



Universidad Zaragoza

MASTER EN SISTEMAS MECÁNICOS

ESCUELA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA

TRABAJO FIN DE MASTER

Optimización del Proceso de Selección y Dimensionamiento de Equipos en Instalaciones de Molienda

Autor: Ignacio Ortiz de Landazuri Suárez

Directora: M^a José Oliveros Colay

Curso Académico: 2011-2012

Junio 2012

OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE SELECCIÓN Y DIMENSIONAMIENTO DE EQUIPOS EN INSTALACIONES DE MOLIENDA

1 Resumen

El presente trabajo tiene como objetivo buscar una metodología adecuada para optimizar el correcto dimensionamiento de la maquinaria implicada en un proceso de molienda conocido.

Para ello se parte de los conocimientos adquiridos profesionalmente por el alumno en la empresa EZSA donde desarrolla su labor como Ingeniero de Proyectos desde el año 2005. EZSA es una empresa dedicada principalmente al diseño de plantas y maquinaria para la molienda en la industria cerámica.

Se detallará primeramente la descripción de los procesos de molienda, qué tipo de maquinaria se usa, qué tipos de procesos existen y qué problemática motivó este trabajo.

Seguidamente se parametrizarán cada uno de los elementos que componen la instalación buscando la forma más adecuada y aproximada para el fin buscado y se buscaran las soluciones a priori factibles.

Se procederá a una simulación discretizando el comportamiento de las soluciones a lo largo del tiempo para detectar incompatibilidades o cuellos de botella. Para ello se utilizará Matlab®.

Dada la alta factibilidad y el tiempo necesario de cálculo en la simulación se utilizará un algoritmo genético modificado para hallar la solución más correcta posible. Este algoritmo se programará también con Matlab®.

Finalmente se aplicará a cuatro problemas el algoritmo y se comparará los resultados con las soluciones adoptadas en la industria obteniéndose conclusiones válidas para ser aplicadas.

agradecimientos:

A mi directora de proyecto M^a José Oliveros Colay por su dedicación y su
implicación

a mi familia, sin vosotros esto habría sido imposible e impensable

a mi niña

1	Resumen	2
1.	Introducción: objetivos y alcance	6
1.1	Introducción	6
1.2	Objetivos y alcance	6
2	Descripción del problema	7
2.1	Descripción de la instalación	7
2.2	Descripción del problema	9
3	Revisión bibliográfica	10
3.1	Caracterización del proceso de molienda.	10
3.2	Optimización y Simulación del proceso	11
4	Caracterización del problema	13
4.1	Requisitos y Restricciones	13
4.2	Datos adicionales:	14
4.3	Simplificaciones e hipótesis de trabajo	15
5	Formulación del Modelo	16
5.1	Esquema General	16
5.2	Cálculo Estático	18
5.2.1	Parámetros Generales	18
5.2.2	Extrusora (k=0)	19
5.2.3	Molino de Martillos (k=4)	20
5.2.4	Desmenuzador (k=8)	24
5.2.5	Alimentadores de Banda (k=2 y 6)	28
5.2.6	Cintas Transportadoras (k=1,3,5,7 y 9)	31
5.2.7	Cantera (k=10)	33
5.3	Cálculo Dinámico: Simulación	34
5.3.1	Parámetros Generales	34
5.3.2	Extrusora (k=0)	36
5.3.3	Alimentadores de banda (k=2 o k=6)	37
5.3.4	Cintas Transportadoras (k=1,3,5,7,9)	39
5.3.5	Molino de Martillos (k=4)	41
5.3.6	Desmenuzador (k=8)	41
5.3.7	Cantera (k=10)	41
6	Resolución mediante método exacto	42
	Problema A	43
7	Algoritmo Evolutivo	47
7.1	Algoritmo Genético Estándar	48
7.2	Algoritmo Epigenético	52
8	Resultados	58
8.1	Validación Epigenético	58
	Problema A	59
	Problema B	60
	Problema C	61
	Problema D	62
8.2	Conclusiones Generales Resultados Algoritmos Epigenéticos.	65
8.3	Algoritmo Epigenético Vs Genético	66
8.4	Extensiones del Algoritmo Epigenético	68
9	Conclusiones y Trabajos futuros	73
10	Anexos	74

10.1	Bibliografía	75
10.2	Anexo: Esquemas de Instalaciones de Molienda	77
10.3	Anexo: Análisis de la Factibilidad	87
10.4	Anexo: Evaluación de parámetros del Algoritmo	90
10.4.1	Genético, Número de iteraciones: Nitergen	91
10.4.2	Genético, Tamaño de la Población :NPoblacion	92
10.4.3	Simulación, Resolución :delta	92
10.4.4	Simulación, Semanas de Evaluación :SemanasEvaluacion	93
10.4.5	Epigenético, Número de iteraciones :Itergenepi	95
10.4.6	Epigenético, Tamaño de la Población : NPoblacionepi	96
10.5	Anexo: Código Fuente Matlab®	98
10.6	Índice de Gráficos	126
10.7	Índice de Tablas	127
10.8	Anexo: Hardware	129

1. Introducción: objetivos y alcance

1.1 Introducción

Los procesos industriales llamados de molienda consisten básicamente en reducir el tamaño del material proveniente de la cantera a un tamaño adecuado y lo suficientemente homogéneo para su posterior procesamiento. Los procesos de molienda son comunes en cementeras, tratamiento de carbón, arcillas y minerales en general. También se encuentran en el tratamiento de residuos agrícolas, granos, productos farmacéuticos y cada vez más en los procesos de tratamiento de residuos sólidos urbanos.

El caso estudiado en este proyecto se ciñe al proceso de la molienda de las arcillas para la industria cerámica. Este proceso tiene dos variantes fundamentales como son vía seca y vía húmeda, centrándose este trabajo en la vía seca para la producción de ladrillos, tejas o similares. Se considera vía seca cuando la arcilla entrante en la fábrica tiene una humedad relativa menor al 10%. Esto implica el uso de Molinos de Martillos, Tamices en lugar de Laminadores y Cepilladores que se usan por vía húmeda.

