos tardan un tiempo en entrar en estado de régimen (en el que logran trabajar a niveles constantes o dentro de ciertos límites de control) y la productividad hasta lograr ese estado siempre es menor. En la Tabla 32 se detallan las productividades que se podrían lograr en cada sector.

	SOLUCIÓN PROPUESTA	Aumento de Productividad
---	--------------------	--------------------------

Productividad (t/h efectiva)		
Material de salida	Cal de Primera	Cal de Segunda
PUH	69,5	
Cal viva	14,43	
Cal Hidratada	29,9	28,3
Cal terminada	24,4	18,3
Cal en bolsas	27,8	30,1

Tabla 32. Productividades alcanzables en las etapas que actualmente son cuello de botella. Para el caso de la CH1, la capacidad de producción aumenta en 5,4%; para la CH2, la capacidad de producción aumenta en 5,3%.

De esta manera las capacidades finales de producción son las que figuran en las Tablas 33 y 34.

CH1			Capacidad	MP	MP	Prod.
	t/h ef	h/sem ef	t/sem	necesaria	disponible	Posible
Trituración	69,5	36,7	2.554	3.498	N/A	2.554
Calcinación	14,4	124,7	1.800	2.727	2.554	1.685
Molienda e Hidratación	29,9	77,5	2.318	2.048	1.685	1.907
Clasificación y Molienda	24,4	111,3	2.720	2.720	1.907	1.907
Embolsado	27,8	76,4	2.124	2.124	1.907	1.907

Tabla 33. Capacidad de producción de CH1 aumentando la productividad de las etapas de Calcinación y Embolsado. El cuello de botella se reubica en la etapa de Calcinación.

CH2			Capacidad	MP	MP	Prod.
	t/h ef	h/sem ef	t/sem	necesaria	disponible	Posible
Trituración	69,5	36,7	2.554	3.498	N/A	2.554
Calcinación	14,4	124,7	1.800	2.727	2.554	1.685
Molienda e Hidratación	28,3	77,5	2.193	1.163	1.685	2.193
Clasificación y Molienda	18,3	111,3	2.037	2.037	2.193	2.037
Embolsado	30,1	76,4	2.298	2.298	2.037	2.037

Tabla 34. Capacidad de producción de CH2 aumentando la productividad de las etapas de Calcinación, y Clasificación y Molienda. El cuello de botella se mantiene en la etapa de Clasificación y Molienda

3.1.5. Turnos de trabajo

Es posible aumentar la capacidad de producción total incrementando la cantidad de horas trabajadas. Para este caso es evidente el costo adicional; lo que hay que analizar es la factibilidad de aprovecharlo.

Tomando el cuello de botella de la CH1, sumar un turno de Embolsado aumentaría definitivamente la capacidad de producción total, y a su vez agregar otro turno de Calcinación destrabaría el siguiente cuello de botella. Un turno más de Embolsado significa sumar 5 personas a la dotación y un total de

	SOLUCIÓN PROPUESTA	Aumento de Productividad
---	--------------------	--------------------------

48 horas nominales de Embolsado a la semana. Un turno más de Calcinación implica un cambio de régimen de trabajo para el sector: de rotativo 6x1 a rotativo 6x2, sumando 2 personas a la dotación y en cuanto a costos se debe contemplar una suma adicional para no disminuir el sueldo de los operarios que actualmente están trabajando, ya que un cambio de régimen de este tipo supone una reducción de horas semanales trabajadas por persona. Las horas nominales de producción que se suman en una semana son 24, por lo cual debe fundamentarse muy bien una decisión como esta ya que difícilmente se pueda revertir. Son 24 horas a un costo mayor que la hora normal.

Incorporando sólo un turno de Embolsado el aumento de producción es de un 4,5%. Incorporando Embolsado y Calcinación, surge un nuevo cuello de botella en la Trituración que obliga a incorporar un turno adicional en esta etapa. De esta forma se llega a una nueva capacidad de producción, tal como se muestra en la Tabla 35.

CH1	t/h ef	h/sem ef	Capacidad		MP	MP	Prod.
			t/sem	t/sem	necesaria	disponible	Posible
Trituración	69,5	73,5	5.107	6.996		N/A	5.107
Calcinación	13,4	145,5	1.950	2.954		5.107	1.950
Molienda e Hidratación	29,9	103,3	3.090	2.731		1.950	2.206
Clasificación y Molienda	24,4	148,4	3.626	3.626		2.206	2.206
Embolsado	23,7	114,5	2.715	2.715		2.206	2.206

Tabla 35. Capacidad de producción de CH1 si se incorpora un tercer turno de Embolsado, cuarto turno de Calcinación y segundo turno de Trituración. El total de personas a incorporar es de 9, y el aumento de producción resultante es de 21,9%. El cuello de botella sigue siendo la Calcinación.

Las dotaciones finales se observan en la Tabla 36.

Sector	Lunes a Sábado			Domingo
	Mañana	Tarde	Noche	
Canteras	1	-	-	Franco
Trituración	2	2	-	Franco
Calcinación	2	2	2	2
Molienda e Hidratación	2	2	2	Franco
Clasificación y Molienda	2	2	2	Franco
Embolsado	3	3	3	Franco
Carga y Despacho	3	3	2	Franco
Servicios Generales	1	1	-	Franco

Tabla 36. Dotación productiva y su distribución en turnos para incrementar la capacidad de producción de la CH1.

Para la CH2, realizados estos cambios para la CH1, sólo resta aumentar un turno de Clasificación y Molienda, pero al ser una etapa con muy poca autonomía por tener silos que la alimentan de baja capacidad, también debe

	SOLUCIÓN PROPUESTA	Aumento de Productividad
---	--------------------	--------------------------

incrementarse un turno de Molienda e Hidratación. Esto suma 4 personas nuevamente en un régimen 6x2, y un total de 24 horas nominales de producción tal como se observa en la Tabla 37.

Sector	Lunes a Sábado			Domingo
	Mañana	Tarde	Noche	
Canteras	1	-	-	Franco
Trituración	2	-	-	Franco
Calcinación	2	2	2	Franco
Molienda e Hidratación	2	2	2	2
Clasificación y Molienda	2	2	2	2
Embolsado	3	3	-	Franco
Carga y Despacho	3	3	-	Franco
Servicios Generales	1	1	-	Franco

Tabla 37. Dotación productiva y su distribución en turnos para incrementar la capacidad de producción de la CH2.

La nueva capacidad de producción de CH1 se muestra en la Tabla 38.

CH2	t/h ef	h/sem ef	Capacidad		MP disponible t/sem	Prod. Posible t/sem
			t/sem	MP necesaria t/sem		
Trituración	69,5	36,7	2.554	3.498	N/A	2.554
Calcinación	13,4	124,7	1.671	2.532	2.554	1.671
Molienda e Hidratación	28,3	90,4	2.559	1.357	1.671	2.559
Clasificación y Molienda	17,4	129,9	2.257	2.257	2.559	2.257
Embolsado	30,1	76,4	2.298	2.298	2.257	2.257

Tabla 38. Capacidad de producción de CH2 si se incorpora un cuarto turno de Hidratación y Clasificación. El total de personas a incorporar es de 4, y el aumento de producción resultante es de 16,7%. El cuello de botella sigue siendo la Molienda y Clasificación.

En cuanto a la factibilidad de estos cambios, sólo hay que asegurarse de que los pulmones existentes lo resistan, como es el caso de los silos de cal hidratada, que definitivamente no son suficientes para alimentar la Clasificación y Molienda durante un día entero sin reposición.

En el caso de incorporar un turno de Calcinación, sólo hay que asegurar que haya espacio en los silos de cal viva para un día de producción de cal viva, es decir entre 250 y 300 toneladas (se recuerda que la capacidad de almacenamiento de cal viva es de 400 t). De la misma forma, incorporar un cuarto turno de Hidratación y Clasificación, implica tener cal viva suficiente como para hidratar un día entero. Para esto se requieren menos de 200 t, por lo cual no habría problema en este caso.

De todas maneras estos esquemas sólo sirven para los casos extremos en que se produzca sólo un producto, acentuando las necesidades de las etapas menos productivas para cada producto. En un caso más real se produciría un

	SOLUCIÓN PROPUESTA	Aumento de Productividad
---	--------------------	--------------------------

mix de 44% de CH1, permitiendo compensar las necesidades de uno y otro producto a través de la programación de la producción y el uso de pulmones. De esta forma se llega a un esquema de turnos más equilibrado, tal como se muestra en la Tabla 39. Dado que las necesidades adicionales en algunos casos son mínimas, se propone cubrir los faltantes con horas extras.

Sector	Lunes a Sábado			Domingo
	Mañana	Tarde	Noche	
Canteras	1	-	-	Franco
Trituración	2	1 HX	-	Franco
Calcinación	2	2	2	9 HX
Molienda e Hidratación	2	2	2	2
Clasificación y Molienda	2	2	2	2
Embolsado	3	3	20 HX	Franco
Carga y Despacho	3	3	20 HX	Franco
Servicios Generales	1	1	-	Franco

Tabla 39. Dotación productiva y su distribución en turnos para incrementar la capacidad de producción del mix 45% CH1. En el caso de la Trituración se requeriría 1 hora extra al mes, en Calcinación 9 horas extras al mes, en Embolsado, Carga y Despacho 20 horas extras al mes, y en el caso de Molienda e Hidratación y Clasificación y Molienda se necesitan cubrir 60 y 68 horas, respectivamente. Para estos últimos casos es conveniente modificar el esquema rotativo a 6x2.

Una última consideración sobre esta alternativa, es la incertidumbre sobre las disponibilidades mecánicas de los equipos, ya que ampliar los horarios de trabajo implica reducir las horas de mantenimiento con equipos detenidos. En un escenario como el actual, es probable que una medida como esta termine siendo contraproducente a la hora de restaurar la confiabilidad.

3.2. Consumo específico de materias primas y recursos

Se analiza hacer un uso más eficiente de los insumos, materias primas y recursos, a igual resultado en productividad.

3.2.1. Mermas y desperdicios

No se tiene registro de puntos en el proceso donde se pierda producto terminado o semielaborado.

Cabe mencionar el material de descarte producido en la trituración primaria, en promedio un 27,1% de la caliza total triturada. Existen tecnologías de trituración que pueden reducir el nivel de descarte, así como tecnologías de calcinación que permiten aprovechar granulometrías inferiores a las actuales. Al ser inversiones mayores exceden el alcance del proyecto, además de requerir de tiempos demasiado largos de ejecución y puesta en marcha.

En tal sentido, luego de años de estudios la trituración y la calcinación se encuentran en un nivel óptimo de generación de descarte. A su vez este mismo descarte es utilizado como filler.

	SOLUCIÓN PROPUESTA	Aumento de Productividad
---	--------------------	--------------------------

3.2.2. Rendimientos y matriz de conversión

La CH2 tiene una oportunidad desde sus especificaciones de producto, de incrementar el contenido de filler. Los puntos a considerar son la posible disminución de la productividad que podría contrarrestar el beneficio en costos, y la cantidad de descarte generado en la trituración que podría no ser suficiente. En las condiciones actuales, si el mix de producción es inferior a 17,2% de CH1, el descarte generado en la trituración no es suficiente para producir toda la CH2. Esto se observa en el ejemplo ilustrativo de la Tabla 40.

CH1	CH2	Descarte (27%)	Filler (40%)	Mix (%CH1)
1.000	4.820	1.928	1.928	17,2%

Tabla 40. Mix de producción mínimo para que la producción total sea sostenible con materias primas propias, suponiendo una generación de 27% de descarte en la etapa de Trituración y una incorporación de 40% de filler en la CH2. Para el cálculo se utilizaron los factores de las matrices de conversión de cada producto (Tablas 5 y 6).

Incorporando una mayor cantidad de filler es posible llevar al límite de especificaciones a la CH2 en cuanto a densidad y % CaO útil. Esta acción impactaría en numerosos aspectos:

1. Productividades en etapas de Molienda e Hidratación, Clasificación y Molienda, y Embolsado: en consecuencia habría que recalcular la capacidad final de producción.
2. Utilización de mayor cantidad de descarte de trituración.
3. Disminución del tamaño de envase debido a una mayor densidad del producto CH2.
4. Mayor desgaste de equipos, ya que el filler es más abrasivo que la cal hidratada.
5. Posiblemente la imagen del producto se vea perjudicada ya que si bien seguiría estando dentro de especificación, el rendimiento en términos de volumen sería inferior.

En definitiva, los primeros cuatro factores modificarían el costo unitario total, y el último factor podría justificar un cambio en el precio.

Continuando con el análisis de esta alternativa, se busca determinar el porcentaje máximo de filler que se podría incorporar sin salir de especificación. Pruebas industriales realizadas con anterioridad muestran que el filler puro, en la granulometría necesaria para producción de CH2, tiene una densidad de 0,92 Kg/dm³. Suponiendo que la densidad de la CH2 tiene un comportamiento lineal respecto del contenido de filler a densidad constante, se determina que para lograr una densidad de 0,80 Kg/dm³ en la CH2, es necesario un 66% de filler.

	SOLUCIÓN PROPUESTA	Aumento de Productividad
---	--------------------	--------------------------

Esto impacta en la matriz de conversión del producto tal como se observa en la Tabla 41.

CH2	PV	PUH	CV	CH	CT	Bolsas
PV	100%	73%	48%	160%	160%	160%
PUH	137%	100%	66%	220%	220%	220%
CV	208%	152%	100%	333%	333%	333%
CH	62%	46%	30%	100%	100%	100%
CT	62%	46%	30%	100%	100%	100%
Bolsas	62%	46%	30%	100%	100%	100%

Tabla 41. Matriz de conversión de CH2 con 66% de filler. El factor PV→CT de 160% indica que para realizar este producto necesariamente debe haber una mayor cantidad de descarte que el que se genera en la trituración de piedra para este producto. En algún sentido se vuelve dependiente del descarte generado en la trituración de piedra para la CH1.

Sin embargo, el indicador de calidad química %CaO útil termina siendo de 12% cuando su mínimo es de 17%. Por lo cual, considerando la restricción del %CaO útil, se obtiene como resultado que es posible incorporar un 54% de filler y de esta forma se llega una densidad final de la CH2 de 0,75 Kg/m³. El mix de producción mínimo es de 38,4% como se verifica en la Tabla 42.

CH1	CH2	Mix (%CH1)	Densidad	CaO útil	Descarte (27%)	Filler	%filler
1.000	4.820	17,2%	0,70	22%	1.928	1.928	40%
1.000	1.007	49,8%	0,80	12%	665	665	66%
1.000	1.605	38,4%	0,75	17%	861	861	54%

Tabla 42. Mix de producción mínimo según el contenido de filler en la CH2 para poder producir con el descarte generado en la trituración. La tercera fila muestra el caso en el que se llevaría la CH2 al límite de sus especificaciones de producto.

La matriz de conversión definitiva de la CH2 se muestra en la Tabla 43. El descarte producido en la trituración de piedra para CH2 sólo cubre el 42,5% del material necesario para filler.

	SOLUCIÓN PROPUESTA	Aumento de Productividad
---	--------------------	--------------------------

CH2	PV	PUH	CV	CH	CT	Bolsas
PV	100%	73%	48%	119%	119%	119%
PUH	137%	100%	66%	162%	162%	162%
CV	208%	152%	100%	246%	246%	246%
CH	84%	62%	41%	100%	100%	100%
CT	84%	62%	41%	100%	100%	100%
Bolsas	84%	62%	41%	100%	100%	100%

Tabla 43. Matriz de conversión de CH2 con un 54% de filler.

El impacto en la productividad puede reducirse a la de la etapa de Molienda e Hidratación, y Clasificación y Molienda, puesto que el principio de funcionamiento de los sistemas de transporte (tornillos y elevadores) es volumétrico y la potencia de los mismos está sobrada para una mayor solicitud. Para estimar las nuevas productividades de estas etapas es preciso conocer cuáles son sus principios de funcionamiento y qué limita su capacidad de producción, y para esto es necesario abrir en detalle cada etapa, tal como se observa en las Tablas 44 y 46.

	SOLUCIÓN PROPUESTA	Aumento de Productividad
---	--------------------	--------------------------

Sub-etapa	Mate- rial	Acción	Equipo	Principio de funcionamiento	Poten- cia (Kw)	Capa- cidad	Uni- dad	Observaciones
Alimentación de molienda	CV	Descarga	Alimentador vibratorio x2	Desplaza volumen	2,2	60	m³/h	A máxima velocidad, y excéntricos regulados para máxima vibración
		Transporte	Cinta pesadora x2	Desplaza volumen	2,2	60	m³/h	A máxima velocidad, sin inclinación sobrecarga de 25° 60% de banda utilizada
	Filler	Descarga	Alimentador vibratorio	Desplaza volumen	2,2	60	m³/h	A máxima velocidad, y excéntricos regulados para máxima vibración
		Transporte	Cinta pesadora	Desplaza volumen	2,2	60	m³/h	A máxima velocidad, sin inclinación sobrecarga de 25° 60% de banda utilizada
Molienda	CV +filler	Proceso	Molinos de martillos 1	Impacto y abrasión	92	13,5	t/h	Carga y velocidad máximas
		Proceso	Molinos de martillos 2	Impacto y abrasión	92	13,5	t/h	Carga y velocidad máximas
		Descarga	Tornillo	Desplaza volumen	7,36	50	m³/h	A máxima velocidad Sin inclinación 40% grado de llenado
Alimentación de Hidratación	CV +filler	Transporte	Elevador de cangilones	Desplaza volumen	11,1	50	m³/h	A máxima velocidad 2/3 de llenado
		Transporte	Cinta pesadora	Desplaza volumen	5,5	70	m³/h	A máxima velocidad, sin inclinación Sobrecarga de 25° 60% de banda utilizada
	H2O	Transporte	Bomba 1	Desplaza volumen	2,2	6	m³/h	Alimenta tanque de agua
		Transporte	Bomba 2	Desplaza volumen	3,7	8	m³/h	Alimenta tanque de agua
		Regulación	Caudalímetro	Flujo	N/A	15	m³/h	Regula salida del tanque de agua
Hidratación	CV +H2O +filler	Proceso	Hidratador	Desplaza volumen	77,3	55	m³/h	A máxima capacidad, medido en caudal de salida
		Descarga	Tornillo	Desplaza volumen	11	80	m³/h	A máxima velocidad, sin inclinación 40% de grado de llenado

Tabla 44. Detalle de los equipos que intervienen en la Molienda e Hidratación, y sus capacidades.

	SOLUCIÓN PROPUESTA	Aumento de Productividad
---	--------------------	--------------------------

Sin entrar en detalles sobre cómo funciona un molino de martillos, alcanza con decir que a igual tamaño de alimentación e igual granulometría de salida, el aumentar la proporción de filler en la mezcla requerirá de más energía para trabajo de molienda. Esta energía puede darse en forma de mayor velocidad de giro de los martillos, hasta el punto en que la velocidad sea contraproducente por limitar la capacidad de ingreso del material, o en mayor consumo del equipo si venía trabajando subutilizado y requerir mayor potencia para soportar más carga.

La molienda de CV+filler para la CH2 actual se realiza con 57% CV y 43% filler (para lograr un 40% de filler en el producto terminado), dando un resultado de 26,3 t/h. Un 54% de filler en la CH2 significa 57% en la mezcla que alimenta los molinos de martillos. Si actualmente los molinos trabajan a máxima capacidad cuando se produce CH2, aumentar la proporción del material que más los exige hará que bajen su productividad.

Para estimar la capacidad de producción de los molinos para una mezcla de CV+filler 43%-57% (respectivamente), se toma el dato de productividad en 57%-43% y con 100% CV (situación que no se alcanza normalmente porque en el caso de la producción de CH1 el cuello de botella es el hidratador). En algunas ocasiones por cuestiones de mantenimiento se ha probado moler CV con un solo molino, dando por resultado una molienda de 18,6 t/h, es decir que entre los dos molinos producirían 37,2 t/h. Es de suponer entonces que la productividad de la mezcla estará dada por la suma ponderada por las proporciones, de las materias primas, tal como se expresa en la Tabla 45.

CV	Filler	Productividad (t/h)
57%	43%	26,3
100%	0%	37,2
0%	100%	11,9
43%	57%	22,8

Tabla 45. Productividad estimada de la molienda en molinos de martillos para una mezcla 43% CV + 57% filler.

Con una alimentación de 22,8 t/h, el resultado final del sector de Molienda e Hidratación para CH2 es de 23,9 t/h.

Para estimar el impacto en la productividad de la etapa de Separación y Molienda se procede a desglosar el circuito como se observa en la Tabla 46.

	SOLUCIÓN PROPUESTA	Aumento de Productividad
---	--------------------	--------------------------

Sub-etapa	Material	Acción	Equipo	Principio de funcionamiento	Potencia (Kw)	Capacidad	Unidad	Observaciones
Alimentación de Clasificación 1	CH2	Descarga	Conjunto (válvula celular x 2 + tornillo) x4	Desplaza volumen	8,2	60	m³/h	A máxima velocidad; 40% de grado de llenado (el tornillo)
		Transporte	Tornillo	Desplaza volumen	11,1	60	m³/h	A máxima velocidad, sin inclinación; 40% de grado de llenado
		Transporte	Elevador de cangilones	Desplaza volumen	14,8	60	m³/h	A máxima velocidad; 2/3 de llenado
		Transporte	Tornillo bidireccional	Desplaza volumen	5,5	50	m³/h	A máxima velocidad, sin inclinación; 40% de grado de llenado
Clasificación 1	CH2	Clasificación	Separador dinámico x 3	Gravimétrico	11	15	t/h	Máxima alimentación
	Finos de clasif. 1	Transporte	Tornillo	Desplaza volumen	5,5	40	m³/h	A máxima velocidad, sin inclinación; 40% de grado de llenado
	Rechazo de clasif. 1	Transporte	Tornillo	Desplaza volumen	7,5	50	m³/h	A máxima velocidad, sin inclinación; 40% de grado de llenado
Alimentación de Clasificación 2	Rechazo de clasif. 1 / CH2	Transporte	Elevador de cangilones	Desplaza volumen	14,8	90	m³/h	A máxima velocidad; 2/3 de llenado
		Transporte	Tornillo	Desplaza volumen	7,5	90	m³/h	A máxima velocidad, sin inclinación; 40% de grado de llenado
Clasificación 2	Rechazo de clasif. 1 / CH2	Clasificación	Separador dinámico 4	Gravimétrico	14,8	20	t/h	Máxima alimentación
	Finos de clasif. 2	Transporte	Tornillo	Desplaza volumen	7,5	50	m³/h	A máxima velocidad, sin inclinación; 40% de grado de llenado
	Rechazo de clasif. 2	Transporte	Tornillo	Desplaza volumen	7,5	50	m³/h	A máxima velocidad, sin inclinación; 40% de grado de llenado
Alimentación de Clasificación 3	Rechazo de clasif. 2 / CH2 + rechazo de clasif. 3 molido	Transporte	Elevador de cangilones	Desplaza volumen	14,8	90	m³/h	A máxima velocidad; 2/3 de llenado
		Transporte	Tornillo	Desplaza volumen	5,6	80	m³/h	A máxima velocidad, sin inclinación; 40% de grado de llenado
Clasificación 3	Rechazo de clasif. 2 / CH2 + rechazo de	Clasificación	Separador dinámico 5	Gravimétrico	88,8	125	t/h	Máxima alimentación

	SOLUCIÓN PROPUESTA	Aumento de Productividad
---	--------------------	--------------------------

	clasif. 3 molido							
	Finos de clasif. 3	Transporte	Tornillo	Desplaza volumen	7,5	90	m ³ /h	A máxima velocidad, sin inclinación; 40% de grado de llenado
	Rechazo de clasif. 3	Transporte	Tornillo	Desplaza volumen	7,5	90	m ³ /h	A máxima velocidad, sin inclinación; 40% de grado de llenado
Molienda	Rechazo de clasif. 3	Transporte	Tornillo	Desplaza volumen	9,2	100	m ³ /h	A máxima velocidad, sin inclinación; 40% de grado de llenado
		Proceso	Molino de bolas	Impacto y abrasión	255	28,2	t/h	Máxima alimentación en régimen; aspirado.
	Rechazo de clasif. 3 molido	Transporte	Tornillo	Desplaza volumen	7,5	90	m ³ /h	A máxima velocidad, sin inclinación; 40% de grado de llenado
	Rechazo de clasif. 3 molido	Clasificación	Filtro de mangas	Gravimétrico	22,2	15	t/h	Barrido a 2 m/s; vibradores a máxima capacidad
	Finos de filtro de mangas	Transporte	Tornillo	Desplaza volumen	2,2	30	m ³ /h	A máxima velocidad, sin inclinación; 40% de grado de llenado

Tabla 46. Detalle de los equipos que intervienen en la Clasificación y Molienda, y sus capacidades.

	SOLUCIÓN PROPUESTA	Aumento de Productividad
---	--------------------	--------------------------

Estimar el impacto de aumentar el contenido de filler en la CH2 para el caso de la Clasificación y Molienda amerita un análisis más complejo que en la etapa de Molienda e Hidratación, ya que esta etapa cuenta con un circuito cerrado de molienda cuya capacidad de producción no puede calcularse directamente a partir de las capacidades individuales.

Esquemáticamente este circuito cerrado funciona tal como se muestra en la Ilustración 20. A efectos de simplificar el análisis se estudia la capacidad del circuito cerrado (aspirado), y luego se verificará si es necesario considerar la capacidad de la Clasificación 1. La Clasificación 2 también se encuentra dentro del circuito cerrado pero sólo se activa cuando se realiza mantenimiento a la Clasificación 3 (se utiliza el Separador 4 en lugar del Separador 5, aunque en este escenario el Separador 4 no alcanza a producir lo suficiente y se debe disminuir la alimentación para no saturar al molino).

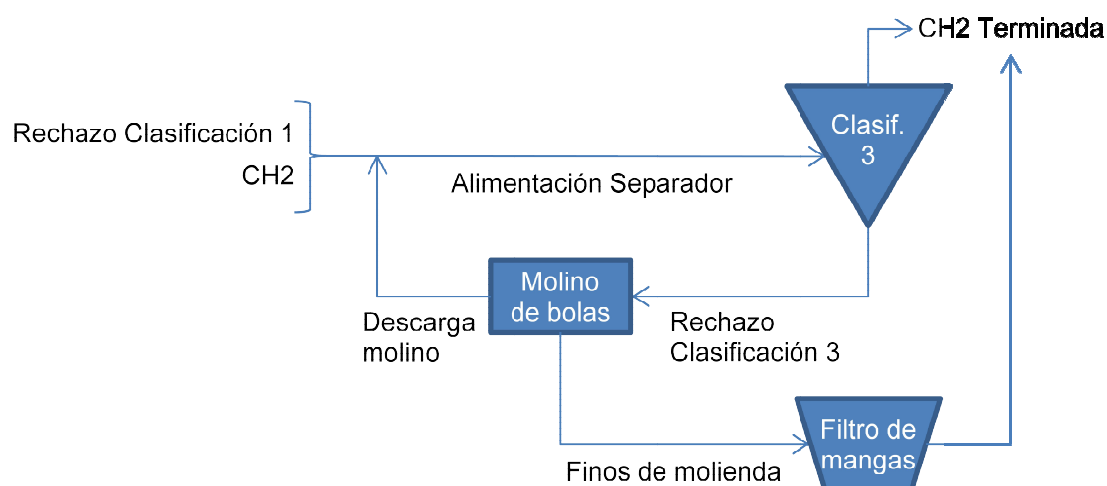


Ilustración 20. Circuito cerrado de Clasificación y Molienda. Sólo se muestra la parte del circuito donde hay una recirculación del material.

En la Ilustración 21 se puede observar el balance de caudales máscos actuales del circuito cerrado de molienda para la producción de CH2. Se observa que en estado de régimen la alimentación y la producción final son equivalentes; lo único que ocurre es una disminución del tamaño medio de partícula hasta llegar a valores de especificación.

	SOLUCIÓN PROPUESTA	Aumento de Productividad
---	--------------------	--------------------------

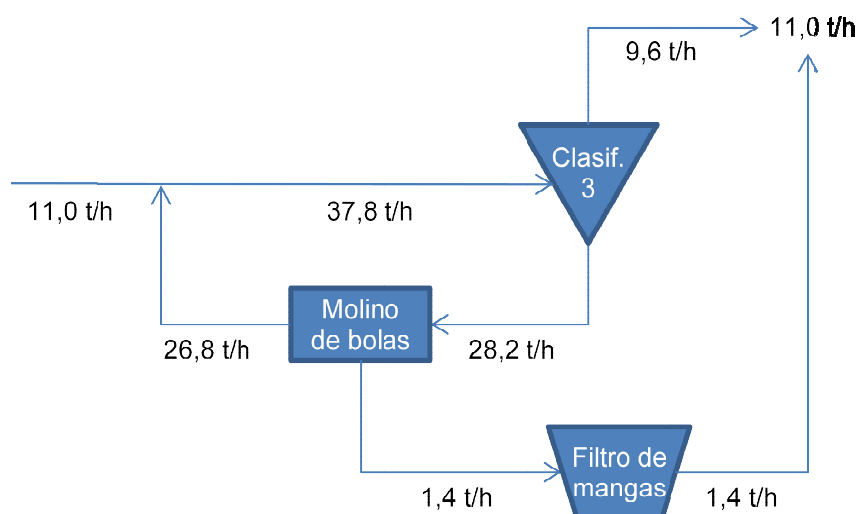


Ilustración 21. Productividad del circuito cerrado de Molienda y Clasificación. Se observa que la Clasificación 3 (separador dinámico N° 5) está subalimentada respecto de su capacidad máxima de 125 t/h (Tabla 46).

Tal como se muestra en la Tabla 7, la productividad efectiva de la etapa completa es de 17,4 t/h, mientras que los valores de la Ilustración 21 son inferiores (11,0 t/h). Esto se debe a que luego de la primera clasificación, 6,4 t/h son enviadas a producto terminado sin necesidad de molienda y sólo restan 11,0 t/h por moler (Ilustración 22). Como se ve en la Tabla 46 la capacidad de la clasificación dentro de este circuito cerrado es de 125 t/h efectivas, cuando en la práctica el separador es alimentado en promedio con 37,8 t/h. Es de suponer que un aumento en la proporción de filler no afectará la capacidad de clasificación pero sí la de molienda, ya que la mayor parte del filler ingresa al circuito cerrado de molienda y clasificación y esto hará que aumente la alimentación y en definitiva la carga circulante.

	SOLUCIÓN PROPUESTA	Aumento de Productividad
---	--------------------	--------------------------

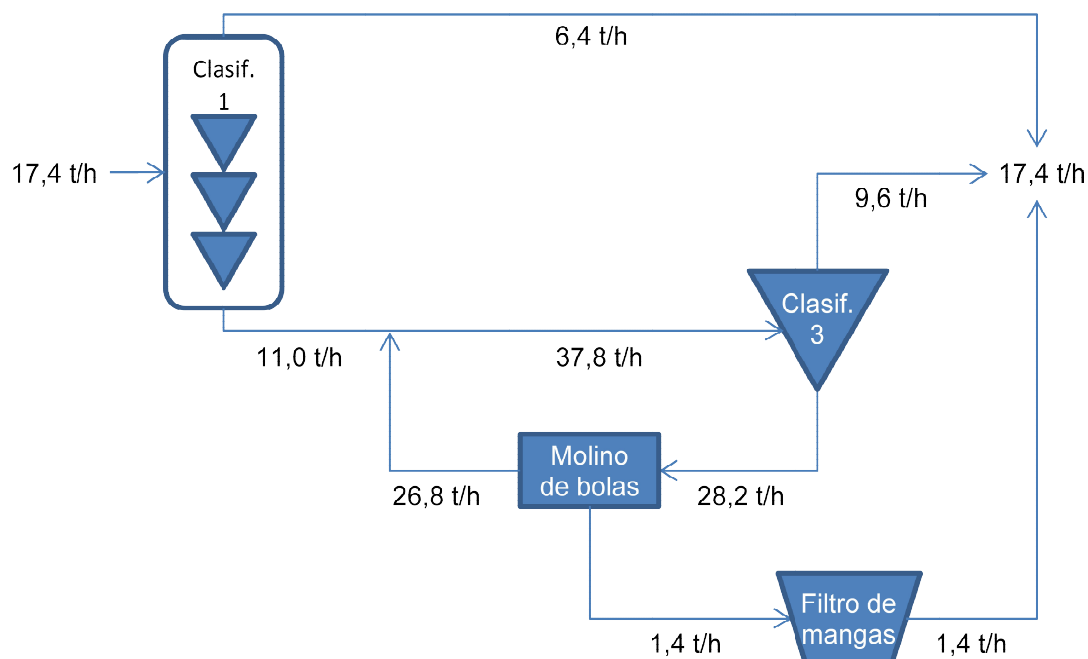


Ilustración 22. Balance de caudales másicos del circuito completo de Clasificación y Molienda produciendo CH2.

Para estimar la capacidad del circuito cerrado con la nueva CH2 es necesario analizar la composición de la alimentación actual del circuito, que ya se encuentra moliendo a máxima capacidad (esto se verifica con un oído electrónico que determina indirectamente el grado de llenado) y estimar cuál debiera ser la nueva alimentación total de esta etapa para saturar al molino.

Para que se entienda la importancia de analizarlo desde la granulometría y composición química, basta con explicar cómo afectaría al circuito que las 11,0 t/h que ingresan fueran un poco más gruesas o en lugar de ser cal hidratada pura fueran filler puro.

En cuanto a la granulometría, cuanto más grueso sea el material de ingreso, más grueso será el de salida, y por lo tanto habrá mayor cantidad de rechazo en la clasificación cuando la descarga del molino se enfrente al separador.

En cuanto a la composición química, tal como se explicara en el apartado 1.1.1.2.1. el índice de Bond o de molidurabilidad de un material señala la cantidad de trabajo necesario para reducir la partícula de un tamaño normalizado a otro. El índice de Bond de la piedra caliza (filler) es mayor que el de la cal hidratada o cal viva para el caso en que se encontrara producto sin hidratar, no así para el caso del C_2S para el cual se puede suponer un índice de Bond de $13,49 \text{ kWh/t}^{\text{xiv}}$ frente a $10,18 \text{ kWh/t}$ para la piedra caliza. Para

^{xiv} El índice de trabajo de Bond indica el trabajo medido en kWh, que hay que aplicar para reducir 907 kg (1 TC = tonelada corta) desde un tamaño teóricamente ilimitado hasta lograr un 80% de material pasante en malla $100 \mu\text{m}$ en sistemas abiertos de molienda de bolas.
Duda, Walter H. 1977. Manual Tecnológico del Cemento 3. 340 páginas. Editorial Reverté S.A. ISBN 84-7146-095-5

	SOLUCIÓN PROPUESTA	Aumento de Productividad
---	--------------------	--------------------------

determinar el impacto del cambio en la composición química en la molienda habrá que determinar la composición del material que efectivamente llega a esta etapa del proceso.

Por el lado de la nueva composición química, se detallan las especies que compondrían la CH2 en el Gráfico 17.

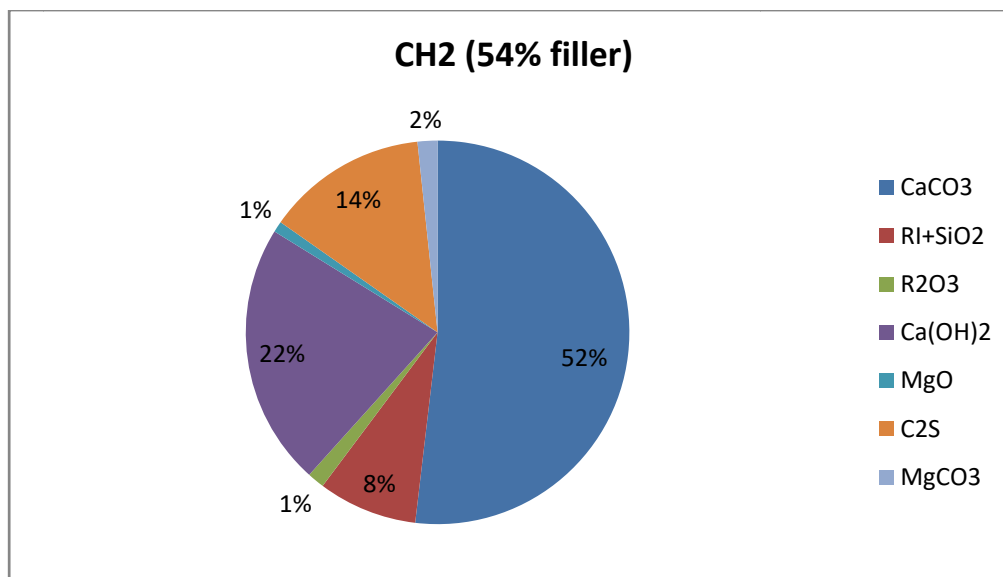


Gráfico 16. Composición química de la CH2 con 54% de filler. Comparándola con la CH2 del Gráfico 7, se observa un incremento en el contenido de CaCO₃, MgCO₃ y RI+SiO₂ gracias a los aportes de la piedra caliza en detrimento de la cal hidratada.

Los análisis químicos en cada punto del proceso permiten identificar las especies presentes y así realizar un balance de caudales másicos por especie. En primer lugar lo más sencillo es discriminar el filler del resto del material, tal como se observa en la Ilustración 23.

	SOLUCIÓN PROPUESTA	Aumento de Productividad
---	--------------------	--------------------------

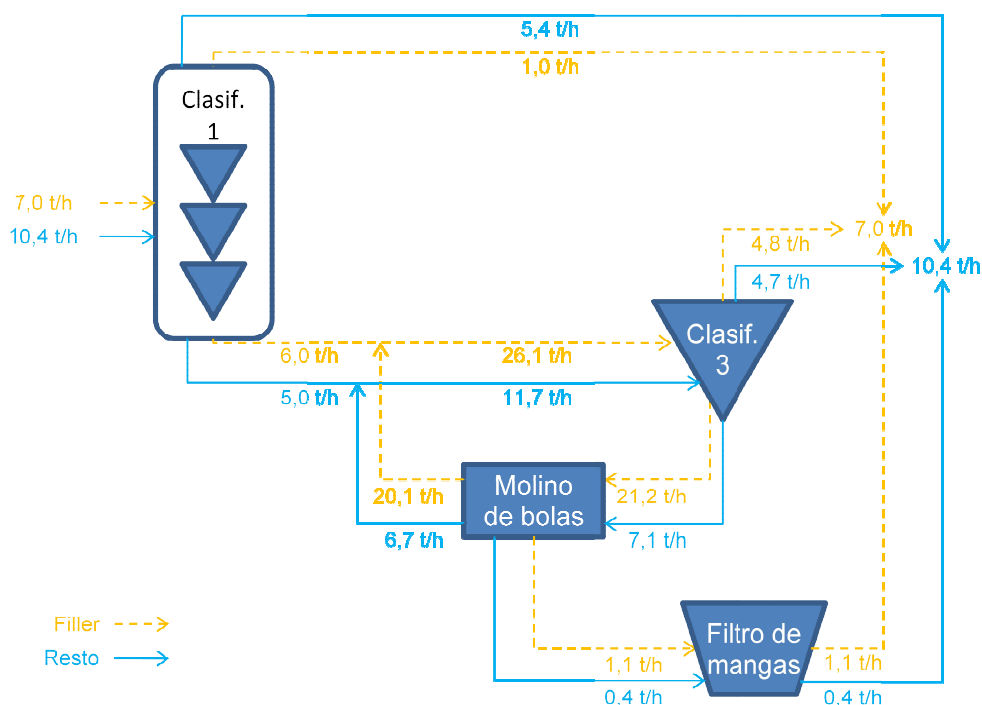


Ilustración 23. Caudal másico de filler en la etapa de Molienda y Clasificación. No es posible referirse al material complementario como CH2 (excepto al inicio y al final del proceso) ya que una vez atravesada la primera clasificación el material se separa por granulometría y peso específico, es decir que las proporciones de cada especie varían en distintos puntos de esta etapa.

Con esta apertura del caudal másico se puede ver una elevada recirculación de filler, ya que ingresan 6,0 t/h al circuito cerrado pero se suman a 20,1 t/h que provienen de la descarga del molino. Esto significa que material debe dar en promedio más de 3 vueltas para lograr entrar en el tamaño de seteo del separador o del filtro de mangas, y salir del circuito como producto terminado.

En la Ilustración 24 se hace una segunda apertura, más detallada, de las especies que circulan por esta etapa, discriminando el Ca(OH)_2 , y el C_2S del resto del material. Se verifica que el Ca(OH)_2 es captado en su mayoría por la Clasificación 1, y por contrapartida el C_2S es rechazado por la Clasificación 1 y derivado al circuito cerrado de molienda. Esto es coherente con el bajo peso específico del Ca(OH)_2 y a su vez con la pulverización natural ocurrida en el proceso de hidratación, mientras que el C_2S es inerte en la hidratación y tiene un peso específico mayor.

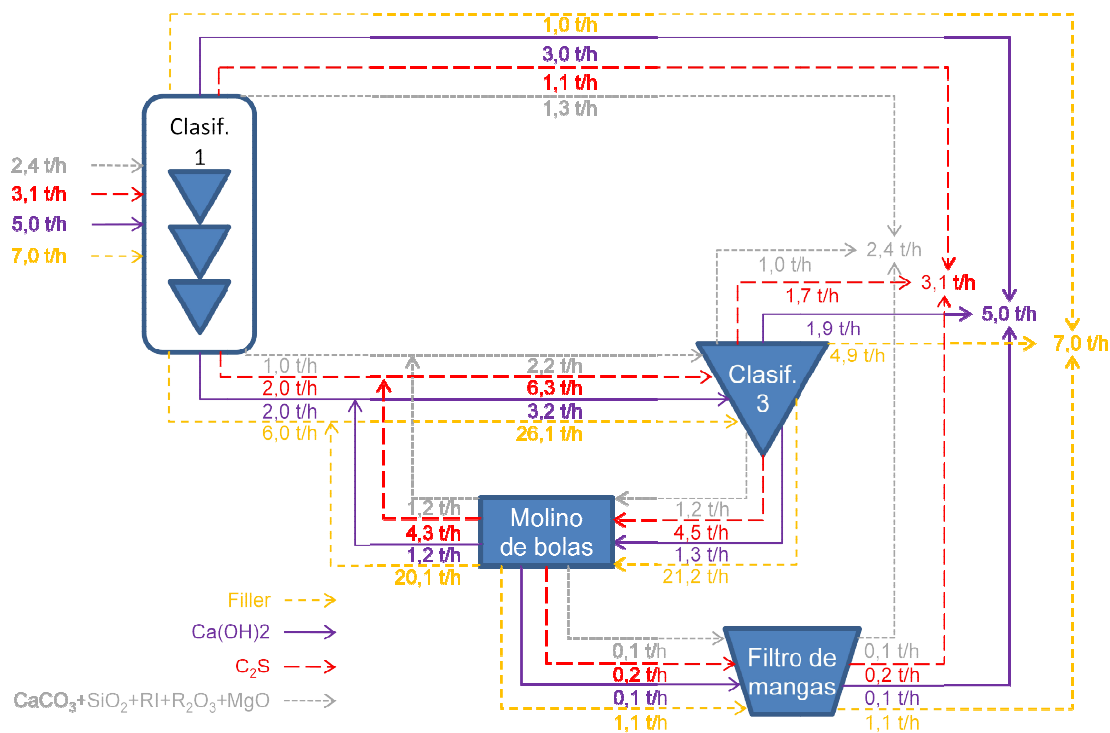


Ilustración 24. Caudales másicos en el circuito de Clasificación y Molienda, discriminando el filler, el $\text{Ca}(\text{OH})_2$, el C_2S y la suma de los restantes compuestos que conforman la CH2.