Este proyecto tiene como origen la necesidad de racionalizar la toma de decisiones a la hora de diseñar e implantar un proceso de molienda nuevo. La empresa EZSA, donde desarrollo mi labor como Ingeniero de Proyectos, se dedica desde hace más de 30 años a la fabricación de maquinaria y diseño de instalaciones para la Industria Cerámica. Los criterios para el dimensionamiento de las instalaciones se basan en la experiencia acumulada y no tienen en cuenta el consumo energético de la maquinaria a lo largo de la vida útil de la instalación.

1.2 Objetivos y alcance

El objetivo del trabajo es establecer una *metodología para acometer el dimensionamiento correcto de un proceso de molienda*. El proceso de molienda objetivo del trabajo será por vía seca y dentro de la familia de estos (véase anexo) el más básico de ellos por ser constituyente de todos los demás procesos.

Entenderemos por dimensionamiento correcto aquel que permita cumplir las exigencias del cliente en cuanto a producción y granulometría con un *coste mínimo*. Este coste mínimo incluye tanto el coste de inversión como el coste derivado del consumo energético de la maquinaria a lo largo de los 10 años que se suelen considerar como periodo de amortización.

Se considerará unas características granulométricas fijas en la entrada y una limitación de altura de la maquinaria debido a la característica de la nave propiedad del cliente.

No es un problema de secuenciación de operaciones dado que estas son fijas pero sí que es un problema de dimensionamiento ya que hay que elegir qué maquinaria (capacidad productiva), en qué número y qué tolvas (capacidad volumétrica) se van disponer en cada una de las etapas. Dada la alta combinatoria posible tenemos un problema *np-hard* por lo que se procederá a desarrollar un *algoritmo evolutivo* para encontrar la solución óptima.

Sin embargo dado que el flujo de material a lo largo del proceso se va transformando de intermitente a continuo y a las características particulares de cada una las etapas no se puede asegurar a priori que no haya instantes donde se produzcan disfunciones en la instalación debido a cuellos de botellas.

Por lo tanto esta solución óptima se deberá validar mediante una *simulación*. Se establecerá un *Nivel de Servicio* mínimo que habrá de cumplir la instalación penalizando aquellas que no lo cumplan.

Esta simulación lleva un tiempo de cálculo elevado y dado que ha de aplicarse a cada solución encontrada se desarrollará un *nuevo algoritmo evolutivo* al que llamaremos *epigenético* para minimizar en lo posible el tiempo de cálculo.

Finalmente evaluaremos 4 problemas tipo y compararemos las soluciones encontradas con las usadas habitualmente en la Industria Cerámica.

2 Descripción del problema

2.1 Descripción de la instalación

Como paso previo a la descripción del problema objeto de este trabajo, se va a describir en qué consiste el proceso de molienda, junto con la instalación necesaria para ello.

La molienda consiste en la reducción del tamaño del material proveniente de la cantera hasta un tamaño adecuado para la *Extrusora*. El principal objetivo es obtener al final del proceso una producción continua de arcilla con unas características determinadas para alimentar a la *Extrusora*. Es en esta máquina donde se producen los ladrillos, tejas, baldosas o similares mediante la mezcla y amasado de la arcilla con agua caliente.

La *Extrusora* es la máquina que marca el ritmo de producción de la instalación ya que debe trabajar de forma continua con un suministro constante y uniforme de material, teniendo en cuenta un segundo condicionante como es que la arcilla que llega a ella debe de tener una granulometría específica y constante.

Así, se puede decir que la extrusora es “el cliente” con una *demanda continua y conocida*, de manera que la instalación previa debe garantizar dicho suministro mediante los equipos adecuados.

En cuanto a dicha instalación previa, la entrada del sistema es la *cantera*, o más correctamente la campa donde se deposita el material proveniente de la cantera para su posterior alimentación a la planta. La *cantera* es “el proveedor”. De manera contraria a lo que ocurre con la salida de material, la entrada de material se produce forma discontinua; bien alimentada por palas excavadoras o bien mediante camiones. Además las características de la materia prima no son constantes: la granulometría y dureza depende del tipo de arcilla, de la veta de origen, etc.; la humedad dependerá de la ubicación, de la época del año, etc. Esto se traduce en que tiene una *oferta discontinua y estimada*.

El principal objetivo es diseñar la instalación, tipos de equipos y cantidad de ellos capaces de reducir en sucesivas etapas el tamaño del material, incluyendo un conjunto de tolvas intermedias necesarias para dosificar la producción que

permita convertir un pulso de entrada irregular en un flujo constante de material a la extrusora.

En la selección del mejor diseño se tendrá en cuenta aspectos relativos al coste de la instalación propiamente dicha, así como también los costes debidos al consumo energético de los diferentes equipos.

0-Extrusora

1-Cinta Transportadora

2-Alimentador de Banda

3- Cinta Transportadora

4-Molino de Martillos

5- Cinta Transportadora

6-Alimentador de Banda

7- Cinta Transportadora

8-Desmenuzador

9- Cinta Transportadora

10-Cantera

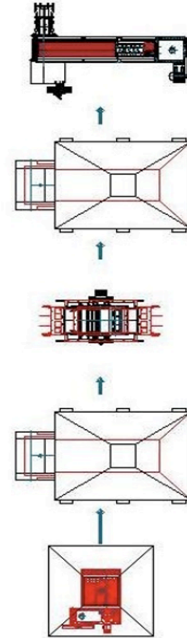


Figura 1: Esquema de una instalación de Molienda

En la Fig. 1 se representan los diferentes pasos y equipos que forman parte de una instalación de molienda. Los equipos encargados de la reducción de tamaño del material proveniente de la *cantera* son dos: los *Desmenuzadores* y los *Molinos de Martillos*.

El *Desmenuzador* es el encargado en recoger el material proveniente de la cantera, y su *misión* es fracturar el material mediante dos ejes horizontales provistos de picos o cuchillas que giran lentamente. El material a la salida tiene el tamaño adecuado para poder ser transportado por las cintas transportadoras y alimentar al molino de martillos.