Para estimar el impacto de aumentar la proporción de filler en el circuito cerrado, se calcula cuántas vueltas debe dar cada especie dentro del circuito para salir más fino que el valor seteado (ya sea por el separador o por el filtro de mangas). En la Tabla 47 se exhiben los factores de carga circulante para los cuatros caudales másicos discriminados en la Ilustración 24.

Material	Ingreso a circuito cerrado	Ingreso a molino de bolas	Factor de carga circulante
Filler	6,0	21,2	3,5
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	2,0	1,3	0,6
C_2S	2,0	4,5	2,3
$\text{CaCO}_3 + \text{RI} + \text{SiO}_2 + \text{R}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$	1,0	1,2	1,2

Tabla 47. Factores de carga circulante en circuito cerrado de clasificación y molienda. Se observa que cada tonelada de filler que ingresa al circuito debe pasar en promedio 3,5 veces por el molino de bolas, mientras que el C_2S (que tiene mayor índice de Bond) sólo requiere de 2,3. Esto puede deberse a la granulometría con la que llega cada uno al circuito.

Lo que esto significa es que el material que más está exigiendo al molino es el filler, aún más que el C_2S . Por lo cual un aumento en su proporción (sin ningún cambio en su granulometría de ingreso) reducirá la capacidad total de la etapa de Clasificación y Molienda. Es posible encontrar una equivalencia entre materiales, suponiendo que no hay interacción entre los mismos dentro del

	SOLUCIÓN PROPUESTA	Aumento de Productividad
---	--------------------	--------------------------

molino, o mejor dicho, que la interacción entre los mismos no cambia demasiado al cambiar las proporciones.

A través de las cargas circulantes se determinan las equivalencias de la Tabla 48 y estima una capacidad total de molienda de filler equivalente según las Ecuaciones 6, 7 y 8 de caudales másicos, donde se plantea el caudal másico del rechazo de la Clasificación 1 como la suma de los caudales másicos de sus componentes.

Material	Ingreso a circuito cerrado	Ingreso a molino de bolas	Factor de carga circulante	tf equivalentes
Filler	6,0	21,2	3,5	1,00
Ca(OH) ₂	2,0	1,3	0,6	0,18
C ₂ S	2,0	4,5	2,3	0,65
CaCO ₃ +RI+SiO ₂ +R ₂ O ₃ +MgO	1,0	1,2	1,2	0,34

Tabla 48. Equivalencias entre moler una tonelada de cada material que circulan por el proceso en términos de toneladas de filler. Por ejemplo, moler una tonelada de C₂S en las condiciones de molienda actuales, equivale a moler 0,65 toneladas de filler.

$$\dot{m}_{Rechazo\ C1} = \dot{m}_{Filler} + \dot{m}_{Ca(OH)_2} + \dot{m}_{C_2S} + \dot{m}_{Resto} \quad (6)$$

$$\dot{m}_{FillerEq} = \dot{m}_{Filler} + 0,18 \dot{m}_{Ca(OH)_2} + 0,65 \dot{m}_{C_2S} + 0,34 \dot{m}_{Resto} \quad (7)$$

$$\dot{m}_{FillerEq} = 8,0\ t/h \quad (8)$$

La Ecuación 8 logra establecer la capacidad de molienda del circuito cerrado en términos de filler equivalente. Produciendo la CH2 con 40% de filler ingresan al circuito cerrado 11,0 t/h de material, sin embargo esa cantidad sólo equivale a 8,0 t/h de filler.

Establecidas las equivalencias es posible estimar la nueva capacidad del circuito de Clasificación y Molienda. Tal como se muestra en la Ilustración 25, la Clasificación 1 envía a producto terminado un 14% del filler, 60% del Ca(OH)₂, 36% del C₂S y 56% de la sumatoria del resto de las especies presentes. Estos valores no debieran alterarse demasiado por aumentar la proporción de filler en la CH2, ya que el principio de funcionamiento de los separadores se basa en el peso específico y la granulometría. Es posible que la eficiencia en la separación se vea afectada, pero a efectos de una estimación, es suficiente con suponer que estos valores se mantendrán.

Es decir que el resto del material ingresará al circuito cerrado de molienda, donde es posible llevar todo a toneladas de filler equivalentes. Independientemente del valor total de la alimentación, se determina entonces que el 69% del producto total es procesado por el circuito cerrado de molienda como se muestra en la Tabla 49, en distintas proporciones de cada una de las especies presentes.

	SOLUCIÓN PROPUESTA	Aumento de Productividad
---	--------------------	--------------------------

CH2	Composición	Finos Clasif. 1	Rechazo Clasif. 1
Filler	54%	7%	46%
Ca(OH) ₂	22%	13%	9%
C ₂ S	14%	5%	9%
CaCO ₃ +RI+SiO ₂ +R ₂ O ₃ +MgO	11%	6%	5%
Total	100%	31%	69%

Tabla 49. Proporción del material que será clasificado en la Clasificación 1 con la CH2 con 54% de filler. (Los valores de composición están redondeados).

Aplicando nuevamente las Ecuaciones 6 y 7:

$$\begin{aligned}\dot{m}_{Rechazo\ C1} &= \dot{m}_{Filler} + \dot{m}_{Ca(OH)_2} + \dot{m}_{C_2S} + \dot{m}_{Resto} \\ \dot{m}_{Rechazo\ C1} &= 46\% \dot{m}_{CH2} + 9\% \dot{m}_{CH2} + 9\% \dot{m}_{CH2} + 5\% \dot{m}_{CH2}\end{aligned}\quad (6)$$

$$\begin{aligned}\dot{m}_{FillerEq} &= \dot{m}_{Filler} + 0,18 \dot{m}_{Ca(OH)_2} + 0,65 \dot{m}_{C_2S} + 0,34 \dot{m}_{Resto} \\ \dot{m}_{FillerEq} &= 46\% \dot{m}_{CH2} + 0,18 \cdot 9\% \dot{m}_{CH2} + 0,65 \cdot 9\% \dot{m}_{CH2} + 0,34 \cdot 5\% \dot{m}_{CH2}\end{aligned}\quad (7)$$

Finalmente:

$$\dot{m}_{FillerEq} = 55\% \dot{m}_{CH2}$$

, y si la capacidad de molienda de filler equivalente es de 8,7 t/h porque es el caudal másico que satura el circuito,

$$\dot{m}_{CH2} = \frac{\dot{m}_{FillerEq}}{55\%} = \frac{8,0\ t/h}{55\%} = 14,5\ t/h$$

Por lo tanto la capacidad de la etapa de Clasificación y Molienda con una CH2 con 54% de filler disminuye de 17,4 t/h a 14,5 t/h. La estimación de caudales másicos para este producto se muestra en la Ilustración 25.

	SOLUCIÓN PROPUESTA	Aumento de Productividad
---	--------------------	--------------------------

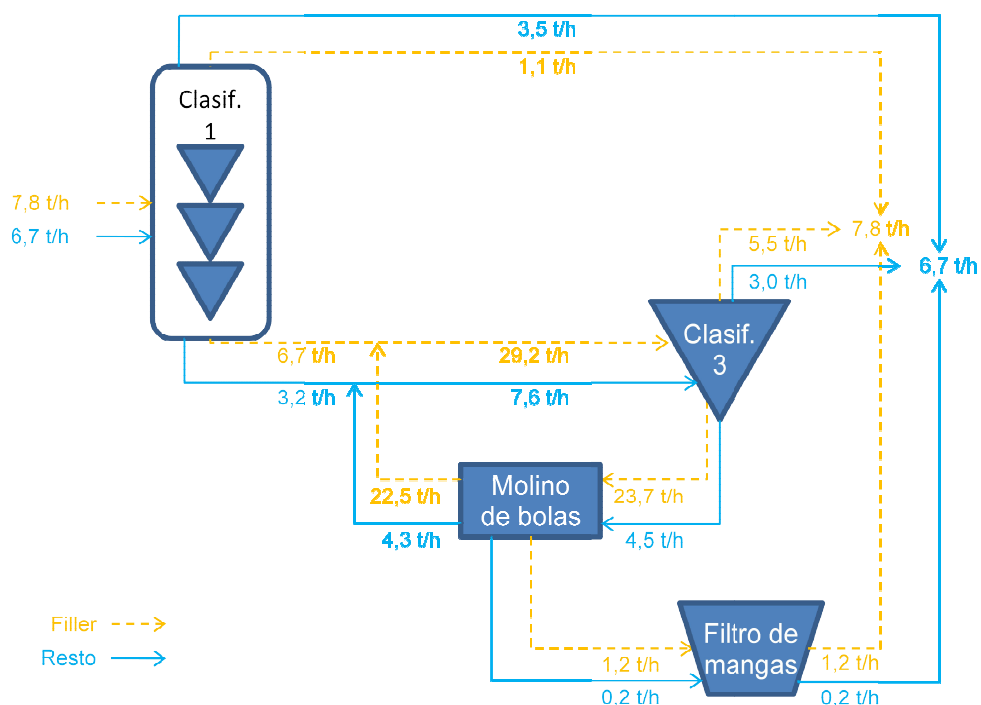


Ilustración 25. Caudales másicos para la CH2 con 54% de filler. Se observa un aumento en la cantidad de filler que ingresa al circuito cerrado y un aumento global del caudal másico del filler (de 7,0 t/h a 7,8 t/h).

Se puede apreciar una apertura mayor, por especie, en la Ilustración 26.

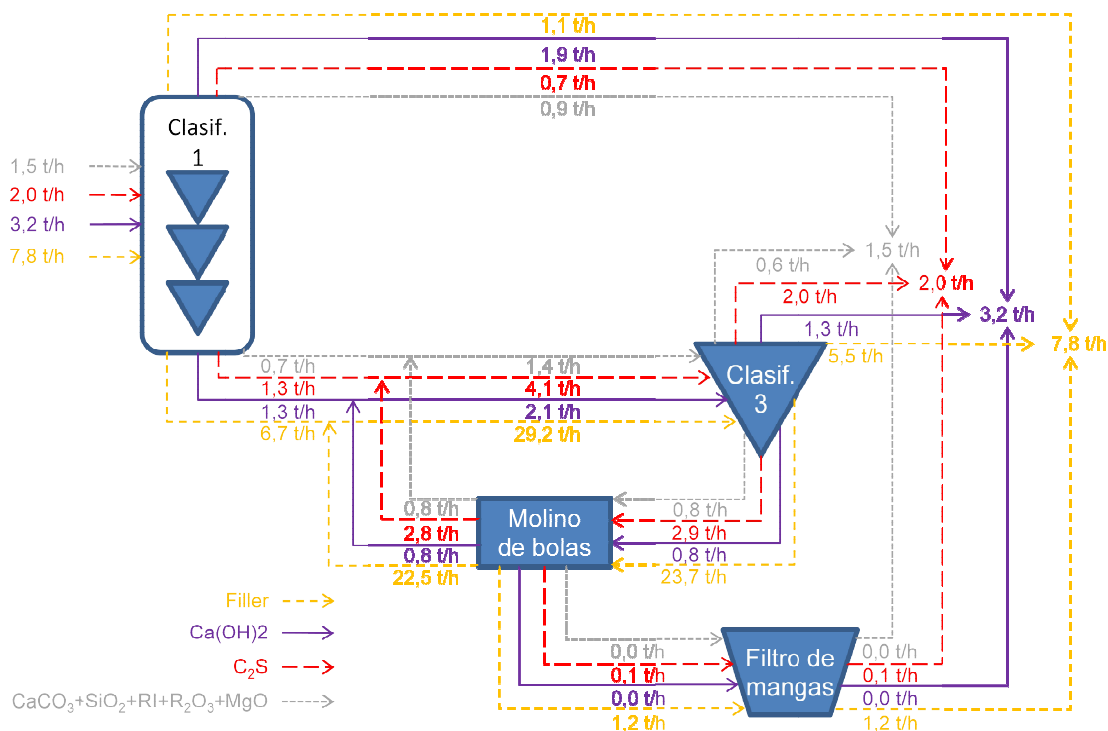


Ilustración 26. Caudales másicos para la CH2 con 54% de filler, discriminados por especie. Se observa una disminución en la cantidad de C_2S recirculando.

	SOLUCIÓN PROPUESTA	Aumento de Productividad
---	--------------------	--------------------------

Para asegurar si este resultado es viable queda por comprobar que la granulometría resultante no aumente al punto de salir de especificación. Para hacer este análisis es importante entender cómo se comportan actualmente los distintos materiales dentro de esta etapa, abiertos por granulometría. Es decir, en primer lugar se analizará la situación actual y a partir de ella se inferirá el resultado ante un cambio en la proporción de filler.

Se definen tres categorías de clasificación de acuerdo con las especificaciones de producto (que son las que se utilizan para estudiar el funcionamiento de los separadores y el circuito de molienda en su conjunto):

1. Retenido #100: es el porcentaje del material que no atraviesa una malla de 149 μm .
2. Retenido #200: es el porcentaje del material total que no atraviesa una malla de 74 μm , descontando el material retenido #100.
3. Pasante #200: es el porcentaje del material total que atraviesa la malla de 74 μm .

Para el caso del Separador 5 (Clasificación 3), la apertura del balance de caudal másico por granulometría es la que se muestran en las Tablas 50 y 51 donde se utilizan colores para cada uno a efectos de corresponderse con las ilustraciones.

Separador 5	Ingreso	Rechazo	Cal Terminada
Caudal (t/h)	100,0%	74,6%	25,4%
Ret #100	57,6%	76,6%	1,8%
Ret #200	11,3%	12,4%	8,1%
Pas #200	31,1%	11,0%	90,1%

Tabla 50. Apertura porcentual de caudales másicos en el ingreso y las salidas del Separador 5.

Separador 5	Ingreso	Rechazo	Cal Terminada
Caudal (t/h)	37,8	28,2	9,6
Ret #100	21,8	21,6	0,2
Ret #200	4,3	3,5	0,8
Pas #200	11,8	3,1	8,7

Tabla 51. Apertura en t/h de caudales másicos en el ingreso y salidas del Separador 5.

Se observa que la clasificación no es perfecta ya que de las 11,8 t/h de material pasante #200, 3,1 t/h vuelven a ingresar a la molienda. A esto se denomina eficiencia en la separación y depende del tipo de separador (estático, dinámico de 1°, 2° o 3° generación), de la regulación o seteo (caudal o velocidad del aire

ITBA	SOLUCIÓN PROPUESTA	Aumento de Productividad
-------------	---------------------------	---------------------------------

en los de primera generación), de la homogeneidad en la alimentación del equipo y por supuesto de su condición de mantenimiento.

Un estudio de la molienda permite determinar el desempeño del molino de bolas, dando por resultado el que se exhibe en la Tabla 52.

Molino de bolas	Ingreso	Filtro de mangas	Descarga
Caudal (t/h)	28,2	1,4	26,8
Ret #100	21,6	0,0	15,4
Ret #200	3,5	0,2	3,0
Pas #200	3,1	1,2	8,3

Tabla 52. Resultado granulométrico de la molienda del Molino de Bolas. Las productividades de Descarga y Filtro de Mangas deben sumarse para cerrar el balance de caudales másicos.

Con la misma lógica es posible determinar el resto de los caudales, tal como se muestra en la Ilustración 27 y su correspondiente Tabla 53.

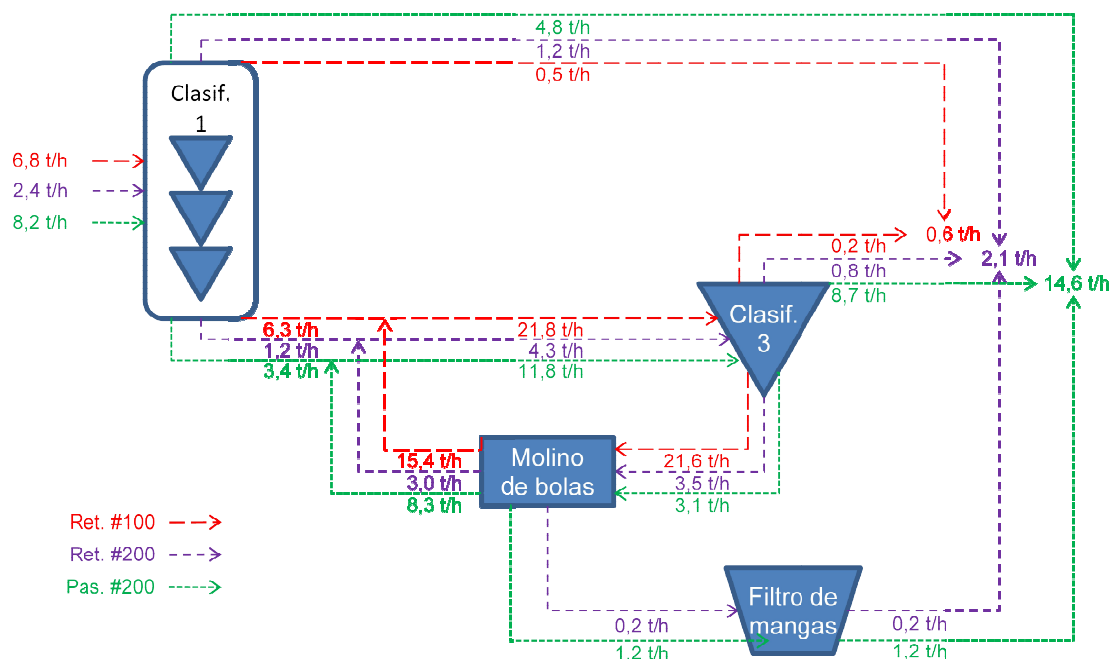


Ilustración 27. Balance de caudales másicos por granulometría para la CH2 en la etapa de Clasificación y Molienda.

Clasificación y Molienda	Clasificación 1			Cal Terminada			
	Ingreso	Finos	Rechazo	Clasif. 1	Clasif. 3	Filtro de Mangas	Total
Caudal (t/h)	17,4	6,4	11,0	6,4	9,6	1,4	17,4
Ret #100	6,8	0,5	6,3	0,5	0,2	0,0	0,6
Ret #200	2,4	1,2	1,2	1,2	0,8	0,2	2,1
Pas #200	8,2	4,8	3,4	4,8	8,7	1,2	14,6

Tabla 53. Detalle de caudales por granulometría en la etapa de Clasificación y Molienda de CH2. Se corresponde con la Ilustración 25.

Para poder entender el comportamiento de cada especie es necesario determinar los caudales másicos de la combinatoria de especies y fracciones granulométrías. Realizando análisis químicos a cada fracción en cada punto, se determina el comportamiento del filler en el circuito de Separación y Molienda, tal como se observa en la Ilustración 28.

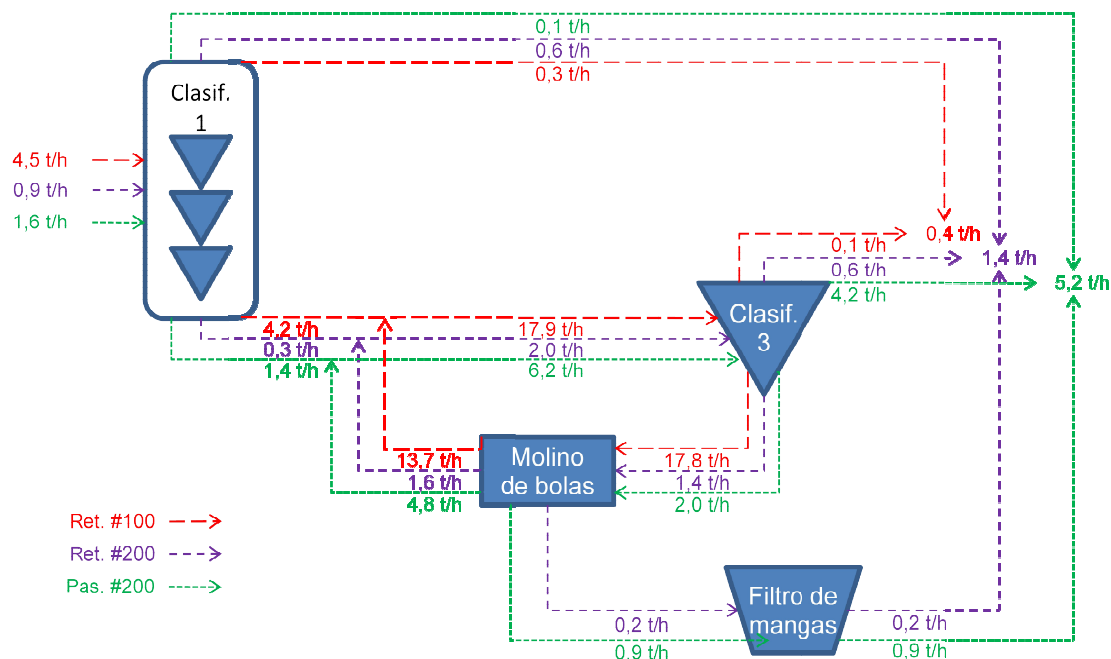


Ilustración 28. Caudales másicos del filler en la CH2 con 40% de filler, abierto por granulometría.

	SOLUCIÓN PROPUESTA	Aumento de Productividad
---	--------------------	--------------------------

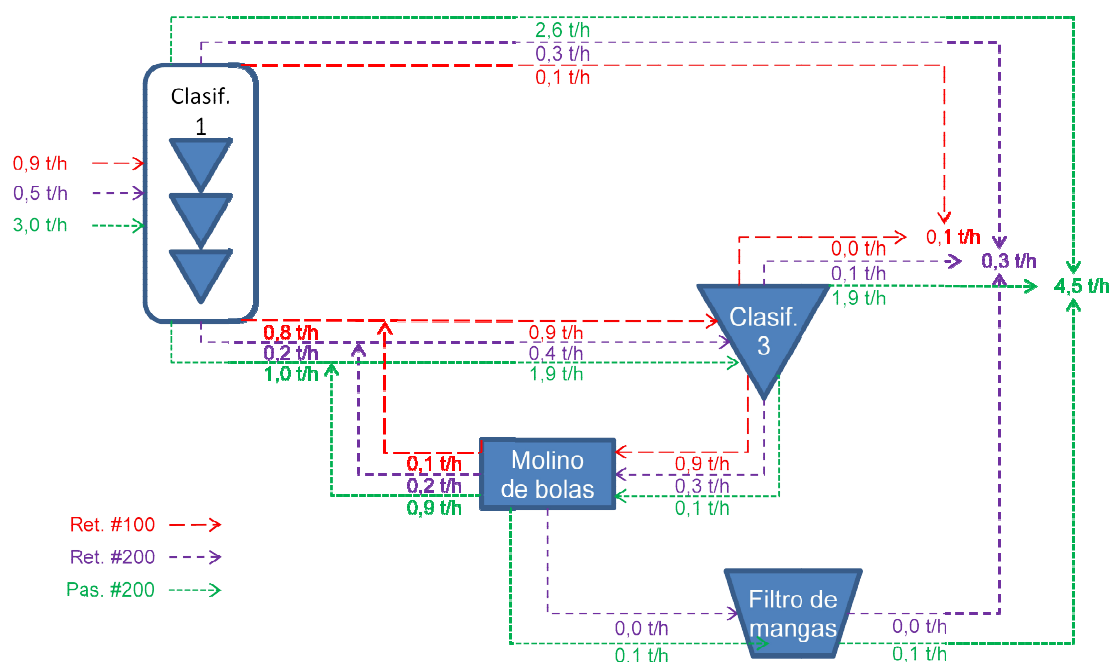


Ilustración 29. Caudales máxicos del Ca(OH)_2 en la CH2 con 40% de filler, abierto por granulometría.

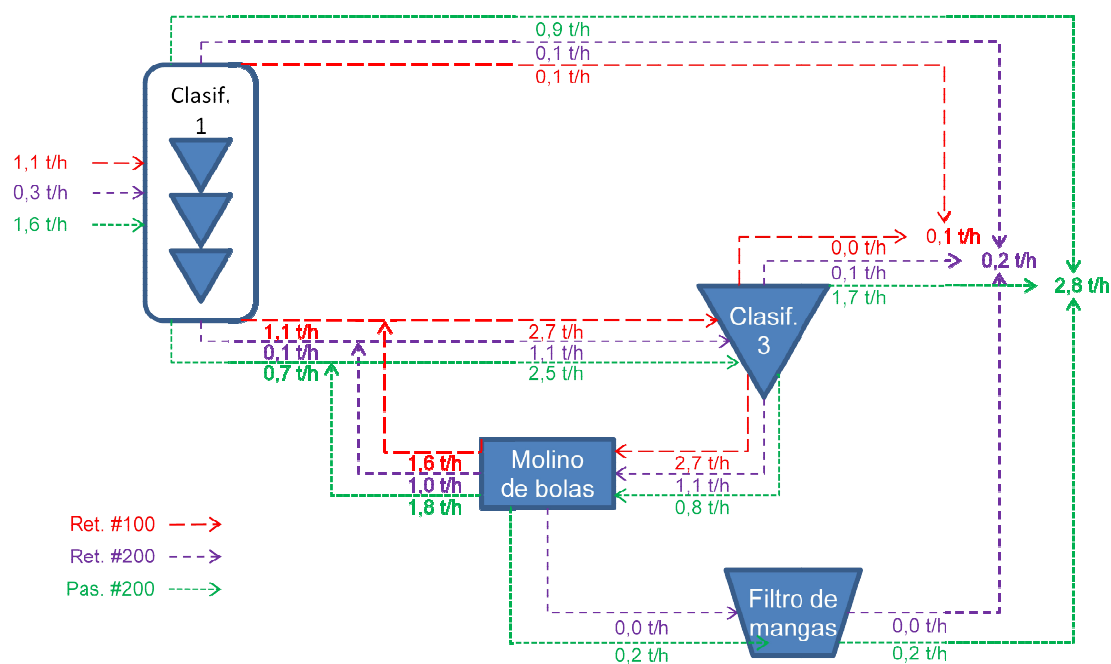


Ilustración 30. Caudales máxicos del C_2S en la CH2 con 40% de filler, abierto por granulometría.

	SOLUCIÓN PROPUESTA	Aumento de Productividad
---	--------------------	--------------------------

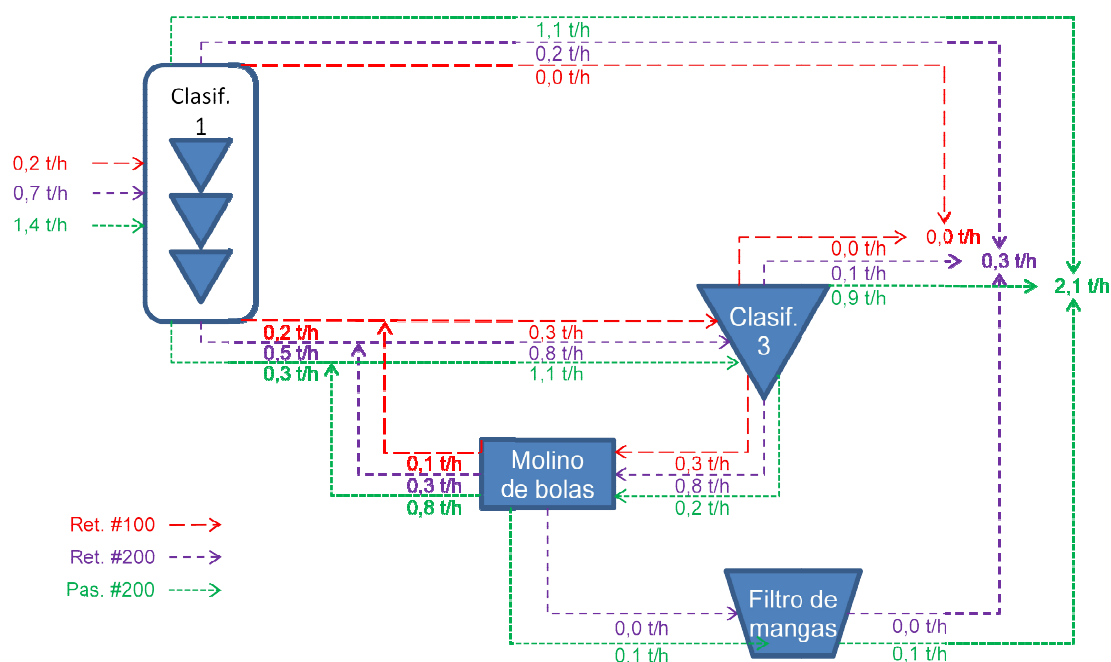


Ilustración 31. Caudales máxicos del resto de los materiales (CaCO_3 , $\text{RI}+\text{SiO}_2$, MgO , R_2O_3) que circulan en el circuito de Molienda de CH2 con 40% de filler, abierto por granulometría.

Conociendo ahora cómo es que el circuito procesa a cada especie presente, es posible estimar los resultados en granulometría si se cambian las cantidades de cada uno, tal como se muestra en la Ilustración 32.

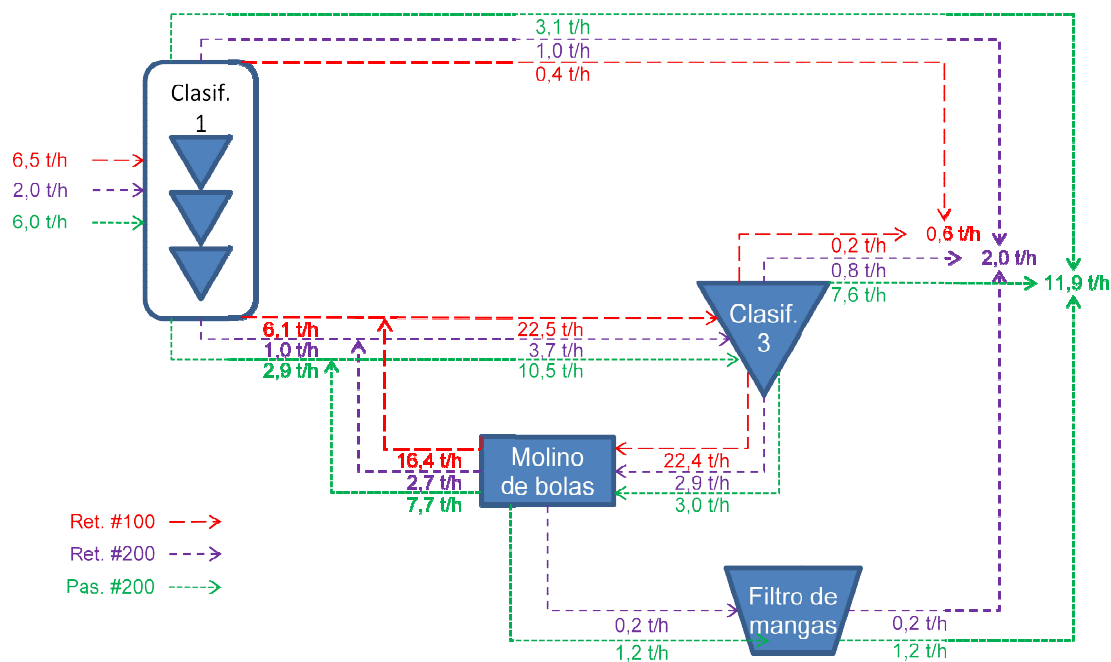


Ilustración 32. Caudales máxicos por granulometría para la CH2 con 54% de filler. Se observan resultados similares en las granulometrías más gruesas, no así en el material pasante en tamiz #200.

	SOLUCIÓN PROPUESTA	Aumento de Productividad
---	--------------------	--------------------------

Los resultados obtenidos muestran que el material retenido en tamiz #100 equivale a un 4,1% del total, y el retenido en tamiz #200 equivale a 13,9%.

Resumiendo el análisis realizado, se han estimado las especificaciones que tendría la CH2 si se le incorporara un 54% de filler. En la Tabla 54 se comparan los resultados de la CH2 actual con la propuesta y en segundo lugar con las especificaciones del producto para verificar que todavía se encuentre dentro de especificación.

CH2	Actual	Propuesta	Límite
% Filler	40%	54%	NE
Densidad (Kg/dm ³)	0,70	0,75	<0,80
% CaO útil	22%	17%	>17%
Ret #100	3,6%	4,1%	<7%
Ret #200	12%	14%	<20%
PPC1000	19%	24%	<26%
Productividad Hidratación	28,32	22,8	NA
Productividad Molienda	17,38	14,5	NA

Tabla 54. Especificaciones y productividades actuales, estimadas y de especificación para la CH2. Para la CH2 propuesta se observa una disminución significativa en las productividades y un acercamiento a los límites de especificación.

La capacidad final de producción para CH1 no sufre modificaciones en este caso pero la capacidad de producción de CH2 se reduce en un 17%. El balance de línea correspondiente se detalla en la Tabla 55.

CH2	Capacidad			MP	MP	Prod.
	t/h ef	h/sem ef	t/sem	necesaria t/sem	disponible t/sem	Posible t/sem
Trituración	69,5	36,7	2.554	3.498	N/A	2.554
Calcinación	13,4	124,7	1.671	2.532	2.554	1.671
Molienda e Hidratación	22,8	77,5	1.762	716	1.671	1.762
Clasificación y Molienda	14,5	111,3	1.614	1.614	1.762	1.614
Embolsado	32,3	76,4	2.470	2.470	1.614	1.614

Tabla 55. Capacidad final de producción de CH2 con 54% de filler. Se observa el cuello de botella en la etapa de Clasificación y Molienda. Esta alternativa disminuye la capacidad total de producción de la fábrica.

En definitiva un aumento en la proporción de filler tiene sus ventajas:

- Mayor aprovechamiento de las materias primas.
- Disminución del tamaño de envase.

, y sus desventajas:

- Menor productividad.

	SOLUCIÓN PROPUESTA	Aumento de Productividad
---	--------------------	--------------------------

- Mayor desgaste de equipos.
- Posibilidad de perder imagen ante la percepción del cambio de parte del mercado.

La disminución del tamaño de envase se encuentra limitada por la embolsadora y palletizadora, ya que ambos equipos admiten bolsas de ciertas dimensiones o relaciones entre largo y ancho.

En cuanto al resultado económico, aún no es posible determinarlo, ya que tanto las ventajas como las desventajas inciden en los costos o las ventas.

3.3. Redefinición del Proceso

Siendo tan significativa la disminución de la productividad al aumentar el contenido de filler, es necesario buscar formas de mitigarla. Considerando la instalación existente, es posible aprovechar algunos equipos en desuso para montar una línea de molienda de filler que complemente el proceso actual.

Una línea paralela de molienda presenta múltiples ventajas, además de devolver la productividad de la línea original:

- Según la etapa del proceso en el que se mezclen la cal hidratada y el filler, hasta ese punto habrá un sólo semielaborado, eliminando así los cambios de producto y tiempos muertos. Es decir, habrá mayor **continuidad** en el proceso.
- En la etapa de hidratación se podría evitar que el filler circule por el hidratador, que no fue diseñado para trabajar con un contenido tan elevado de material inerte.

El diagrama de procesos correspondiente a esta modificación se muestra en la Ilustración 33.

	SOLUCIÓN PROPUESTA	Aumento de Productividad
--	--------------------	--------------------------

Ilustración 33. Proceso de producción redefinido para moler filler por fuera de la línea actual.

	SOLUCIÓN PROPUESTA	Aumento de Productividad
---	--------------------	--------------------------

Para el dimensionamiento de la instalación de molienda se deben identificar las necesidades de alimentación y enfrentarlas con la capacidad de los equipos y las instalaciones pre-existentes, para corroborar que son aptos para la tarea. Las necesidades a definir:

1. Caudal másico.
2. Tiempo máximo de alimentación sin interrupciones.

Luego se deberá definir la autonomía que se espera de este circuito paralelo. Se debe recordar que hay cierto “juego” entre la granulometría con la que ingresará el filler y el tiempo en que tardará en ser molido en la etapa de Clasificación y Molienda una vez que se mezcle con la cal hidratada proveniente de los silos de hidratación. En un caso extremo si el filler ingresara al circuito y fuera tan fino que no necesitara pasar por el molino de bolas de la Clasificación y Molienda, se estaría desaprovechando la capacidad del molino actual.

3.3.1. Alimentación ideal de filler

La búsqueda de la alimentación ideal debería fundamentarse en el costo unitario del producto terminado, pero al ser factores que pueden llegar a cambiar, el dimensionamiento también debe ser flexible. Por empezar se calculará la alimentación (o las combinaciones de granulometría y caudal) que hace que la Clasificación y Molienda no sea un cuello de botella.

Si el filler se procesa por fuera del circuito actual, la productividad de la etapa de Molienda e Hidratación será la misma de la CH1, y en el caso más extremo, si el filler procesado fuera lo suficientemente fino, podría ser enviado inmediatamente a producto terminado sin recircular por el circuito de Clasificación y Molienda. En definitiva la productividad máxima del circuito de molienda de filler, para un 54% de filler en la CH2, debiera mantener una relación $54\%:46\% = 116\%$ de la productividad de la CH1 (24,4 t/h ef), es decir 28,3 t/h ef. Sumadas las productividades del circuito de filler con el de Clasificación y Molienda, resultan 52,7 t/h ef, caudal para el cual habría que revisar la capacidad de la etapa de Embolsado (la capacidad de transporte a silos de producto terminado todavía supera las 52,7 t/h ef según la Tabla 46).

Con esta nueva productividad se recalcula el cuello de botella para la CH2 en la Tabla 56.

	SOLUCIÓN PROPUESTA	Aumento de Productividad
---	--------------------	--------------------------

CH2	t/h ef	h/sem ef	Capacidad t/sem	MP necesaria t/sem	MP disponible t/sem	Prod. Posible t/sem
Trituración	69,5	36,7	2.554	3.498	N/A	2.554
Calcinación	13,4	124,7	1.671	2.532	2.554	1.671
Molienda e Hidratación	29,9	77,5	2.318	942	1.671	2.318
Clasificación y Molienda	52,7	111,3	5.866	5.866	4.999	4.999
Embolsado	32,3	114,5	3.705	3.705	4.999	3.705

Tabla 56. Capacidad de producción potencial de CH2 con molienda de filler en circuito paralelo. Para lograr este resultado es necesario incorporar un tercer turno de Embolsado, que sigue siendo el cuello de botella. Este cambio aumenta la capacidad de producción de CH2 en un 91%.

Siendo el cuello de botella el Embolsado, no sería necesaria una productividad de 52,7 t/h ef, ya que no podría aprovecharse y terminaría provocando detenciones en la etapa de Clasificación y Molienda al llenar los silos de producto terminado. De acuerdo con la Tabla 56, sólo es necesaria una productividad que permita producir 3.705 t/sem con el aprovechamiento actual de la Clasificación y Molienda. Esto da por resultado 33,3 t/h ef, que en una relación de 54% de filler, significan 17,9 t/h ef de filler y 15,4 de CH. Esta nueva productividad del circuito de Clasificación y Molienda genera margen para que el circuito paralelo no produzca un filler tan finamente molido, y aproveche la capacidad de molienda remanente del circuito actual.

Esta curva granulométrica del filler será el resultado de tres moliendas:

1. Molienda en molino de martillos (circuito paralelo).
2. Molienda en circuito cerrado de molino de bolas (circuito paralelo).
3. Molienda en circuito cerrado de molino de bolas (circuito actual).

Es decir que el filler ingresará al proceso con la curva granulométrica que trae de la etapa de Trituración y sufrirá tres transformaciones, de acuerdo con la ecuación 10.

$$\begin{pmatrix} F_{Ret\#100} \\ F_{Ret\#200} \\ F_{Pas\#200} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} FT_{Ret\#100} \\ FT_{Ret\#200} \\ FT_{Pas\#200} \end{pmatrix} \times MM \times MB1 \times MB2 \quad (10)$$

, donde F refiere a la masa de filler, FT a la masa de finos de trituración (menores a 28 mm, que tienen mínimas cantidades de retenidos en las mallas que se usan para la molienda), y MM, MB1 y MB2 son matrices cuadradas de transformación correspondientes a las moliendas mencionadas. No es necesario entrar en detalle con las matrices; sólo basta con decir que la transformación MB2 está compartida con la molienda de CH.

Para estimar la curva granulométrica de las 17,9 t/h de filler previo al ingreso a MB2, se utilizan los datos actuales. Con una necesidad de 15,4 t/h de CH en la

	SOLUCIÓN PROPUESTA	Aumento de Productividad
---	--------------------	--------------------------

etapa de Clasificación y Molienda, sólo queda capacidad para moler 5,8 t/h de filler (con la curva granulométrica actual); el resto debiera ser lo suficientemente fino como para no necesitar molienda adicional ya que se saturaría el circuito. Es decir que la curva granulométrica de filler se puede calcular de acuerdo con la Ecuación 8:

$$\dot{m}_F = \dot{m}_{FCM} + \dot{m}_{FFino} \quad (8)$$

, donde $\dot{m}_F$ es el caudal másico total de filler (17,9 t/h), $\dot{m}_{FCM}$ el caudal másico de filler que será procesado en la etapa de Clasificación y Molienda con la capacidad excedente del circuito (5,8 t/h, de acuerdo con el cálculo de filler equivalente), y $\dot{m}_{FFino}$ el que ingresará al circuito listo para ser enviado al producto terminado.

De acuerdo con los análisis de las curvas granulométricas de la CH2, el circuito de Clasificación y Molienda envía a producto terminado un total de 7,9 t/h de filler de la siguiente forma: $\begin{pmatrix} 0,4 \\ 1,4 \\ 5,2 \end{pmatrix}$, siendo cada componente el caudal másico

correspondiente a un rango de granulometría, es decir: $\begin{pmatrix} \dot{m}_{Ret\#100} \\ \dot{m}_{Ret\#200} \\ \dot{m}_{Pas\#200} \end{pmatrix}$. Es de suponer que si se alimenta el circuito con esta curva granulométrica, no será necesario que ese material sea molido.

Retomando la Ecuación 8, el caudal másico de filler listo para ser enviado a producto terminado debería ser de 12,0 t/h: $\begin{pmatrix} 0,7 \\ 2,3 \\ 9,0 \end{pmatrix}$. Sumando esta cantidad a las 5,8 t/h ef de capacidad residual de molienda: $\begin{pmatrix} 3,8 \\ 0,8 \\ 1,3 \end{pmatrix}$, da por resultado las

17,9 t/h: $\begin{pmatrix} 4,5 \\ 3,1 \\ 10,2 \end{pmatrix}$.

3.3.2. Capacidad de producción final de CH2

Tal como se pudo determinar, la capacidad de producción de filler más conveniente para el circuito paralelo es de 17,9 t/h ef. Se vuelve necesario verificar si los equipos disponibles pueden lograr esta capacidad con las proporciones granulométricas necesarias. Una molienda en serie MM y MB1 permite distintas configuraciones de los equipos según el resultado en cantidad y granulometría que se necesita.