El segundo equipo es el *Molino de Martillos*. Estos trituran el material proveniente del desmenuzador haciéndolo pasar por una parrilla agujereada de acuerdo a la granulometría impuesta por la extrusora. La trituración se produce por unos martillos que giran entorno a un eje horizontal a gran velocidad. Generalmente llevan un pequeño alimentador cuyo objetivo es dosificar, en la proporción óptima, la alimentación del molino. También suelen llevar unas resistencias para aplicar calor al material para eliminar el posible exceso de humedad que dificulta el proceso.

Para garantizar el flujo constante de material a la extrusora y también servir de pulmón, en la instalación se disponen los *Alimentadores de Banda*, cuyo objetivo consiste en dosificar el material de las tolvas que tienen encima de ellos con una producción constante y controlable; por eso también son llamados Dosificadores.

Finalmente para transportar el material entre las diferentes máquinas se usan las **Cintas Transportadoras**. Están formadas por estaciones de rodillos dispuestos en artesa que discurren a 1m/seg., dimensionándose en función de la producción. La inclinación máxima que pueden tener es de 23°.

Tanto el Desmenuzador como el Molino de Martillos trabajan con una producción fija, determinada por sus dimensiones, separación de ejes, tamaño de parrilla, etc. Esto significa que establecido el tipo de estos equipos, la producción es conocida y fija.

Por el contrario, los Alimentadores, gracias a variadores de frecuencia y tajaderas regulables, tienen un rango amplio de producción para cada modelo de equipo pudiéndose adaptarse dentro de ese rango fijo a las necesidades del momento.

2.2 Descripción del problema

El coste de la maquinaria a instalar en un proceso de molienda es muy elevado y aún en el proceso más simple alcanza fácilmente los 400.000€. Generalmente, el periodo de amortización considerado es de 10 años.

Normalmente a la hora de proyectar una nueva planta industrial se recurre a la experiencia y a los usos comunes para elegir qué maquinaria se va a utilizar. Si bien el cliente busca que el coste sea el menor posible no es habitual tener en cuenta el consumo energético que va a tener la planta a lo largo de la vida útil de la instalación. Sin embargo, este coste suele ser el triple del de la inversión, pudiendo llegar a ser hasta 10 veces superior.

Este gasto de energía en los procesos de molienda depende de la dureza, el tipo de máquina, la producción,..., y sobre todo de la relación entre el tamaño del material que entra y el material que sale. Este tamaño depende principalmente del tipo de parrilla que lleve el molino y de la separación de los ejes y el tipo de picos que lleve el desmenuzador. La decisión sobre cuanta reducción de tamaño se realiza en cada etapa debería optimizarse.

Para garantizar la producción requerida por la extrusora es necesario tener en cuenta que tanto el Desmenuzador como el Molino de Martillos trabajan con una producción fija determinada por sus dimensiones. Los Alimentadores, por el contrario, gracias a variadores de frecuencia y tajaderas regulables tienen un rango amplio de producción para cada modelo, pudiéndose adecuar a las necesidades de cada momento dentro de un rango fijo, tal y como se verá más adelante.

Si bien el flujo de trabajo es conocido y fijo, la cantidad de maquinaria trabajando en paralelo en cada etapa es variable, así como las capacidades de las tolvas que han de situarse para regular el caudal y conseguir un flujo constante de material en la extrusora. Sin embargo una combinación no adecuada de maquinaria y tolvas pueden dar lugar a cuellos de botella o sobredimensionamientos inesperados.

Esto sucede debido a que no se realizan simulaciones para comprobar si realmente el diseño cumple las expectativas de producción y calidad, dándose muchas veces el caso de ampliaciones, reformas o incluso renunciando a obtener la producción deseada por una mala combinación del equipamiento.

Esto último constituye la principal motivación para el desarrollo de este trabajo que se dividirá en dos partes: por un lado la optimización de la maquinaria necesaria para garantizar la producción con un coste mínimo y por otro lado la simulación de la solución encontrada para comprobar que efectivamente cumple con el objetivo deseado de dar esa producción de forma ininterrumpida.

3 Revisión bibliográfica

El trabajo a grandes rasgos se divide en dos grandes grupos:

- La caracterización del proceso de molienda.
- La optimización y simulación del proceso.

3.1 Caracterización del proceso de molienda.

Debido a que una de los aspectos introducidos en este proyecto es el consumo energético de la instalación, ha resultado imprescindible revisar diferentes aportaciones sobre este tema. Es importante resaltar que en este apartado, existe un conocimiento técnico de partida aportado por la empresa, ya que ésta lleva más de 30 años desarrollando maquinaria e instalaciones para la industria cerámica.

En primer lugar, el comportamiento a nivel de consumo energético de las cintas transportadoras sí es conocido y evaluado en la industria del sector. Rulmeca® (Rulmeca 2000) dispone de un manual de cálculo para dimensionar dichas cintas.

Para el resto de equipos, no existen manuales de cálculo energético, y es cada empresa la que dispone de un histórico de consumos, a partir del cual se “estima” el consumo energético de cada instalación.

Revisando la literatura sobre el tema, la trituración y su consumo energético ha sido ampliamente estudiado, pero este estudio sólo se ha aplicado a los molinos de bolas y no a los de martillo y desmenuzadores, que son objeto de este proyecto.

Así, ecuaciones teóricas y empíricas que describen la relación entre la energía consumida y la reducción de tamaño ya fueron propuestas por (Rittinger 1867), (Kick 1885) y (Bond 1952), siendo conocidas como las tres teorías de la trituración (the three theories of comminution). Walker et al. (1962) presentó la primera formulación general y, finalmente, (Hukki 1962) propuso la revisión de dicha formulación general, sugiriendo que la relación entre la energía y el tamaño combina parte de esas tres leyes.

En este trabajo, se han aceptado los supuestos de aplicación de estas leyes, y adoptando las constantes para adaptarlas a los datos históricos de la empresa. No es objetivo de este trabajo obtener la correspondencia real de la teoría con la práctica pero sí el encontrar una manera eficaz de estimar el consumo de la forma más sencilla pero con una aproximación aceptable. Con ese fin se han estudiado otras aproximaciones (Bitelli, Campbell and Flury 1999), (Miao, et al. 2011) (Ni, et al. 2011) (Shi, et al. 2003) (Trumic and Magdalinovic 2011). Así por ejemplo no tenemos en cuenta la relación entre la velocidad de los martillos y la energía consumida ya que esta velocidad es una constante del diseño de la maquinaria que no se va a optimizar.

Como en el modelo de producción estudiado no existen tamices, es decir, no se separa por granulometría, no ha sido necesario realizar la descripción detallada de cuál es la distribución granulométrica del material en los procesos de trituración. Asumimos que trabajamos con una distribución granulométrica normal, donde el consumo de energía no tiene relación con la distribución de la granulometría. En caso de existir tamices al cambiar la distribución granulométrica al separa una fracción de esta, la relación de tamaños en la materia a tratar sí tiene influencia en el consumo energético. En el caso de ser necesario, habría que adoptar un modelo de dimensión fractal para caracterizar dicha granulometría, tal y como aparece en (Etienne Parent, et al. 2011) y (Ni, et al. 2011).

3.2 Optimización y Simulación del proceso

La planificación y programación en los procesos industriales ha recibido una considerable atención por parte de la comunidad científica en las últimas décadas. Desde un punto de vista industrial, Grossmann (Grossmann 2005) observa que la optimización a nivel global de la empresa se ha convertido en una meta fundamental para poder competir en un mercado global. Un adecuado proceso de planificación es esencial para alcanzar beneficios económicos remarcables y para conseguir mantener la empresa en el mercado. Las categorías de problemas en este área incluyen características tales como plantas multiobjetivo y multiproductos, combinando flujos cíclicos de material, varios estados, lotes y productos de temporada. Destacar los trabajos de (Méndez, et al. 2006), (Floudas and Lin 2004) y (Kallrath 2002) en los que se describe los aspectos más importantes, así como el estado actual de la planificación y programación en los procesos químicos en la industria.

Por otro lado, las primeras programaciones matemáticas estaban basadas en una representación discreta del tiempo. Sin embargo estas formulaciones requieren un gran número de intervalos para representar con precisión el problema. Esto se traduce en un gran número de variables binarias asociadas a cada intervalo discreto de tiempo y a veces es numéricamente difícil de manejar.

En el diseño de nuevas plantas de este tipo de industrias hay que estudiar la interrelación entre la distribución en planta y la programación de la producción. Sólo de esta manera se mejorarán los objetivos económicos a largo plazo. Esto motivó la formulación de objetivos de optimización más complejos en un intento de determinar simultáneamente el óptimo dimensionamiento y la programación de la producción. (Floudas and Lin 2004) y (Castro, Barbosa-Póvoa and Novais 2005) proponen una aproximación en dos fases para el diseño de una planta de un solo producto por lotes-semicontinuo. Estas dos fases se resuelven adoptando una estrategia evolutiva. Otros ejemplos de uso de los algoritmos genéticos o evolutivos se encuentran en los trabajos de (Hopper and Turton 1999), (Reeves 1995) y (Xie, Gan and Gary Wang 2009).

Partiendo de estas premisas, se ha examinado la raíz del problema planteado donde se trabaja con un único producto de forma semicontinua y con el objetivo de dimensionar la maquinaria satisfaciendo la programación de la producción. Trabajos relacionados con la programación y el dimensionamiento de procesos productivos se encuentran en (Castro, Barbosa-Póvoa and Matos, et al. 2004), (Lin and Floudas 2001), (P.M. Duarte, O. Santos and S. Mariano 2008) y (Pantelides 1994), entre otros.

Una vez determinado el equipamiento de la instalación, la siguiente etapa consiste en simular el comportamiento en producción de la maquinaria. Para ello se discretizará el tiempo, utilizando variables para controlar el estado en cada instante. Respecto a este tema, en (Kondili, Pantelides and Sargent 1993) se presentan modelos de discretización y su justificación.

Uno de los aspectos claves es el método para determinar la maquinaria “óptima” en cada etapa. Debido a la complejidad del problema y a que es necesario simular las propuestas, resulta imprescindible la utilización de técnicas metaheurísticas que acorten el tiempo de computación aún a riesgo de no obtener la mejor solución.

Así, los Algoritmos Evolutivos son una buena opción para la resolución del problema. Éstos llevan a cabo búsquedas mediante la simulación de los procesos de evolución, selección natural y recombinación genética. Se basan en los procesos genéticos de los organismos vivos: a lo largo de generaciones las poblaciones evolucionan en la naturaleza de acuerdo con los principios de la selección natural y la supervivencia de los más fuertes (Darwin, 1859). Los principios básicos de estos algoritmos fueron introducidos por (Hollan 1975), y ha sido bien descritos por (Goldberg 1989), (Davis 1991), (Michalewicz 1992) y (Reeves 1995).

4 Caracterización del problema

Como se ha comentado en apartados anteriores, el objetivo del trabajo es diseñar una instalación de molienda para alimentar una extrusora, de manera que, cumpliendo una serie de restricciones propias del proceso y los requisitos de la extrusora, el coste de inversión y energético sea el mínimo posible.

Por diseño, se entiende la elección del tipo y cantidad de cada uno de los equipos, es decir, seleccionar tanto la capacidad productiva de las máquinas, la cantidad y capacidad de almacenamiento de sus tolvas así como la distribución de la reducción de tamaño realizada en cada etapa.

Existen una serie de restricciones o condicionantes que son estáticas ya que no cambian a lo largo del tiempo. Sin embargo, existen otras restricciones dinámicas ya que no se sabe que la maquinaria seleccionada es la adecuada hasta que se realice la simulación y se compruebe que el nivel de servicio es el requerido. Así, se puede dar el caso de que una máquina tenga el tamaño productivo ajustado y una tolva suficiente, pero si la máquina anterior se queda sin material para suministrarle no trabaje de forma adecuada.