3.3.3. Alimentación alcanzable de filler con los equipos disponibles

En cuanto a los equipos disponibles para la molienda de filler, se encuentra un molino de martillos con un motor de 160 kW, que girando a alta velocidad y con una grilla de 2 mm tiene una capacidad de molienda estimada en 25 t/h. El resultado de esta molienda es superior a un 95% pasante en malla de 3 mm, tal como se observa en la Ilustración 33, tomada de un manual del fabricante Hazemag para molinos de martillos de un solo rotor, con grilla (curva 3).

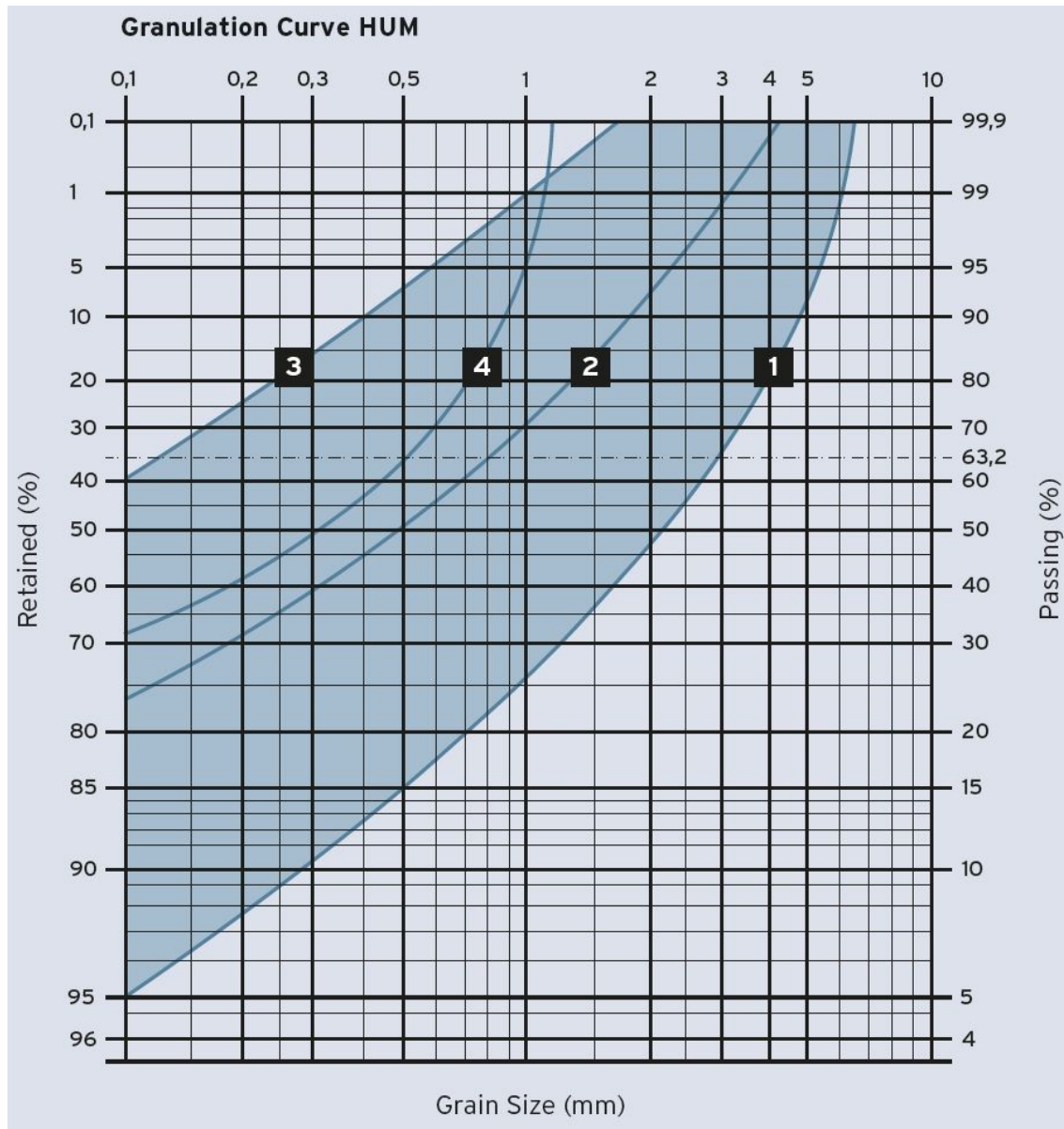


Ilustración 34. Curvas granulométricas para distintas velocidades de rotación de un molino de martillos Hazemag HUM (de similares características al del caso de estudio).

La curva 1 corresponde a velocidad baja y grilla de salida de 6 mm; la curva 2 para velocidad media y grilla de 4 mm; la curva 3 para velocidad alta y grilla de 2 mm; la curva 4 no es aplicable para este caso.

	SOLUCIÓN PROPUESTA	Aumento de Productividad
---	--------------------	--------------------------

Siguiendo al molino de martillos se encuentra un separador dinámico de primera generación, similar al separador 4 de la Tabla 46, con un motor de 20 kW y una capacidad de producción de 30 t/h. Este separador conforma un circuito cerrado de molienda junto con un molino de bolas con grilla de descarga. El molino tiene 5,48 m. de largo, un diámetro interior efectivo (con placas de levante colocadas) de 1,5 m., y es accionado por un motor de 115 kW. De acuerdo con el cálculo de potencia de motores para molinos de bolas en circuitos cerrados en vía seca, indicado en la Ecuación 9^{xv}, es posible estimar el resultado de la molienda en función de la productividad esperada:

$$W = 1,3 \cdot \left[\sqrt{100 \mu m} \cdot W_i \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{d_{P80}}} - \frac{1}{\sqrt{d_{F80}}} \right) \right] \quad (9)$$

$$\frac{P}{\dot{m}} = 1,3 \cdot \left[10 \mu m^{1/2} \cdot W_i \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{d_{P80}}} - \frac{1}{\sqrt{d_{F80}}} \right) \right]$$

, donde W es el consumo de energía del molino (energía entregada por el motor para la productividad T en t/h), W_i el índice de molidurabilidad de Bond (mencionado en el apartado 1.1.1.1.c), d_{P80} la medida de malla que es atravesada por el 80% del producto de la molienda y d_{F80} la medida de malla que es atravesada por el 80% de la alimentación del molino, que siguiendo la curva 3 de la Ilustración 35, resulta ser aproximadamente 0,25 mm. Resolviendo con los valores que se tienen:

$$\dot{m} = \frac{P}{13 \mu m^{1/2} \cdot W_i \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{d_{P80}}} - \frac{1}{\sqrt{d_{F80}}} \right)}$$

$$\dot{m} = \frac{115 \text{ kW}}{13 \mu m^{1/2} \cdot 10,18 \frac{\text{kWh}}{\text{tc}} \cdot \frac{1000 \text{ tc}}{907 \text{ t}} \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{d_{P80}}} - \frac{1}{\sqrt{250 \mu m}} \right)}$$

$$\dot{m} = \frac{115 \cdot 907 \text{ t}}{13 \cdot 10,18 \cdot 1000 \text{ h} \cdot \left(\frac{\mu m^{1/2}}{\sqrt{d_{P80}}} - \frac{\mu m^{1/2}}{\sqrt{250 \mu m}} \right)}$$

$$\dot{m} = \frac{0,79 \text{ t/h}}{\frac{\mu m^{1/2}}{\sqrt{d_{P80}}} - \frac{1}{\sqrt{250}}}$$

Se obtiene la productividad de la molienda como función de la granulometría de salida, función representada en el Gráfico 18:

^{xv}•Bond, Fred C. (1961), "Crushing and grinding calculations, Part I-II.", Br. Chem. Eng. Páginas: 378-385, 543-548.

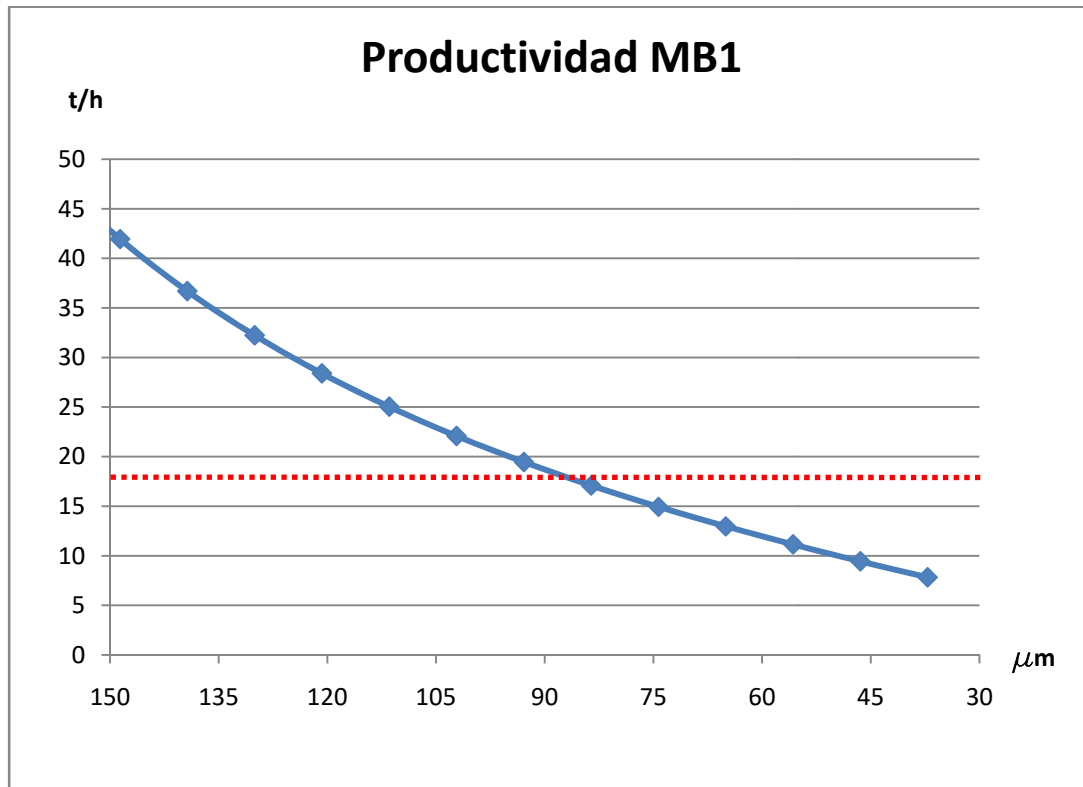


Gráfico 17. Productividad de la molienda en circuito cerrado (vía seca) del material resultante de la molienda en molino de martillos (80% pasante en malla de 250 μm). Se observa la disminución de la productividad a medida que disminuye el tamaño de partícula (el 80% en masa del material es menor o igual a ese tamaño). La línea punteada marca las 17,9 t/h, que se corresponden con un 80% pasante en malla de 87 μm .

Con esta estimación, resulta difícil comparar la curva granulométrica buscada con la granulometría alcanzable, ya que la única referencia que se tiene de esta última es que tiene un 80% pasante en tamiz de 87 μm . De las estimaciones realizadas en 3.3.1, la necesidad de filler para ingresar a MB2 es $\begin{pmatrix} 4,5 \\ 3,1 \\ 10,2 \end{pmatrix}$, que en porcentajes equivale a $17,9 \times \begin{pmatrix} 25\% \\ 17\% \\ 57\% \end{pmatrix}$, donde el 57% es pasante en malla de 74 μm . Para resolver esta dificultad, se asume el modelo de distribución granulométrica de Rosin-Rammler^{xvi}, basado en la distribución de probabilidad de Weibull utilizada para trituración y molienda, de acuerdo con la ecuación 10:

$$P(D; D_m; w) = 1 - e^{-\frac{D}{D_m}^w} \quad (10)$$

^{xvi} Rosin, P.; Rammler, E. (1933), "The Laws Governing the Fineness of Powdered Coal", Journal of the Institute of Fuel. Páginas: 29-36.

, donde P indica el porcentaje del material pasante del tamaño de partícula que se introduzca en la fórmula, D es el tamaño de partícula, D_m el diámetro medio de la muestra y w el módulo de distribución. Para definir si un 80% pasante de $87 \mu\text{m}$ es también 57% pasante en $74 \mu\text{m}$, se identifican D_m y w de la curva granulométrica identificada para la alimentación de MB2, utilizando el par de datos: (42%; $74 \mu\text{m}$) y (20%; $87 \mu\text{m}$), se estiman los parámetros estadísticos de la distribución de acuerdo con la función de la ecuación 11:

$$P(D) = 1 - e^{-\frac{D}{77 \mu\text{m}}^{3,92}} \quad (11)$$

, cuya gráfica se representa en el Gráfico 19.

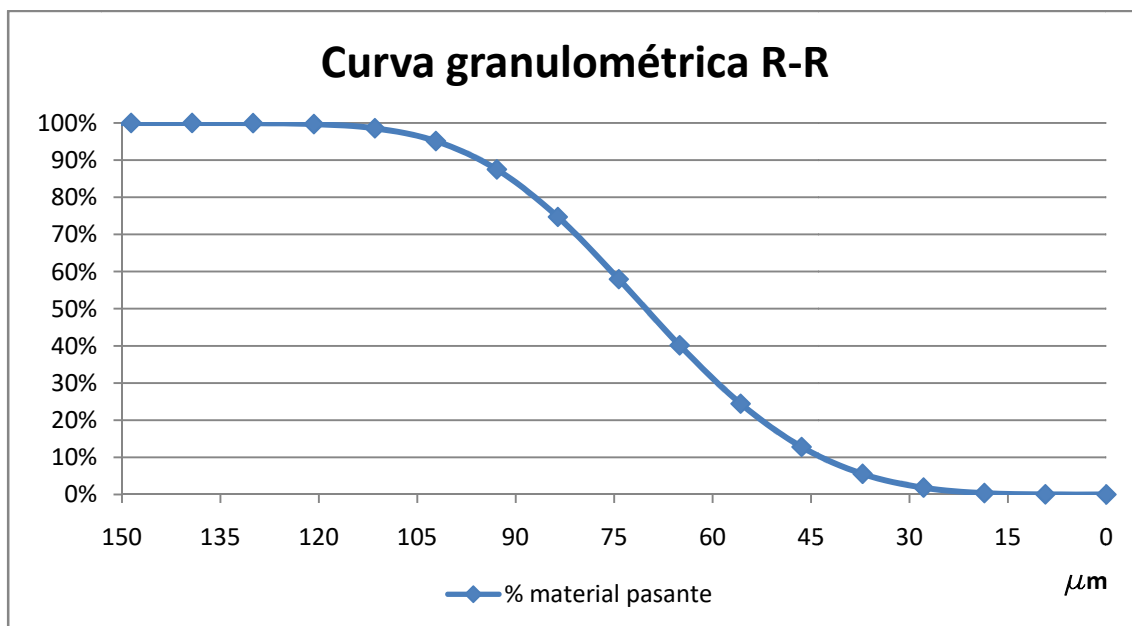


Gráfico 18. Curva granulométrica estimada según el modelo de Rosin-Rammler, que satisface la necesidad del MB2 (80% pasante en malla de 87 mm) y lo que entregaría MB1 (57% pasante de 74 mm).

A simple vista se observa que la curva que cumple con ambos requisitos es demasiado fina, difícil de lograr en los niveles de productividad buscados. Existen dos soluciones para este problema, siempre que se utilicen los equipos disponibles:

1. Disminuir la productividad global de la etapa de Clasificación y Molienda, tal que MB1 pueda moler más fino, y MB2 tenga mayor capacidad remanente.
2. Trabajar en ambas moliendas a máxima capacidad y depositar en un pulmón intermedio el filler molido. Esto a su vez brinda más confiabilidad al proceso.

	SOLUCIÓN PROPUESTA	Aumento de Productividad
---	--------------------	--------------------------

Dado que se dispone de 4 silos de hormigón, se analiza la segunda alternativa en pos de lograr los volúmenes de producción más altos posibles.

Los silos en desuso tienen un volumen de 32 m³ cada uno, totalizando 128 m³. Con una densidad de 1,3 kg/dm³, equivale a una capacidad de 166,4 t de filler molido, que a un consumo de 17,9 t/h en la Clasificación y Molienda, equivale a 9,3 hs de producción, sumadas a la cantidad de filler que pueda generar el circuito paralelo en esas 9,3 hs (según la productividad del circuito paralelo).

En un escenario en que el circuito paralelo de molienda tiene un 85% de aprovechamiento, trabajando 3 turnos al día, y con un mix de CH1:CH2 56%:44%, para abastecer la Molienda y Clasificación desde los silos de filler, será necesaria una determinada productividad del circuito paralelo. Para estimarla, se plantea el sistema de ecuaciones 12, 13, 14, 15 y 16:

$$P = P_{CH1} + P_{CH2} \quad (12)$$

$$Mix = \frac{P_{CH1}}{P} \quad (13)$$

$$P_{CH1} = p_{CH1} \times A \times t_{CH1} \quad (14)$$

$$P_{CH2} = p_{CH2} \times A \times t_{CH2} \quad (15)$$

$$T = t_{CH1} + t_{CH2} \quad (16)$$

, donde P es la producción total de la etapa de Clasificación y Molienda, P_{CH1} y P_{CH2} la producción de CH1 y CH2, respectivamente, Mix es el porcentaje de la producción (en masa) que le corresponde a la CH1, A el aprovechamiento, p_{CH1} y p_{CH2} las productividades de CH1 y CH2, respectivamente, T el tiempo total de producción, y t_{CH1} y t_{CH2} el tiempo de producción de CH1 y CH2, respectivamente.

Para calcular el tiempo de producción de CH2 en función de las productividades (datos), el mix (dato), y el tiempo total de producción se realizan las sustituciones necesarias hasta llegar a la ecuación 17:

$$\frac{t_{CH2}}{T} = \frac{1}{1 + \frac{1}{\frac{1}{Mix} - 1} \times \frac{p_{CH2}}{p_{CH1}}} = 48\% \quad (17)$$

Con $Mix=44\%$, $p_{CH1}=24,4$ t/h, $p_{CH2}=33,3$ t/h, el porcentaje del tiempo total de producción destinado a CH2 es un 48%, que afectado por el aprovechamiento actual de 77%, termina significando un 37% del tiempo de Clasificación y Molienda. Para poder abastecer la producción, con una necesidad de filler de 17,9 t/h, será necesaria una productividad de 7,8 t/h del circuito paralelo de molienda.

Con la capacidad de los silos de filler, se determina el tiempo en que se podría producir CH2 en la etapa de Clasificación y Molienda según la ecuación 18:

	SOLUCIÓN PROPUESTA	Aumento de Productividad
---	--------------------	--------------------------

$$t_{M\acute{a}x} = \frac{Cap}{\Delta prod} \quad (18)$$

, donde Cap es la capacidad de almacenamiento de los silos, y $\Delta prod$ es la diferencia de productividades entre la necesidad de la Clasificación y Molienda, y la productividad del circuito paralelo. Desarrollando la ecuación 18:

$$t_{M\acute{a}x} = \frac{4 \times 32m^3 \times 1,3 t/m^3}{17,9t/h - 7,8 t/h} = 16,6 h$$

Es decir que sería posible trabajar dos turnos consecutivos produciendo CH2 sin detenciones, y utilizar el resto del tiempo para volver a llenar los silos y comenzar una nueva producción.

Resta verificar si el circuito paralelo de molienda de filler puede producir la granulometría necesaria con una productividad de 7,8 t/h. Para ello se realiza el mismo análisis, pero se busca en la curva de molienda de MB1, la granulometría de salida para 7,8 t/h, tal como se observa en el Gráfico 20.

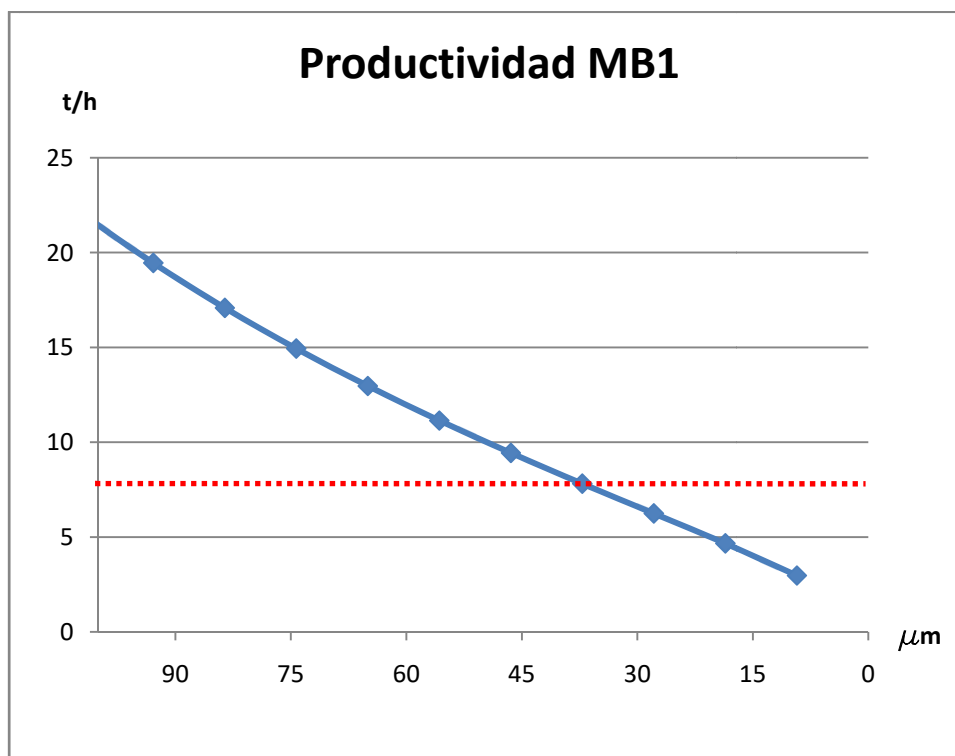


Gráfico 19. Productividad del circuito cerrado de molienda de filler en función de la granulometría de salida. Se observa que para una productividad de 7,8 t/h el resultado es un 80% pasante en tamiz #400 (37 μm).

Por supuesto un 80% pasante de 37 μm satisface las necesidades de MB2 para mantener la productividad global en 33,3 t/h ya que es más fino que un 25% retenido en tamiz #100 y 42% en tamiz #200. Es probable que la

	SOLUCIÓN PROPUESTA	Aumento de Productividad
---	--------------------	--------------------------

granulometría resultante sea incluso más fina que la que se estima necesaria; en todo caso esto será beneficioso para producir un mix con una proporción mayor de CH₂ si se desea. Difícilmente sea posible bajar la carga de trabajo del circuito para reducir significativamente el tiempo de producción.

3.3.4. Dotación necesaria

Desde ya que la incorporación de un nuevo circuito genera una necesidad adicional de trabajo: operación, limpieza y control de calidad.

Actualmente la fábrica cuenta con tres puestos de producción en el mismo sector donde se encuentra el circuito paralelo: un maquinista, un hidratador y un líder (que también verifica la operación de los hornos). El hidratador es un puesto fijo, ya que la tecnología de los equipos no posee sistemas de control que permitan operar de manera remota, ni salir del puesto de trabajo para ocuparse de otros equipos. El maquinista opera los equipos y sistemas de transporte, selecciona los silos de los que se extrae material y los silos a los que se envía material (exceptuando el hidratador y los silos de hidratación). Es un puesto que se encuentra holgado en cuanto a carga de trabajo, pero del cual no se puede prescindir, por lo cual la incorporación de estos nuevos equipos no generará una necesidad adicional de personal operativo.

En cuanto a la limpieza, está definida a período fijo, por lo cual un aumento en la producción generará mayor cantidad de suciedad que será removida con la frecuencia actual. No se identifican sectores en los que un incremento en la acumulación pueda afectar la seguridad y las condiciones de trabajo de los equipos. La incorporación de equipos adicionales sugiere que habrá mayor cantidad de polución, en particular cuando existan derrames o detenciones que impliquen purgar los equipos para ponerlos en marcha nuevamente (para lo cual deben estar vacíos). Sin embargo, se utilizan equipos de aspiración con suficiente capacidad de succión como para que estas limpiezas sean muy rápidas y de bajo impacto.

En cuanto al control de calidad, se deben establecer nuevos puntos de control luego de MM1 y MB1, así como en el ingreso al molino y el separador. Estas muestras se analizarían periódicamente en el Laboratorio de Control de Calidad impactando en los costos variables del sector, pero sin impactar en la necesidad de personal. El muestreo es automático, mediante sinfines y caladores con temporizadores.

3.3.5. Impacto en el mantenimiento y elementos de desgaste

La incorporación de sistemas de transporte, un molino de martillos, un molino de bolas y un separador genera un incremento en la necesidad de mantenimiento que amerita la incorporación de una persona en el sector de Mantenimiento. Este cálculo se realiza replicando los planes de mantenimiento

	SOLUCIÓN PROPUESTA	Aumento de Productividad
---	--------------------	--------------------------

que se están armando para los equipos actuales, totalizando las horas estimadas para la ejecución de las tareas planificadas y suponiendo cierto porcentaje de mantenimiento correctivo y programado.

En cuanto a los elementos de desgaste, se consideran los martillos y las bolas de molino. El recambio de martillos en los molinos actuales se realiza una vez por semana en promedio, si bien en última instancia está supeditado a la granulometría y productividad de los molinos (en cuanto se superan ciertos valores los martillos deben ser cambiados). Se supondrá la misma frecuencia para MM1. En cuanto a las bolas de molino, el molino de bolas actual tiene una carga de molienda de 22 t, y en promedio se deben clasificar y agregar 2 t de bolas cada 6 meses. Se tomará el mismo consumo (en porcentaje) para MB1, aunque los materiales que se muelen en cada uno no sean los mismos, aunque MB1 tenga bolas de diferentes tamaños (ocasionando que las bolas que se descartan por achicarse son menos y sólo hay que reponer por lo general las más grandes), y aunque MB2 trabaje alternando entre dos productos haciendo que por momentos el molino trabaje muy lleno y por momentos muy aliviado (acelerando el desgaste de las bolas).

A nivel potencia instalada y consumo de energía, se estima que se adicionan alrededor de 390 kW, de los cuales se utilizarán en simultáneo 360 kW. Para los molinos se supone el máximo consumo, si bien es probable que esto no ocurra, en especial con el molino de martillos. Afortunadamente no es necesario realizar cambios en la instalación eléctrica: transformadores, tableros y cableado, ya que la instalación original alimentaba una fábrica completa de cerámicas. La única consideración es que el grupo generador no dará abasto para mantener toda la fábrica en funcionamiento, por lo cual cuando haya un corte de energía se deberá producir irremediablemente CH1, o CH2 hasta agotar los silos de filler.

3.3.5.1. Carga de bolas

Por supuesto existen diversos factores que deben darse para que esta productividad se cumpla, pero es una estimación aceptable. Entre ellos, uno de los más importantes y de gran impacto económico, es la carga de molienda (cantidad y tamaño de elementos moledores: las bolas de molino).

Las buenas prácticas sugieren una carga de molienda del 30% del volumen efectivo del molino, si bien existen distintas formas de completar ese volumen, según el grado de vacío que se genera por la distribución de tamaños de bolas, comúnmente denominada curva de bolas. En el extremo una curva que cubre todos los tamaños posibles, en cantidades adecuadas de cada uno, no deja vacío alguno y su densidad aparente es la misma que la del propio material. En cambio una curva de bolas de tamaño único genera mayor cantidad de

	SOLUCIÓN PROPUESTA	Aumento de Productividad
---	--------------------	--------------------------

espacios, haciendo que la cantidad de acero necesaria para llenar el 30% del volumen del molino disminuya.

Dado el largo del cilindro de molienda, no tiene sentido definir más de un tamaño de bola, ya que este concepto se aplica por lo general en molinos donde se pueden compartimentar o autoclasificar (con placas clasificadoras) los distintos tamaños, logrando que las bolas de mayor tamaño estén en la entrada y las más chicas en la salida, acompañando la reducción del material a moler y atacando inicialmente por impacto y finalmente por abrasión (aumentando la superficie específica). La definición del diámetro máximo de bola es una solución de compromiso que debe equilibrar lo mejor posible dos necesidades:

1. Que las bolas tengan suficiente masa como para quebrar una partícula, por lo cual cuanto más pesada cada bola, mayor certeza de que las partículas se quebrarán.
2. Que se logren la mayor cantidad de impactos posible, y esto se consigue con mayor cantidad de bolas. En tal sentido, si el volumen a ocupar es constante y el grado de vacío también lo es porque se utiliza un único tamaño de bola, cuanto más chicas las bolas, habrá mayor cantidad, y así más impactos.

Los factores a tener en cuenta para definir el diámetro de bola son: el tamaño del material que ingresa al molino y su resistencia a ser quebrado, es decir el índice de molturabilidad.

El cálculo del diámetro máximo de bola^{xvii} también fue abordado por Fred C. Bond en sus estudios, si bien existen distintas teorías sobre la metodología de cálculo. La fórmula de Bond se expresa en la Ecuación 12:

$$d_b = \sqrt{\frac{d_{F80}}{K}} \cdot \sqrt[3]{\frac{S_g \cdot W_i}{100 \cdot F_v \cdot \sqrt{D}}} \quad (12)$$

, donde d_b es el diámetro de bola en pulgadas, K una constante que depende de si la molienda es en vía seca o húmeda, S_g es la gravedad específica del material a moler, F_v es el factor de velocidad que multiplica a la velocidad crítica de giro del molino (máxima velocidad tal que la bola caiga por gravedad una vez que es levantada por el giro propio del molino).

Para vía seca K es 335, y habitualmente F_v es 75%. Reemplazando con los valores que se tienen:

$$d_b(in) = \sqrt{\frac{87 \mu m}{335}} \cdot \sqrt[3]{\frac{2,69 \cdot 11,61 \frac{kWh}{t}}{100 \cdot 75\% \cdot \sqrt{5 ft}}}$$

^{xvii}. Bond, Fred C. (1958), "Grinding Ball Size selection", Mining Engineering, páginas 592-595.

	SOLUCIÓN PROPUESTA	Aumento de Productividad
---	--------------------	--------------------------

$$d_b = 0,29''$$

La medida comercial de bolas de molino más chica es 25 mm, valor que se recomienda siempre que el resultado del cálculo sea menor. Dado que las bolas son elementos de desgaste, una medida superior dará mayor durabilidad a la carga de bolas, si bien la cantidad de impactos y la superficie específica será menor de la esperada. Cuando los elementos moledores son demasiado pequeños (diámetros inferiores a 15 mm), suelen incrustarse entre las placas que revisten el molino, y las grillas. También pueden pasar por las grillas y salir del circuito de molienda arriesgando los equipos de transporte, es por eso que se colocan sistemas para capturarlas en la salida y prevenir que esto suceda.

El volumen total a cargar puede calcularse según la ecuación 13:

$$V = 30\% \cdot \pi \cdot \frac{D^2}{4} \cdot L \quad (13)$$

Que en el caso de estudio da por resultado:

$$V = 30\% \cdot \pi \cdot \frac{1,5^2}{4} \cdot 5,48 \text{ m}^3$$

$$V = 2,91 \text{ m}^3$$

El grado de vacío para esferas idénticas es independiente del tamaño de las esferas, ya que a menor diámetro pueden reducirse los espacios pero se generan también una cantidad inversamente proporcional. Gauss calculó el mínimo factor de vacío en la Ecuación 14:

$$k_v = \frac{\pi}{3\sqrt{2}} \quad (14)$$

Y consecuentemente la carga de bolas estará dada por la Ecuación 15:

$$M = \rho \cdot k_v \cdot V \quad (15)$$

, donde ρ es la densidad del acero 4.600 kg/m³. Volcando los valores que se tienen, la carga de bolas se determina en **9.896 kg** de bolas de **25 mm**.

3.3.6. Layout

El flujo del material se esquematiza en la Ilustración 35. Y la ubicación de los equipos se muestra en el plano de planta de la Ilustración 36.

	SOLUCIÓN PROPUESTA	Aumento de Productividad
---	--------------------	--------------------------

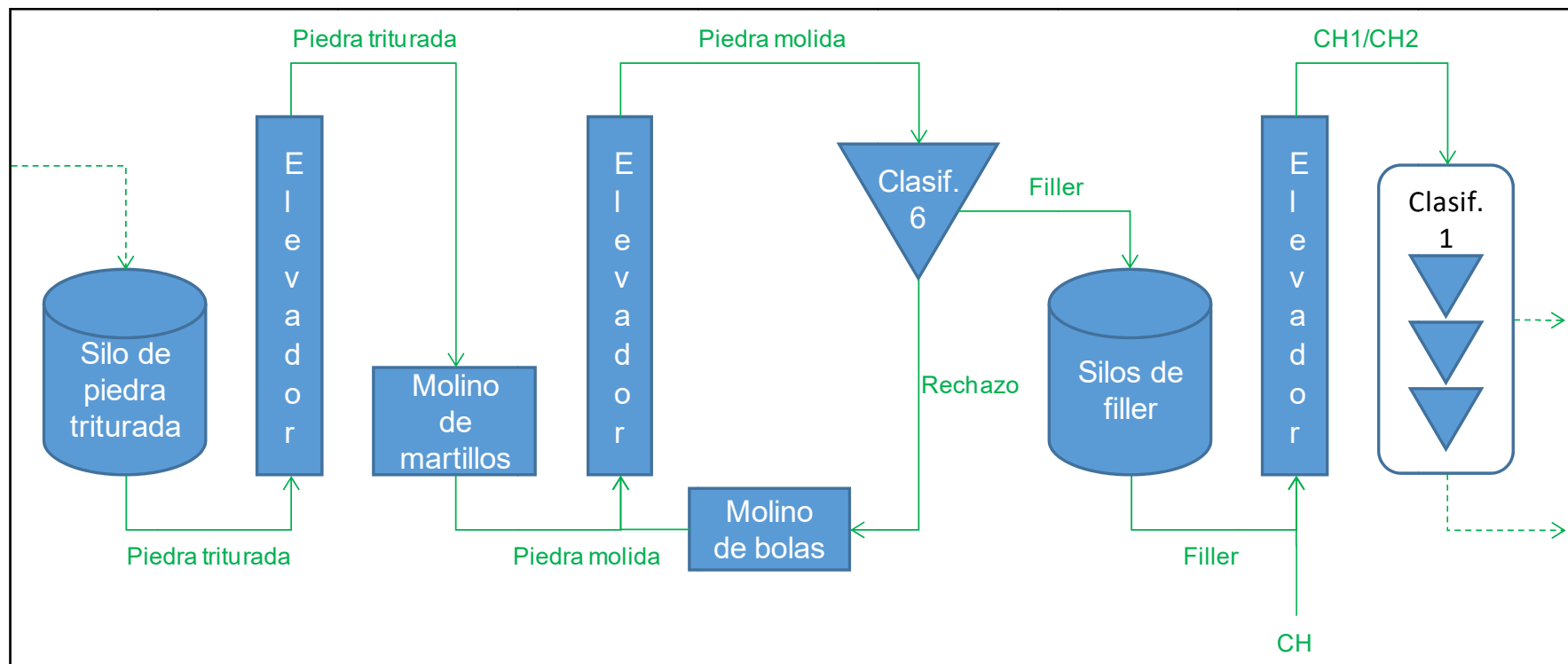


Ilustración 35. Esquema del proceso de molienda en circuito paralelo. Los materiales Filler y CH se mezclan en la rosca que alimenta el último elevador, e ingresan a la etapa de Clasificación y Molienda.

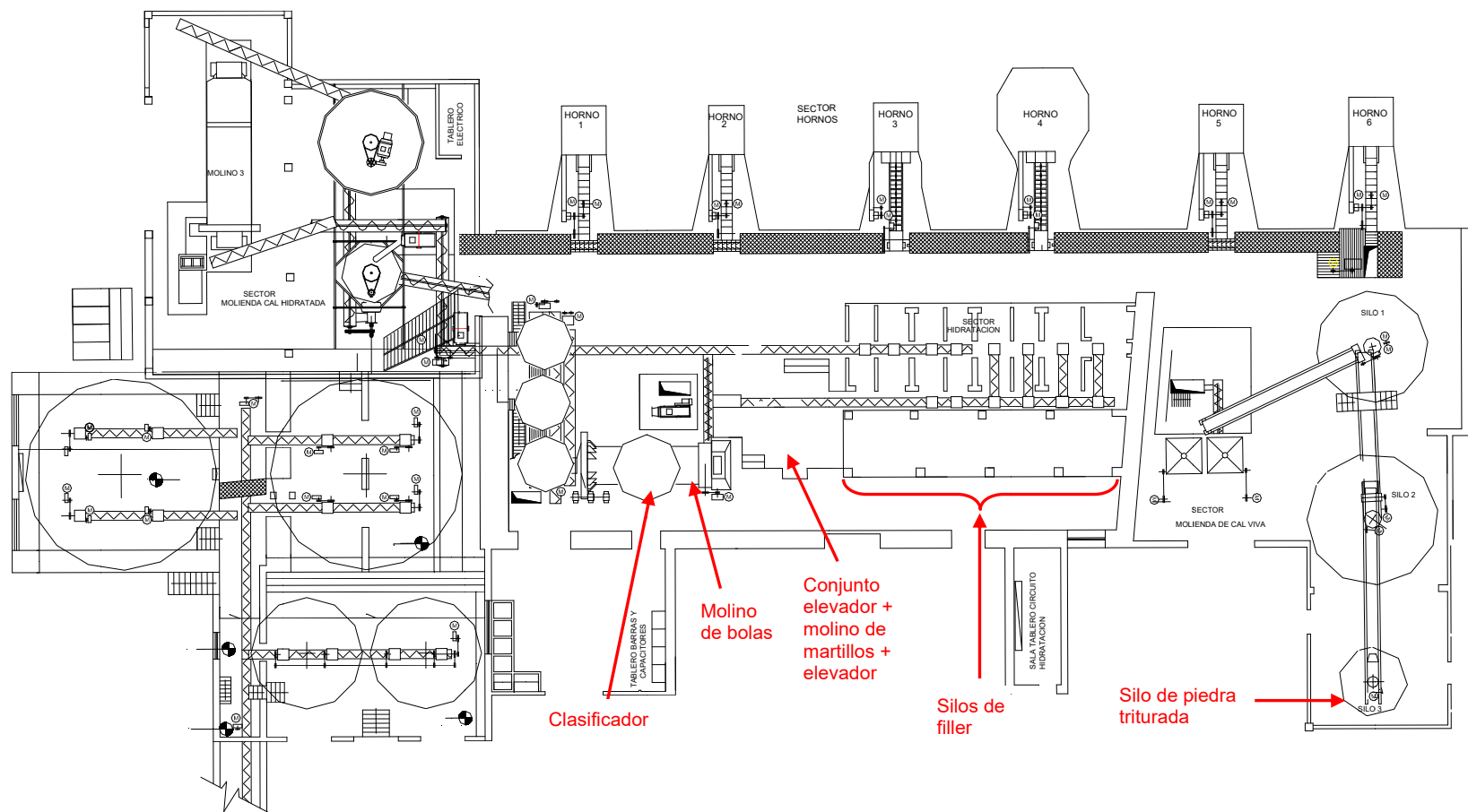


Ilustración 36. Layout de la fábrica. Se señalan los equipos a utilizar: el silo actual de piedra 0-32 mm, un conjunto compuesto por elevador de cangilones, el molino de martillos de 160 kW y un segundo elevador de cangilones; el clasificador 6, el molino de bolas, y los 4 silos de hormigón de 32 m³.

Si bien los componentes principales del circuito se encuentran montados gracias a un proyecto frustrado de comercializar filler puro en 2006, es necesario invertir en los sistemas de transporte, y en especial resolver el problema de transportar piedra triturada desde el silo hasta el elevador que alimenta el molino de martillos. Por las características del material, el equipo más adecuado es una cinta transportadora, y es posible utilizar la cinta de descarga actual (girándola levemente), transfiriendo la piedra a una nueva cinta hasta la descarga al elevador. Es importante observar la forma en que ingresa el material al molino, ya que una alimentación segregada afecta seriamente el desgaste de martillos, la capacidad de producción, y es propenso a atorar el equipo. El recorrido de la cinta se puede observar en la Ilustración 37, y se extiende por 21 metros.

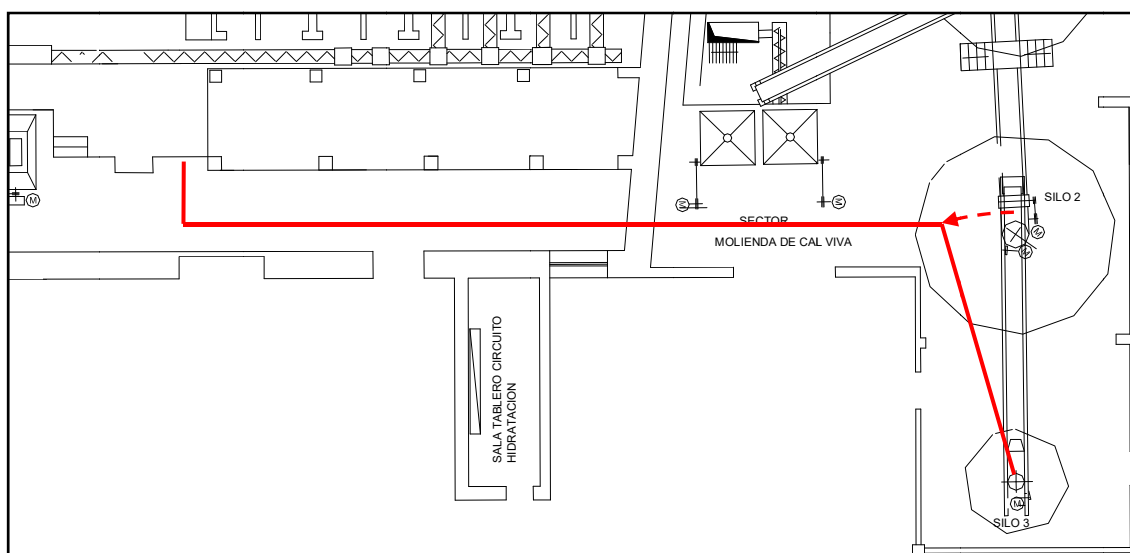


Ilustración 37. Recorrido desde el silo de piedra triturada hasta el molino de martillos.
Para su colocación, la cinta debe atravesar una pared

El elevador de cangilones que alimenta el molino de martillos se encuentra colocado y no necesita de inversiones en ninguno de sus componentes. Se encuentra montado a nivel del piso, tiene tres metros de altura y su tracción es de cadena doble. La descarga del molino de martillos es una caída de chapa hacia la fosa del elevador de cangilones que alimenta el clasificador 6; este elevador mide 13 metros de altura total (2 metros dentro de la fosa y 11 sobre el nivel del piso, ya que tiene que superar la altura del molino y del clasificador que se encuentra sobre él), y su tracción es de banda de tela de goma. La descarga del rechazo de clasificación al ingreso del molino de bolas es también una caída de chapa cuadrada, con clapetas antirretorno para que el clasificador no succione en falso. La descarga del molino es por desplazamiento, y cae al mismo ingreso del elevador de salida del molino de martillos (alimentación del clasificador). El filler terminado, cae por una salida lateral del clasificador y es

	SOLUCIÓN PROPUESTA	Aumento de Productividad
---	--------------------	--------------------------

transportado y elevado con una rosca de cajón redondo de 9 metros de longitud y una inclinación de 40° hasta una rosca de 12 metros de largo que descarga el material en los silos. Las descargas de los silos son idénticas a las de los silos de cal hidratada, con válvulas celulares y una rosca corta hasta el sinfín principal de cal hidratada, donde los materiales se mezclan.