Así, el cálculo de la solución tiene dos etapas:

- *Cálculo estático*: Deberá dimensionarse etapa por etapa y máquina por máquina para cumplir las restricciones del problema.
- *Cálculo dinámico*: Se deberá simular el comportamiento global de la solución para comprobar su funcionamiento.

En resumen, el proceso para dimensionar correctamente la planta consiste primeramente en buscar una solución que satisfaga los requerimientos estáticos y, posteriormente realizar una simulación para estudiar cómo se comporta realmente la solución elegida y comprobar si se cumple el Nivel de Servicio que constituye la restricción dinámica. La simulación se realizará discretizando el tiempo según (P.M. Duarte, O. Santos and S. Mariano 2008).

4.1 Requisitos y Restricciones

Estáticos:

- Producción anual [t/año]
- \varnothing_s [mm]: diámetro medio del material a la entrada de la extrusora
- \varnothing_e [mm]: diámetro medio del material de la cantera
- H [m]: altura máxima disponible en la nave que no pueden superar los equipos a instalar.

Dinámicos:

- $NS[\%]$: nivel de servicio, definido como el cociente en porcentaje de material entregado frente al solicitado.

4.2 Datos adicionales:

- $m[\%]$:Merms de material debidas al trasvase de material entre las máquinas y la perdida de humedad del material
- Periodo de amortización de la maquinaria, que en la mayoría de los casos es de 10 años
- Coste de la energía eléctrica: 58,47€/mWh (OMEL, 2011 CNE Boletín Mensual de Indicadores Eléctricos y Económicos)
- Distribución de la jornada, turnos, calendario laboral y horas por turno.
- Esquema de Molienda por vía seca básico.

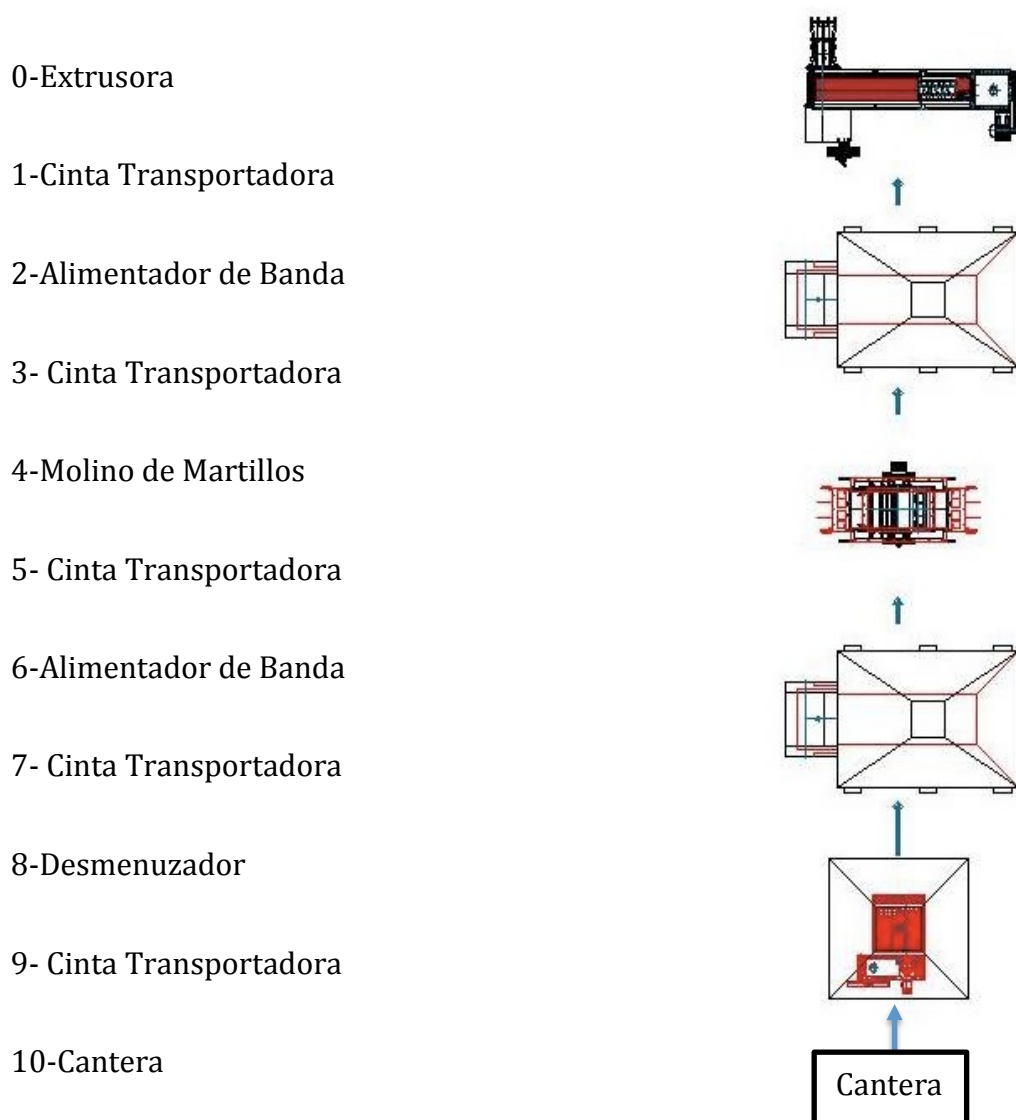


Figura 2: Esquema Molienda por vía Seca Básica

4.3 Simplificaciones e hipótesis de trabajo

Debido a la complejidad del proceso y con el objetivo de clarificar el proceso se toman las siguientes:

- Dureza del Material.

Se considera la dureza del material constante a lo largo del tiempo y conocida.

- Granulometría.

Se simplifica la distribución granulométrica y se considera el material homogéneo y de un determinado diámetro de entrada. Para determinadas aplicaciones como cuando se quiere eliminar el Carbonato Cálcico o cuando se quieren fabricar baldosas, la granulometría es importante. Para ello se disponen tamices en paralelo o en serie que van separando la fracción de material que requiere la aplicación.