A su vez, el molino de bolas es aspirado por el mismo filtro de mangas del circuito MB2, ya que está muy sobrado de capacidad de succión. Por supuesto se colocarán válvulas para poder independizar la aspiración de cada molino, ya que más allá de poder lograrlo con los diámetros de las cañerías, es necesario poder realizar ajustes finos sobre cada circuito.

Luego será necesario acondicionar tanto el sector como los equipos y los silos. En especial probar la centralina de lubricación, lavar el conjunto de engrane del molino de bolas y hacer los ajustes de alineación del accionamiento minimizando vibraciones. Lo mismo aplica para el molino de martillos, deben realizarse pruebas de balanceo, análisis de vibraciones, consumo, temperatura, etc.

De todos los equipos de transportes mencionados, sólo resta conseguir la cinta de piedra de 21 metros, la rosca de cajón redondo de 9 metros y la rosca superior de 12 metros. También es necesario conectar la aspiración del molino de bolas desde el filtro de mangas con un caño de sección circular de 27 metros.

3.3.7. Capacidad de producción del circuito paralelo de filler

Con todos los análisis realizados, es factible lograr las productividades que se observan en la Tabla 57, aumentando la capacidad global de producción de CH2 en un 91%.

CH2	Capacidad			MP	MP	Prod.
	t/h ef	h/sem ef	t/sem	necesaria t/sem	disponible t/sem	Posible t/sem
Trituración	69,5	36,7	2.554	3.498	N/A	2.554
Calcinación	13,4	124,7	1.671	2.532	2.554	1.671
Molienda e Hidratación	29,9	77,5	2.318	942	1.671	2.318
Clasificación y Molienda	33,3	111,3	3.705	3.705	4.999	3.705
Embolsado	32,3	114,5	3.705	3.705	3.705	3.705

Tabla 57. Capacidad de producción estimada de CH2 con circuito paralelo de filler. La etapa de Clasificación y Molienda fue dimensionada para coincidir en productividad con el cuello de botella identificado en la etapa de Embolsado, a la cual hubo que sumarle un turno de producción.

	SOLUCIÓN PROPUESTA	Aumento de Productividad
---	--------------------	--------------------------

3.4. Resumen de alternativas a evaluar

Es posible aumentar la capacidad de producción total incrementando disponibilidades mecánicas, utilizaciones, aprovechamiento, productividades efectivas de cada etapa, y modificando las características de un producto y el proceso.

De esta forma, es posible identificar seis escenarios, cada uno con una capacidad de producción total diferente. Se caracteriza cada uno en la Tabla 58, suponiendo escenarios intermedios que sean comparables con el mix de producción actual.

Escenario	Mix (%CH1)	CH1	CH2	Total	Δ Prod
Actual	44%	3.606	4.552	8.158	0%
Disponibilidad mecánica y utilización	44%	3.863	4.837	8.700	7%
Aprovechamiento	44%	3.833	4.856	8.689	7%
Productividad	44%	3.814	4.777	8.591	5%
Turnos	44%	4.255	5.455	9.710	19%
Redefinición de producto	44%	3.232	4.131	7.363	-10%
Redefinición de producto y proceso	44%	4.834	6.202	11.036	35%

Tabla 58. Alternativas de aumento de la capacidad de producción. Se observa que el mayor aumento se logra moliendo filler en circuito paralelo. Para realizar cada uno de estos escenarios es necesario ejecutar medidas que pueden aumentar los costos, tanto fijos como variables totales, e implicar inversiones por lo cual los costos unitarios se verán afectados.

3.5. Costos e inversiones por alternativa

La mayoría de los incrementos en la capacidad de producción planteados implican un aumento en los costos fijos o variables, o inversiones y reposiciones de capital periódicas (o en función de alguna variable de producción o consumo).

Tomando como punto de partida los costos fijos y variables expuestos en la Tabla 20 del apartado 2.6.2., se estimarán los diferenciales de costo para cada alternativa, considerando también los cambios en los mix de producción que pueden alterar el prorrateo de costos fijos. Para esto es necesario identificar las acciones que necesita cada alternativa para realizarse; estas acciones se mencionan en las Tablas 59, 60 y 61:

	SOLUCIÓN PROPUESTA	Aumento de Productividad
---	--------------------	--------------------------

Escenario	Descripción	Resultado	Etapas	Imputación	Tipo	Monto	Implementación	Resultados	Efecto
1.- Disponibilidad mecánica + utilización	Compra de repuestos de máquina paletizadora y lubricación automática	Aumento de disponibilidad mecánica de 85,7% a 91%	Embolsado	Embolsado	AF	\$ 230.000	3 meses	12 meses	Gradua
					V	\$ 60.000			
	Lubricación centralizada y limpieza de equipos	Aumento de disponibilidad mecánica de 87,5% a 95%	Clasificación y Molienda	Molienda	AF	\$ 400.000	2 meses	12 meses	
					V	\$ 25.000			
	Cambio de lógica de carga y descarga de hornos	Aumentar utilización de 94,4% a 98%	Calcinación	Calcinación	N/A	\$ -	Inmediato	1 mes	
Puesta en marcha puntual de equipos los días lunes	Aumentar utilización de 97,5% a 98%	Clasificación y Molienda	Molienda						
2.- Aprovechamiento	Programación de la producción	Eliminar detenciones por problemas externos	Calcinación	Calcinación	N/A	\$ -	1 mes	3 meses	Al finalizar
			Clasificación y Molienda	Molienda					
			Embolsado	Embolsado					
		Disminuir las detenciones de 30,5% a 27,3%	Hidratación y Molienda	Hidratación					

Tabla 59. Resumen de escenarios 1 y 2, con detalle de medidas a ejecutar, la etapa en la que se imputará, el tipo de costo o inversión (AF – AV: de Amortización Fija o Amortización Variable), el tiempo necesario para la implementación y el tiempo estimado para la obtención de resultados, así como la forma en la que se proyectará la obtención de estos resultados: gradual, inmediata o al finalizar. Tal como se expusiera en apartados anteriores, algunas medidas no requieren de inversiones ni implican un aumento de costos, más que el tiempo necesario para su implementación.

	SOLUCIÓN PROPUESTA	Aumento de Productividad
---	--------------------	--------------------------

Escenario	Descripción	Resultado	Etapas	Imputación	Tipo	Monto	Implementación	Resultados	Efecto
3.- Productividad	Programación del mantenimiento para hacer producciones continuas y constantes	Aumentar productividad efectiva de 13,4 a 14,4 t/h	Calcinación	Producción	AF	\$ 120.000	6 meses	12 meses	Al finalizar
		Aumentar productividad efectiva de 17,4 a 18,3 t/h	Clasificación y Molienda						
		Aumentar productividad efectiva de 23,1 a 27,8 t/h	Embolsado						
4.- Turnos	Horas extras	1 HX/mes (50%)	Trituración	Trituración	F	\$ 376	1 mes	Instantáneo	
		9 HX/mes (50%)	Calcinación	Calcinación		\$ 9.036			
		20 HX/mes (100%)	Embolsado	Embolsado		\$ 45.120			
	Modificar el esquema rotativo 6x1 a 6x2	24 HN/mes adicionales	Molienda e Hidratación	Hidratación		\$ 63.500	1 mes		
		24 HN/mes adicionales	Clasificación y Molienda	Molienda		\$ 63.500			
		5.- Redefinición de producto	Reducir el tamaño del envase aproximadamente un 7% en volumen	Adecuación de envase al nuevo producto		Embolsado	Embolsado		V

Tabla 60. Resumen de escenarios 3, 4 y 5, con detalle de medidas a ejecutar, la etapa en la que se imputará, el tipo de costo o inversión (AF – AV: de Amortización Fija o Amortización Variable), el tiempo necesario para la implementación y el tiempo estimado para la obtención de resultados, así como la forma en la que se proyectará la obtención de estos resultados: gradual, inmediata o al finalizar. La inversión de la alternativa 3 consiste en un software de administración del mantenimiento, cuya implementación requiere de la carga de todos los planes de mantenimiento; este sistema facilitará la organización y el control de las tareas, así como irá generando historial de reparaciones a mediano y largo plazo, generando nuevos indicadores. La alternativa 4 implica cierta gestión con el sindicato, que demora alrededor de un mes. La alternativa 5 tiene 2 meses para su ejecución debido al tiempo de entrega de los envases de menor tamaño.

	SOLUCIÓN PROPUESTA	Aumento de Productividad
---	--------------------	--------------------------

Escenario	Descripción	Resultado	Etapas	Imputación	Tipo	Monto	Implementación	Resultados	Efecto
6.- Redefinición de producto y proceso	Montar una cinta transportadora de 21 m, una rosca sinfín de cajón cilíndrico de 9 m, y una rosca de cajón abierto de 12 m	Transporte de filler	Clasificación y Molienda	Filler	AF	\$ 535.650	3 meses		Instantáneo
	Cuerpos moledores (compra inicial y reposición periódica)	Molienda de filler			AV	\$533.500			
	Caño de aspiración hasta filtro de mangas actual de 27 m	Aspiración molienda			AF	\$ 45.000			
	Acondicionamiento del sector	Sector seguro, ordenado y limpio			AF	\$ 25.000			
	Acondicionamiento de equipos	Confiabilidad de equipos			AF	\$ 180.000			
	Insumos, respuestos, accesorios, motores eléctricos, rodamientos, lubricantes, elementos de desgaste, etc	Mantenimiento (no incluye mano de obra)			V	\$ 106.407			
	Energía eléctrica	Potencia instalada adicional: 391 kW; 92% simultaneidad			V	\$ 86.616			
	Personal directo	30% de HN maquinista, cuando se produzca filler; 10% líder de producción			F	\$100.996			
	Equipos preexistentes	No generan costo financiero pero deben amortizarse			AF	\$ 4.235.000			
	Reducir el tamaño del envase aproximadamente un 7% en volumen	Adecuación de envase al nuevo producto	Embolsado	Embolsado	V	-2% envase			
	Muestreadores automáticos	Control de calidad	Clasificación y Molienda	Filler	AF	\$ 33.000			
	Incorporar una persona en Mtto	36,75 HH/semana	Mantenimiento	Filler	F	\$ 71.000			
	Incorporar un turno de producción	48 HN/semana	Embolsado	Embolsado	F	\$ 381.000			

Tabla 61. Resumen del escenario 6, con detalle de medidas a ejecutar. Dado lo avanzado que se encuentra el montaje, se estima que la puesta en marcha requerirá de 3 meses. El proyecto a desarrollar y su camino crítico no forman parte del presente estudio. De modo pesimista no se considera el ahorro de energía y mantenimiento a raíz de no procesar el filler por el circuito actual. El costo del personal directo se descuenta de la Molienda y se imputa al Filler, ya que no hay incremento real de personal, sólo redistribución de tareas.

	RESULTADOS	Aumento de Productividad
---	------------	--------------------------

4. RESULTADOS

4.1. Criterios de análisis y consideraciones coyunturales

La definición de un criterio absoluto de análisis corre riesgo de volverse contraproducente ya que es muy difícil volcar en un solo método todas las consideraciones del caso.

Es por esto que es importante evaluar los resultados de las estimaciones en las distintas dimensiones de interés para el caso de estudio:

- Capacidad de generación de caja.
- Sustentabilidad.
- Velocidad de respuesta a la problemática.
- Alineación del proyecto con los objetivos organizacionales.
- Tendencias de mercado, precios y costos.

Los primeros dos aspectos están claramente relacionados, siendo la capacidad de generación de caja el primer factor a considerar, y luego la sustentabilidad de cada alternativa.

La sustentabilidad refiere a la posibilidad de mantener el resultado en el tiempo a través de la consolidación de alguna de las alternativas. En particular las que implican inversiones y CapEx, tienen la desventaja de no poder trasladar a los costos la reposición de los equipos en su totalidad. Este problema nace de la norma contable que no permite la indexación de amortizaciones, por la cual cuando a nivel contable se ha amortizado un bien, difícilmente esas amortizaciones alcancen para volver a comprar el mismo bien haciendo que en las proyecciones las alternativas que implican inversiones muestren mejores resultados económicos. Esto en las proyecciones financieras se compensa a través del CapEx, pero en una empresa que genera ganancias, tener amortizaciones menores de las que necesita la hacen pagar más impuestos a las ganancias. A modo paliativo, el Régimen de Inversiones Mineras contempla en la Ley 24.196 un sistema de amortizaciones aceleradas que compensa relativamente la incapacidad de actualizar los saldos de amortización. Las amortizaciones aceleradas también dificultan el análisis a partir de los costos unitarios, ya que castigan los costos en los primeros años y luego cuando los equipos se encuentran contablemente amortizados los márgenes aumentan, pero es necesario prever que los costos volverán a incrementarse.

Esto mismo ocurre con el valor de la materia prima, la piedra caliza. Por lo general las empresas compran yacimientos que le permitan sostener la actividad durante muchos años, pero a medida que se van consumiendo las reservas, y las de la zona, los costos de PUH aumentan arriesgando la sustentabilidad del negocio. Tal es el caso de Olavarría, en la que la piedra

	RESULTADOS	Aumento de Productividad
---	------------	--------------------------

cada vez se encuentra más lejos de las fábricas, o a mayor profundidad para muchos actores del mercado, pero no así para algunos que han tenido el recaudo y el dinero para asegurarse PUH a bajo costo; es decir no todos tienen un incremento de costo en la PUH que necesiten trasladar al precio del producto. Agotar un yacimiento puede significar la pérdida de competitividad para muchos productores y el hecho de no poder actualizar el saldo de amortización de sus yacimientos tampoco ayuda. En años de inflación, con yacimientos comprados hace décadas, la incidencia del yacimiento se torna despreciable, pero no es tan despreciable cuando los yacimientos se agotan.

A efectos de asegurar la sustentabilidad del proyecto, desde el punto de vista económico, se considera que las amortizaciones se contabilizan de acuerdo con el régimen acelerado, y que una vez cumplida la amortización, se sigue reinvertiendo el mismo monto. Esto puede sonar exagerado, porque es evidente que en una fábrica normal la incidencia de las amortizaciones en los costos va disminuyendo a medida que pasa el tiempo, no sólo por efecto de la inflación sino por la vida útil residual de equipos e instalaciones.

En cuanto a la capacidad de generación de caja se toma como indicador el Margen Bruto de los primeros tres años, descontado a una tasa interna anual (la del margen bruto actual). El indicador porcentual puede servir de referencia para comparaciones entre negocios de distinta naturaleza, con los competidores, o incluso con uno mismo cuando hay estabilidad productiva. Sin embargo en el caso de estudio, para la selección de una alternativa se vuelve más importante el volumen total del margen que el porcentual.

Otro indicador para la evaluación, es el nivel de inversión, CapEx y costos que necesita cada inversión, acumulado y retraído al año cero con la misma tasa que el margen bruto actual.

Por último, se tienen en consideración los costos unitarios de cada producto. Es de suponer que el costo de la CH1 no debiera cambiar para las alternativas 5 y 6, sin embargo existe cierto impacto en la absorción de costos fijos por lograr un nivel de producción mayor de ambos productos.

Para todos los escenarios se proyectan las producciones de producto terminado y semielaborados, y luego los costos fijos y variables, tal como se ejemplifica resumidamente en las Tablas 62, 63 y 64.

ITBA	RESULTADOS	Aumento de Productividad
-------------	-------------------	---------------------------------

Producción		sep-16 a dic-16	ene-17 a sep-19
CH1	Perforación	6.615	8.869
	Voladura	6.615	8.869
	Carga y Transporte	6.615	8.869
	Trituración	4.829	6.474
	Calcinación	3.187	4.273
	Hidratación	3.606	4.834
	Molienda	3.606	4.834
	Embolsado	3.606	4.834
CH2	Perforación	5.010	5.233
	Voladura	5.010	5.233
	Carga y Transporte	5.010	5.233
	Trituración	3.657	3.820
	Calcinación	2.414	2.521
	Hidratación	4.552	6.202
	Molienda	4.552	6.202
	Embolsado	4.552	6.202
	Filler	1.821	3.326
Total		8.158	11.036

Tabla 62. Volumen de producción de la Alt. 6, utilizados para calcular facturación, costos variables y costos fijos (utilizando también las productividades proyectadas).

Costos fijos		sep-16 a dic-16	ene-17 a sep-19
CH1	Perforación	\$ -	\$ -
	Voladura	\$ 8.969	\$ 9.912
	Carga y Transporte	\$ 24.119	\$ 26.656
	Trituración	\$ 125.817	\$ 139.051
	Calcinación	\$ 296.210	\$ 327.368
	Hidratación	\$ 81.063	\$ 82.874
	Molienda	\$ 197.830	\$ 245.901
	Embolsado	\$ 318.904	\$ 524.190
CH2	Perforación	\$ -	\$ -
	Voladura	\$ 6.792	\$ 5.849
	Carga y Transporte	\$ 18.266	\$ 15.729
	Trituración	\$ 95.285	\$ 82.051
	Calcinación	\$ 224.330	\$ 193.172
	Hidratación	\$ 108.120	\$ 106.309
	Molienda	\$ 351.008	\$ 201.940
	Embolsado	\$ 316.940	\$ 492.654
	Filler	\$ 5.520	\$ 245.377
CH1	Costo fijo total	\$ 1.052.912	\$ 1.355.953
CH2	Costo fijo total	\$ 1.126.261	\$ 1.343.080
Total	Costo fijo total	\$ 2.179.173	\$ 2.699.033

Tabla 63. Resumen de costos fijos proyectados para la alternativa 6, de acuerdo con el plan de inversiones y de medidas a ejecutar.

Costos variables	sep-16 a dic-16	ene-17 a sep-19
-------------------------	-----------------	-----------------

ITBA		RESULTADOS	Aumento de Productividad
CH1	Perforación	\$ 3.707	\$ 4.970
	Voladura	\$ 121.923	\$ 163.449
	Carga y Transporte	\$ 88.788	\$ 119.029
	Trituración	\$ 84.650	\$ 113.482
	Calcinación	\$ 730.364	\$ 979.119
	Hidratación	\$ 58.854	\$ 78.899
	Molienda	\$ 176.263	\$ 236.296
	Embolsado	\$ 1.054.960	\$ 1.414.269
CH2	Perforación	\$ 2.808	\$ 2.933
	Voladura	\$ 92.337	\$ 96.447
	Carga y Transporte	\$ 67.242	\$ 70.236
	Trituración	\$ 64.109	\$ 66.963
	Calcinación	\$ 553.129	\$ 577.753
	Hidratación	\$ 74.287	\$ 101.210
	Molienda	\$ 222.483	\$ 303.114
	Embolsado	\$ 1.331.594	\$ 1.793.855
	Filler	\$ 7.711	\$ 221.929
CH1	C variable total	\$ 2.319.511	\$ 3.109.513
CH2	C variable total	\$ 2.415.698	\$ 3.234.438
Total	C variable total	\$ 4.735.209	\$ 6.343.951

Tabla 64. Resumen de costos variables proyectados para la alternativa 6, de acuerdo con el plan de inversiones y de medidas a ejecutar.

En la Tabla 65 se presentan las proyecciones resultantes de costos unitarios para cada escenario.

ITBA		RESULTADOS												Aumento de Productividad			
		sep-16	oct-16	nov-16	dic-16	ene-17	feb-17	mar-17	abr-17	may-17	jun-17	jul-17	ago-17	sep-17	Año 2	Año 3	3 años
Alt 1																	
CH1	C unitario	935	945	945	944	944	943	942	940	939	938	937	936	934	931	930	934
CH2	C unitario	778	789	787	785	786	784	782	780	778	777	775	773	772	775	775	777
Total	C unitario	848	858	857	855	855	854	852	850	849	847	845	844	842	844	844	846
Alt 2																	
CH1	C unitario	935	935	935	935	917	917	917	917	917	917	917	917	917	917	917	917
CH2	C unitario	778	778	778	778	763	763	763	763	763	763	763	763	763	763	763	765
Total	C unitario	848	848	848	848	831	831	831	831	831	831	831	831	831	831	831	833
Alt 3																	
CH1	C unitario	935	935	935	935	935	935	935	936	933	930	928	926	923	916	916	922
CH2	C unitario	778	778	778	778	778	778	778	779	777	775	773	772	770	770	770	772
Total	C unitario	848	848	848	848	848	848	848	848	846	844	842	840	838	835	835	838
Alt 4																	
CH1	C unitario	935	943	907	907	907	907	907	907	907	907	907	907	907	907	907	908
CH2	C unitario	778	784	758	758	758	758	758	758	758	758	758	758	758	758	758	759
Total	C unitario	848	854	823	823	823	823	823	823	823	823	823	823	823	823	823	824
Alt 5																	
CH1	C unitario	935	935	935	976	976	976	976	976	976	976	976	976	976	976	976	973
CH2	C unitario	778	778	778	755	755	755	755	754	754	754	754	754	754	754	754	757
Total	C unitario	848	848	848	852	852	852	852	852	852	852	852	852	852	852	852	851
Alt 6																	
CH1	C unitario	935	935	935	935	924	924	924	924	924	924	924	924	924	924	924	925
CH2	C unitario	778	778	778	778	738	738	738	738	738	738	738	738	738	738	738	741
Total	C unitario	848	848	848	848	819	819	819	819	819	819	819	819	819	819	819	822

Tabla 65. Proyección de costos unitarios en \$/t para cada producto y alternativa. Apertura mensual durante el primer año y luego el resultado anual de los dos años siguientes.

	RESULTADOS	Aumento de Productividad
---	------------	--------------------------

Una vez calculados los ingresos por ventas, se calculan los márgenes brutos para cada alternativa, como se muestran en la Tabla 66.

		Año 1	Año 2	Año 3	3 años
Alt 1	CH1	9.515.173	10.450.564	10.473.862	30.439.599
	CH2	7.520.580	8.116.641	8.065.985	23.703.205
	Total	17.035.752	18.567.205	18.539.847	54.142.804
Alt 2	CH1	10.508.645	10.981.721	10.981.721	32.472.086
	CH2	8.357.711	8.816.666	8.816.666	25.991.042
	Total	18.866.356	19.798.386	19.798.386	58.463.128
Alt 3	CH1	9.719.978	10.960.838	10.999.649	31.680.465
	CH2	7.553.821	8.265.792	8.275.646	24.095.259
	Total	17.273.799	19.226.630	19.275.295	55.775.724
Alt 4	CH1	12.169.745	12.724.777	12.724.777	37.619.300
	CH2	9.755.087	10.250.000	10.250.000	30.255.087
	Total	21.924.832	22.974.778	22.974.778	67.874.387
Alt 5	CH1	7.620.355	6.972.976	6.972.976	21.566.307
	CH2	7.802.509	7.928.690	7.928.216	23.659.416
	Total	15.422.865	14.901.666	14.901.192	45.225.723
Alt 6	CH1	12.178.310	13.486.219	13.486.219	39.150.747
	CH2	11.222.135	13.113.302	13.113.302	37.448.739
	Total	23.400.445	26.599.521	26.599.521	76.599.486

Tabla 66. Margen Bruto proyectado para cada alternativa (todos los valores en pesos). El valor para los 3 años está descontado a una tasa de 17% correspondiente al Margen Bruto actual.

En la Tabla 67 se presentan todas las alternativas mencionadas y los valores determinados para cada una para la toma de decisiones.

#	Alternativa	Inversión, CapEx y Δ costos (k\$)	Margen Bruto (k\$)	Margen Bruto %	C _u CH1	C _u CH2
0	Actual	-	37.564	17%	929	778
1	Disp. mecánica + Utilización	2.926	39.696	17%	934	777
2	Aprovechamiento	-	42.945	18%	919	765
3	Productividad	120	40.840	18%	922	772
4	Turnos	4.549	49.862	19%	908	759
5	54% filler en CH2	-402	33.368	17%	973	757
6	54% filler en CH2 circuito paralelo	16.629	56.034	19%	925	741

Tabla 67. Alternativas y dimensiones a determinar para cada una. Los resultados de las determinaciones se utilizarán para seleccionar la mejor alternativa.

Cabe aclarar algunos criterios tomados para los cálculos, si bien no tienen un impacto significativo en la decisión a tomar:

- La Inversión en equipos e infraestructura ya montados de la Alternativa 6 no suma monto como inversión pero sí se asume su amortización como un costo, a efectos de contemplar su eventual reposición.
- Las inversiones amortizadas de acuerdo con el régimen acelerado, se recuperan en un plazo de 36 meses.

	RESULTADOS	Aumento de Productividad
---	------------	--------------------------

- No se considera inflación, ni en los precios ni en los costos. Por supuesto existe, y la historia demuestra que la inflación de los precios no ha podido alcanzar la de los costos, pero a efectos de seleccionar una alternativa el impacto es prácticamente el mismo para todos los escenarios. No es parte del estudio estimar el margen real, que implica un alto nivel de especulación hasta de orden político.

En cuanto al recupero de la inversión, relacionando la primera columna de la Tabla 62 con el margen bruto, se verifica la capacidad de repago. No es tan importante cuál de las alternativas recupera más rápido la inversión, sino simplemente corroborar que esto ocurre en no más de un año. Y esto se cumple para todos los casos.

En cuanto a la alineación con los objetivos organizacionales, sin entrar en detalle sobre cuáles son estos objetivos, se verifican disminuciones en los costos unitarios de los productos, y en las HH/t (productividad laboral o incidencia de la mano de obra en la tonelada producida). No así ocurre con los objetivos de eficiencia energética. En cuanto a objetivos comerciales, una mayor capacidad de producción permite acaparar mayor participación en el mercado, y en cuanto a los objetivos económico-financieros, hay una leve mejora en el margen bruto porcentual y en la relación activo corriente vs. pasivo corriente (liquidez), pero mostrar los resultados numéricos implica tener acceso a las finanzas globales, dado que se suman las finanzas de otras plantas y la administración centralizada.

4.2. Alternativa seleccionada

Dados los resultados de Margen Bruto (\$ y %), la sustentabilidad del proyecto, y el impacto en la competitividad de la CH2, se define avanzar con la propuesta de producir filler en el circuito paralelo.

A nivel financiero esta alternativa resulta más beneficiosa aún, ya que permite recuperar una inversión realizada anteriormente y gran parte de los costos considerados son amortizaciones o recuperos de inversión. Es decir que la caja generada en la práctica será mayor que lo que se estima como Margen Bruto.

Sin embargo, el impacto del proyecto no es suficiente para resolver completamente el problema de la empresa, y serán necesarias mayores inversiones para revertir la situación.

4.2.1. Volumen constante, punto de equilibrio

El presente estudio supone una demanda sobresaturada y que cada unidad producida adicional será vendida a igual precio que el actual. Es interesante verificar el comportamiento de los costos y resultados a igual volumen de producción que el actual. Si no pudiera aprovecharse el incremento en la capacidad de producción, el costo unitario de la CH1 se incrementa un 10%, y

	RESULTADOS	Aumento de Productividad
---	------------	--------------------------

el de la CH2 un 6%. El margen bruto desciende de 17% a 11%, y en volumen disminuye en 533.000 \$/mes.

En cuanto al punto de equilibrio, debido a que los costos y los niveles de producción van cambiando a medida que se ejecuta el proyecto, también cambia el punto de equilibrio, tal como se observa en el Gráfico 21.

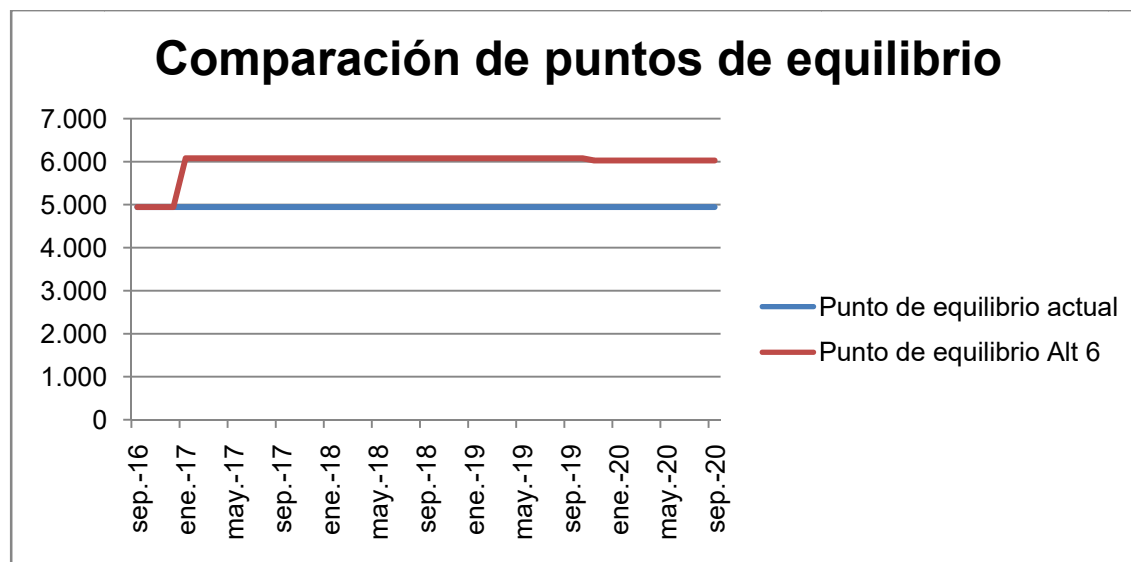


Gráfico 20. Punto de equilibrio actual vs. Proyectado para la alternativa 6. Se observa que una vez estabilizados los costos, el punto de equilibrio asciende a 6.000 t/mes en lugar de las 5.000 t/mes actuales.

4.2.2. Contingencias

En el análisis del proyecto, uno de los puntos que hubo que considerar es la humedad del descarte de trituración. Un material húmedo es propenso a aglomerarse y obstruir las grillas del molino de martillos, que es su primer paso dentro del circuito. Una vez que ingresa al molino de bolas el problema desaparece ya que el molino de bolas trabaja normalmente a 60°C, producto de la propia fricción del material y las bolas dentro de la cámara.

Por lo tanto es posible que deba instalarse un secador en el molino de martillos.

En cuanto al problema principal que originó esta situación, es probable que la inflación siga alterando la estructura de costos, y los rubros donde impactará dependerán en algún punto de decisiones políticas, difíciles de proyectar como variables fenomenológicas. Es por esto que independientemente de algunas medidas puntuales, cabe rescatar algunos conceptos que deberán guiar consistentemente la toma de decisiones, con el objetivo de mantener y asegurar la vigencia de los productos en el mercado, y quizás de la industria:

1. Prestar atención a las tendencias de consumo.

	RESULTADOS	Aumento de Productividad
---	------------	--------------------------

2. Reinvertir en tecnología y sistemas de información que permitan lograr la mayor eficiencia en costos a través de:
 - a. Menores consumos de materias primas e insumos.
 - b. Menor necesidad de mano de obra.
 - c. Equipamiento de fácil y económica reposición.
 - d. Mejor planificación, organización y control.
 - e. Mejor información para la toma de decisiones diaria y mediano y largo plazo.
3. Excelencia operativa.
4. Salud financiera.
5. Investigación y Desarrollo.

4.3. Impacto social

El proyecto de ampliación de la capacidad de producción permitirá darle continuidad al negocio de la cal hidráulica, manteniendo intactos en el corto plazo los puestos de trabajo actuales.

4.4. Impacto político

A nivel político es probable que el sindicato vea con buenos ojos un proyecto de este tipo. Sin embargo es importante concientizar que las tendencias productivas, en especial de los competidores, vienen dadas por empresas multinacionales cuyos modelos de negocio apuestan a la tecnología y con ella la sustitución del personal menos capacitado por personal más capacitado. Y por lo general con una reducción en la cantidad de operarios.

Es una tarea difícil la de mantener la misma cantidad de puestos de trabajo y a la vez ir migrando tecnológicamente y mantenerse competitivo, y es quizás el rol del Estado mediar a través de políticas soluciones de compromiso.

4.5. Impacto ambiental

El impacto ambiental es quizás uno de los puntos fuertes del proyecto, si bien no fue tenido en consideración para la toma de decisiones.

Por supuesto un mayor nivel de producción en los hornos generará un nivel proporcionalmente mayor de emisiones de CO₂, producto de la propia combustión y disociación térmica de la piedra caliza.

El cambio propuesto en la fórmula de fabricación del producto CH₂ permite aprovechar en mayor medida el yacimiento, ya que utiliza mayor cantidad de descarte de trituración. Fuera de eso, no se toman medidas concretas que puedan disminuir el nivel de emisiones, la generación de desperdicio, etc.

	CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	Aumento de Productividad
---	--	--------------------------

5. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

- Aprovechamiento de la energía liberada en el proceso de hidratación.
- Inversiones en tecnología de calcinación.
- Inversiones en molienda.
- Estudios de sensibilidad de precio.
- Análisis estratégico de precio vs. logística, dada la alta incidencia del costo del flete en el precio a cliente final.

	BIBLIOGRAFÍA	Aumento de Productividad
---	--------------	--------------------------

6. BIBLIOGRAFÍA

- Oates, Joseph A. H. 1998. Lime and Limestone: chemistry and technology, production and uses. 474 páginas. Editorial Wiley-VCH Variag GmbH, ISBN 3-527-29527-5.
- Duda, Walter H. 1977. Manual Tecnológico del Cemento 3. 340 páginas. Editorial Reverté S.A. ISBN 84-7146-095-5.
- Boynton, Robert S. 1980. Chemistry and Technology of Lime and Limestone. 578 páginas. Editorial John Wiley & Sons, Inc. Segunda edición. ISBN 0-471-02771-5.
- Norma IRAM 1508, Cal Hidráulica Natural, Hidratada, en polvo, para la construcción, diciembre 1985, CDU 666.925.1:691.51, CFA 5610. Revisión de la edición de noviembre de 1972.
- Operating and Maintenance Instructions, Maerz Lime Kiln AK 604 Manual. Maerz Ofenbau AG.
- Bond, Fred C. (1952), "The third theory of comminution", Transactions of the American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers. Páginas: 484-494.
- Bond, Fred C. (1958), "Grinding Ball Size selection", Mining Engineering, páginas 592-595.
- Bond, Fred C. (1961), "Crushing and grinding calculations, Part I-II.", Br. Chem. Eng. Páginas: 378-385, 543-548.
- Reference Document on Best Available Techniques in the Cement, Lime and Magnesium Oxide Manufacturing Industries, 2010, European Comission.
- Lime Hydration - Design Overview – Cimprogetti SRL, 2015.
- Desarrollo del proceso de la hidratación de la cal, O. Collarini, Diciembre 2012.
- Competence in Lime, Gebr. Pfeiffer - https://www.gebr-pfeiffer.com/uploads/doc/Lime_Kalkindustrie_EN.pdf - página vigente al 1 de marzo de 2017.
- Hazemag Hammer Mills, HUM/HNM - <http://www.hazemag.com/en/products/hammer-mills-hum-hnm/> - http://www.hazemag.com/fileadmin/user_upload/hazemag/pdf/Broschuer_e_engl/Minerals/170921_hazemag_hum_hnm_en_dd_low.pdf, - página vigente al 1 de octubre de 2017.

	BIBLIOGRAFÍA	Aumento de Productividad
---	--------------	--------------------------

- Mineralogy and Chemistry of raw materials and products - <http://www.stastier.co.uk/nhl/testres/minchem.htm> - página vigente al 1 de marzo de 2017.
- Mineralogy of binders and the Effects of Free Lime content and Cement addition in Lime Mortars - <http://www.stastier.co.uk/nhl/testres/mineralogy.htm> - página vigente al 1 de marzo de 2017.
- Simplified composition of lime binders - <http://limes.us/technical-info/simplified-composition-of-lime-binders/> - página vigente al 1 de marzo de 2017.
- Rosin, P.; Rammler, E. (1933), "The Laws Governing the Fineness of Powdered Coal", Journal of the Institute of Fuel. Páginas: 29-36.
- Grinding and milling in Cement Manufacturing, Clark Michael, Cem-Net e-learning 2011 (curso realizado por el autor).
- Ley Nacional 24.196 y Modificatorias – Régimen de Inversiones Mineras

Anexo I – Cales y Cementos

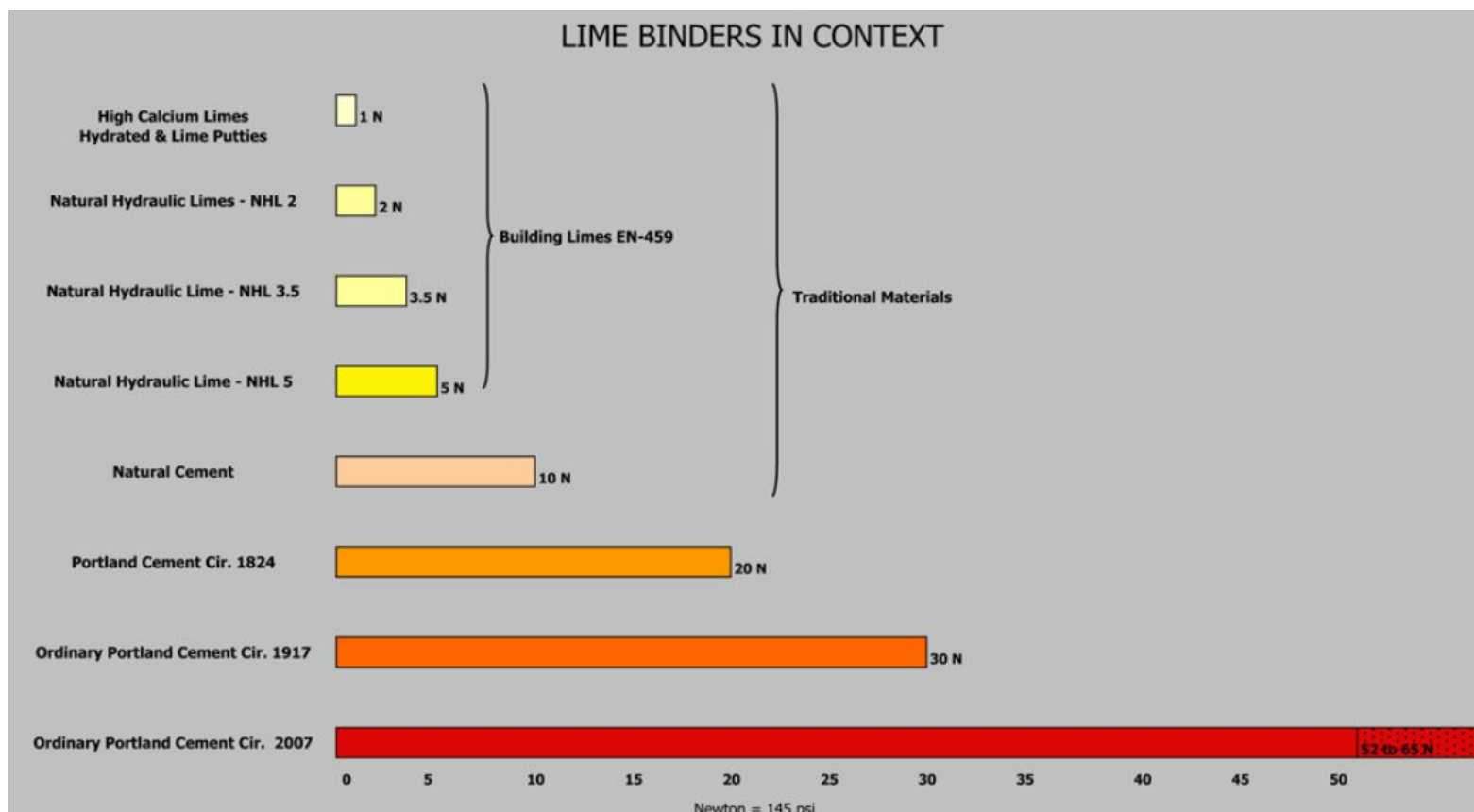


Ilustración 38. Cales hidráulicas según la norma EN-459. Se muestran en relación a los materiales que se obtienen variando las proporciones de sus compuestos. Fuente: <http://www.limes.us/technical-info/lime-binders-in-context/>

Anexo II: Otras configuraciones de fábricas de cal

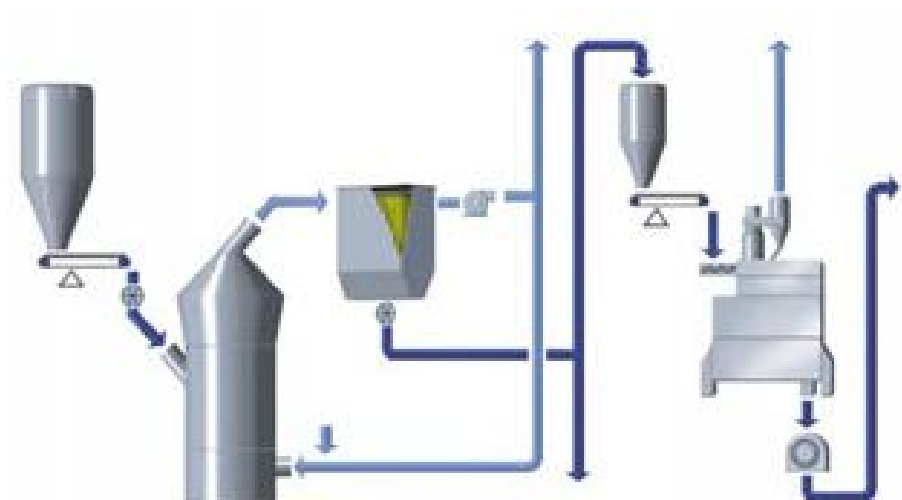


Ilustración 39. Fábrica de cal hidratada en la que sólo se hidrata la cal viva molida que es aspirada por el filtro de mangas.

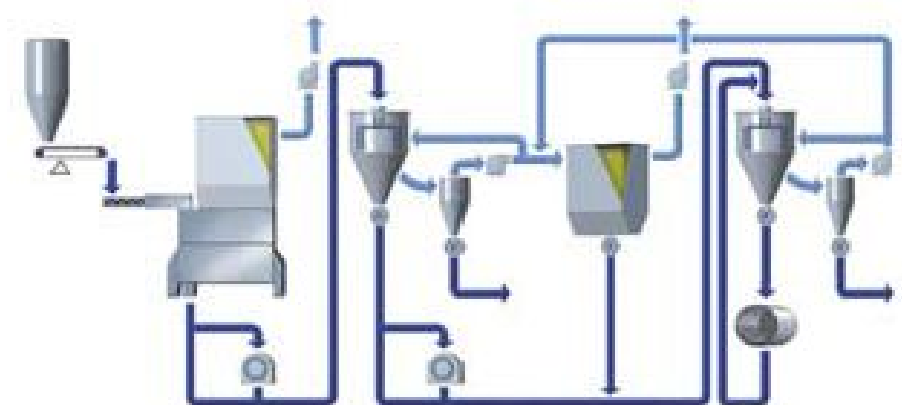


Ilustración 40. Fábrica de cal hidratada con circuito cerrado de clasificación (molino de bolas y separador dinámico).