En el caso de estudio, no es necesaria una descripción exhaustiva de la granulometría ya que lo único que hay que garantizar es que no se supera un diámetro medio de partícula.

- Densidad aparente.

Las máquinas tienen una capacidad de producción y de capacidad que depende lógicamente del caudal de tierra. Como se produce una reducción del tamaño de grano, la densidad del producto va cambiando a lo largo el proceso pudiendo oscilar entre 1,2 y 1,6 [t/m³]. Esta reducción deberá tenerse en cuenta para poder dimensionar correctamente los equipos. La densidad aparente del material va aumentando conforme se afina el material, y se ha considerado que se comporta de forma lineal de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$\rho = 1,60114 - 0,00114 \cdot \phi$$

- Humedad.

Siempre inferior al 10% para ser considerado el proceso de vía seca y por consiguiente se considera que no tiene influencia en todo el proceso.

- Maquinaria.

En cada etapa todos los equipos son iguales y con la misma capacidad.

5 Formulación del Modelo

5.1 Esquema General

En la figura 3 se presenta el esquema general del proceso de molienda. Cada etapa tiene asignado un índice ($k=0\dots 10$), siendo $k=0$ la extrusora y $k=10$ la cantera. Esto es debido a que la producción es tipo “pull”, y por lo tanto la extrusora tira de la producción y las siguientes etapas producen conforme la anterior solicita material.

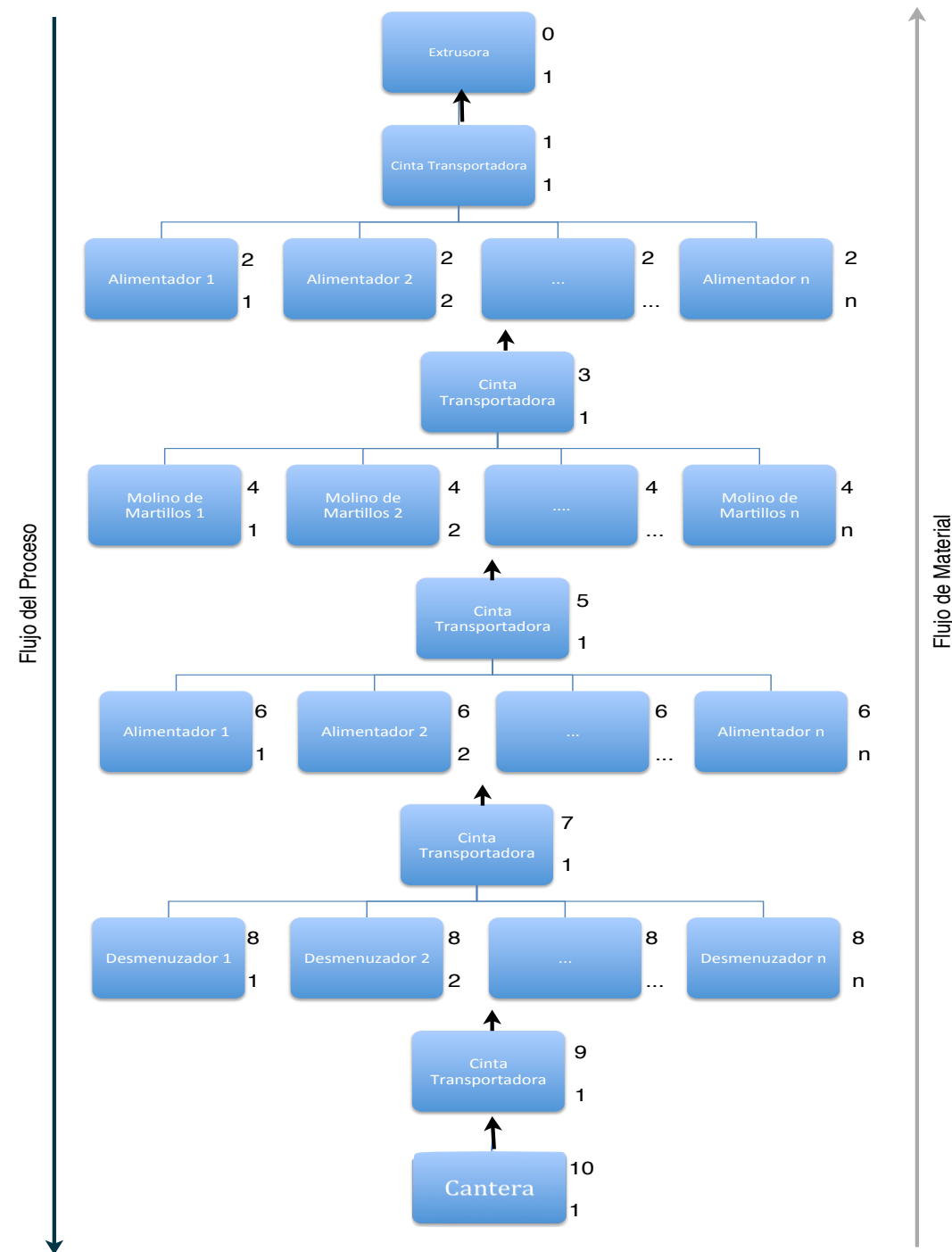


Figura 3: Esquema Parametrizado

En la figura 3, cada caja representa un equipo, el cual está identificado mediante cuatro índices, tal y como aparece en la figura 4

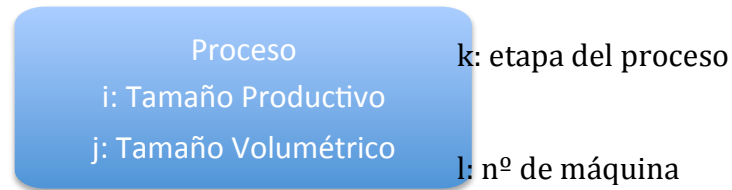


Figura 4: Elemento Parametrizado

Los índices de cada una de estas cajas hacen referencia a:

- k: etapa del proceso, con $k = \{0, \dots, 10\}$.
Así, $k=0$ es la extrusora; $k=4$ es el molino de martillos; $k=8$ es el desmenuzador; $k=2,6$ corresponde a los alimentadores; $k=1,3,5,7$ son las cintas que unen estos elementos; y $k=10$, la cantera.
- l: índice del equipo en la etapa, con $l = \{1, \dots, 5\}$.
Como se puede ver en el esquema, los Molinos de Martillos, los Desmenuzadores y los Alimentadores de Banda pueden trabajar en paralelo, pero sólo existe una cinta en cada etapa que comunica estos equipos. En principio, para las etapas 2-4-8 se considera que pueden trabajar de 1 a 5 máquinas aunque normalmente sea 3 el número máximo que se suelen disponer en las instalaciones.
- i: tamaño productivo de los equipos, con $i = \{1, \dots, 5\}$.
El tamaño productivo es el caudal que puede dar cada uno de los tipos de máquinas a seleccionar en las diferentes etapas (molino, desmenuzador, cinta,...), expresada en m^3/h . Como la densidad aparente aumenta con el afino de la granulometría, la producción en t/m^3 no es la misma para cada etapa, debiéndose ser calculada. En general, en cada etapa habrá como máximo 5 tipos de equipos de los que se seleccionará uno, ordenados de manera creciente de acuerdo con su tamaño productivo.
- j: tamaño volumétrico de los equipos, con $j = \{1, \dots, 6\}$.
El tamaño volumétrico es la suma de la capacidad de almacenaje de cada equipo y el volumen capaz de almacenar la tolva situada sobre dicho equipo. Puede que esa tolva sea inexistente ($j=1$) o que la tolva tenga una altura de 5m ($j=6$). En cada etapa la altura de las tolvas es igual para cada máquina, ya que de otra manera se complicaría el llenado mediante cintas de las tolvas. Como en el caso anterior, se ordenan de menos a más según la altura de tolva.

Con estos parámetros queda totalmente definido cualquier elemento del proceso. Así, por ejemplo, el proceso $k=3$; $l=4$; $i=2$; $j=3$ determina que es un Molino de martillos, que es la maquina 4ª en esa etapa, que su tamaño productivo es el segundo más pequeño y la altura de su tolva es de 4m.

5.2 Cálculo Estático

Se procede a describir todos los parámetros necesarios para caracterizar la instalación describiendo los parámetros generales que afectan a su conjunto como los relativos a cada uno de los elementos individuales. De tal forma que podemos realizar, para una selección de equipos determinada, un cálculo tanto del coste de la instalación como de su consumo energético.

Todos estos parámetros se programaran en Matlab® para realizar el cálculo.

Tiempo de cálculo= 0,03"

5.2.1 Parámetros Generales

Los datos generales son:

H [m] Altura máxima permitida y que no puede ser superada por ningún equipos.

h^k [m] Suma de las alturas de la máquina, la tolva y el margen que permite la carga y descarga.

P⁰ [t/h] Demanda solicitada por la extrusora, $P^0 = \sum p_{\tau}^0$

$$16 \frac{t}{h} < P^0 < 450 \frac{t}{h}$$

Ø⁰ [mm] Diámetro máximo requerido en la extrusora, dentro del rango {0,5...20} [mm]

Ø¹⁰ [mm] Diámetro máximo proveniente de la cantera, el cual se supone constante a lo largo del tiempo y menor de 400mm.

ρ^k [t/m³] Densidad aparente. Se calcula en cada instante en función del diámetro de las partículas, y cuyo rango de variación es {1,2...1,6}.

$$\rho = -0,00114 \cdot \phi + 1,60114$$

cm_i^k [€] Coste unitario de cada máquina en cada etapa, en función del tamaño productivo(i) y del tamaño volumétrico (j).

w_{it}^k Energía instantánea consumida en cada instante t por la i-máquina de la etapa k.

El periodo de amortización es de 10 años.

La función objetivo y restricciones que se van a aplicar son:

$$\min Z = (CM + CW) \cdot PE$$

siendo

CM [€] Coste total de la maquinaria $CM = \sum cm_{i,j}^k \cdot n^k$

W [kWh] Energía total consumida $\sum w_{it}^k$

CW [€] Coste energía consumida $CW = W \cdot \text{Coste energía}$

PE es la penalización debida a no alcanzar el Nivel de Servicio solicitado. Con el cálculo estático no podemos conocer cuál es Nivel de Servicio real por lo que se

considera que se cumple siempre y por eso $PE=1$, es decir no hay penalización. En el cálculo dinámico se analizará su comportamiento real.

Las restricciones que deben cumplirse son:

$h^k \leq H$ no se puede superar la altura máxima de la nave

$P^0 \leq P^k$ la capacidad productiva de cada etapa ha de ser igual o superior a la solicitada por la extrusora, teniendo en cuenta las mermas de material de todas las etapas

$$P^k = n^k \cdot P_i^k$$

siendo P_i^k la producción del elemento de la etapa k de tamaño productivo i y n^k el número de máquinas trabajando en paralelo en esa etapa.

5.2.2 Extrusora (k=0)

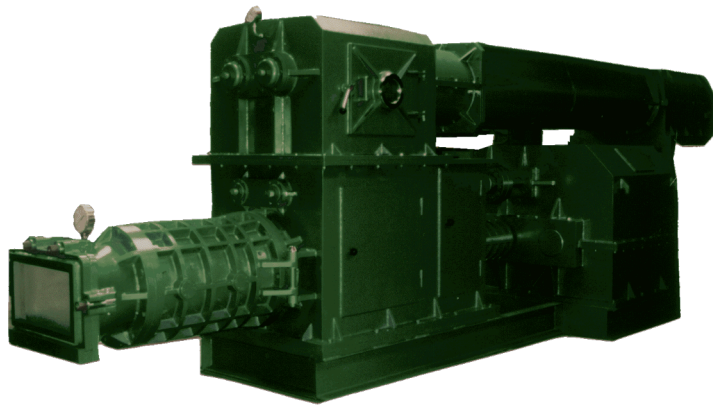


Figura 5: Extrusora

Es el “cliente” de la instalación, trabajando con demanda fija (tanto en producción como en granulometría) y en ciclos constantes. Su tarea consiste en amasar la tierra con agua en una proporción exacta para mediante extrusión y vacío producir los ladrillos, tejas o baldosas de acuerdo al molde que se disponga en la boca de salida.

Este equipo demanda una producción anual determinada, que en función de la distribución de la jornada, del calendario laboral, del número de turnos hay que traducir en una producción horaria a cumplir. En general, esta producción anual está entre 50.000 y 1.500.000 t/año, lo que supone producir entre 16 y 450 t/hora.

En función del producto a realizar, la granulometría demandada puede variar. En este caso, se ha supuesto un único producto, por lo que el diámetro exigido al material será fijo a lo largo del tiempo.

Se considera una altura de equipo de 2 metros, la cual interviene exclusivamente en el cálculo de la cinta que la alimenta. Al ser un elemento externo a la instalación diseñada, no se calcula su coste de máquina ni su consumo eléctrico.

5.2.3 Molino de Martillos (k=4)



Figura 6: Molino de Martillos

Consisten en varias hileras de rodets o discos donde se sujetan unos martillos oscilantes que giran a altas velocidades (120-190 km/h). Estos martillos golpean el material lanzándolo contra un rompiente o paladar que en la parte inferior se transforma en una chapa agujereada llamada parrilla por donde atraviesa el material de forma continua.

Estos equipos no pueden trabajar con tierra con humedad superior al 10%, y para asegurar las condiciones de trabajo llevan unas resistencias que calienten el paladar.

La forma y el tamaño de los agujeros depende de la granulometría, de la producción y de las características del material a tratar. Así como de los molinos de bolas existen numerosos estudios y bibliografía respecto a los molinos de martillos la información es más escasa. Por ello, se ha utilizado los datos históricos de la empresa para completar la información necesaria para dimensionar estos.

Los molinos de martillos no pueden trabajar por encima de su capacidad nominal puesto que terminan embozándose. Gran parte del trabajo de reducción de tamaño se produce por el roce de unas partículas de tierra con otras más que con el impacto del martillo. De hecho, el material que sale de la parrilla es empujado por el resto del material de tal forma que si se trabaja por debajo de su capacidad nominal su rendimiento es muy bajo.

Para garantizar que trabajan siempre con su capacidad óptima llevan en la parte superior un pequeño alimentador de banda que dosifica de forma continua el material. Sobre este Alimentador se dispone la tolva en función de las necesidades.

5.2.3.1 Dimensionamiento

En este proyecto se han considerado 5 tipos de molinos de martillos, $i=\{1,...,5\}$, correspondiendo cada uno a un tamaño productivo determinado, según se muestra en la Tabla 1

i	Modelo	Q [m ³ /h]	h[m]
1	MM/1-2	22	1,38
2	MM/1-3	32	1,38
3	MM/0-2	37	1,8
4	MM/0-3	50	1,8
5	MM/0-4	63	1,8

Tabla 1: Tamaño productivo AB

En este caso, la altura de tolva no puede superar la 4 metros, debido al tamaño de los equipos. La altura total de la etapa es la del molino más la del apoyo del mismo, la del pequeño alimentador de banda que lleva, la de la tolva y la de la altura necesaria para que descargue la cinta. Así, el tamaño volumétrico es $j=\{1,...,4\}$, y las alturas totales de equipo con la tolva se presenta en la Tabla 3.

j	1	2	3	4	5
h [m]	0	1	2	3	4

Tabla 2: Tamaño volumétrico MM

ij	1	2	3	4
1	4,875 m	5,875 m	6,875 m	7,875 m
2	4,875 m	5,875 m	6,875 m	7,875 m
3	5,3 m	6,3 m	7,3 m	8,3 m
4	5,3 m	6,3 m	7,3 m	8,3 m
5	5,3 m	6,3 m	7,3 m	8,3 m

Tabla 3: Alturas Etapa MM

Así, la capacidad de almacenamiento de cada unidad de esta etapa, depende del tipo de máquina y altura de tolva seleccionada, tal y como aparece en Tabla 4

ij	1	2	3	4
1	1,40 m ³	1,81 m ³	2,21 m ³	2,61 m ³
2	1,85 m ³	2,39 m ³	2,93 m ³	3,47 m ³
3	1,58 m ³	2,02 m ³	2,47 m ³	2,91 m ³
4	1,87 m ³	2,41 m ³	2,94 m ³	3,48 m ³
5	2,16 m ³	2,79 m ³	3,42 m ³	4,04 m ³

Tabla 4: Capacidades volumétricas etapa MM

5.2.3.2 Coste Maquinaria

Los costes de los equipos y tolvas se presentan en la Tabla 5 y 6.

i	Modelo	CM [€]
1	MM/1-2	76.105 €
2	MM/1-3	94.605 €
3	MM/0-2	108.000 €
4	MM/0-3	130.000 €

5	MM/0-4	145.000 €
---	--------	-----------

Tabla 5: Coste MM

ij	1	2	3	4
1	4.544,5 €	4.729,0 €	4.909,0 €	5.089,0 €
2	4.720,0 €	4.963,0 €	5.206,0 €	5.449,0 €
3	4.603,0 €	4.801,0 €	5.003,5 €	5.201,5 €
4	4.715,5 €	4.958,5 €	5.197,0 €	5.440,0 €
5	4.828,0 €	5.111,5 €	5.395,0 €	5.674,0 €

Tabla 6: Coste tolva MM

5.2.3.3 Consumo Energético

El molino consume básicamente al pulverizar la tierra mediante un mecanismo combinado de impacto y abrasión. Las variables que entran en juego a la hora de evaluar el consumo de energía son numerosas. Las más importantes son la dureza del material y la reducción de tamaño, pero también influye la distribución granulométrica del material, la humedad, la velocidad del rotor, la temperatura del material, la forma y distribución de los agujeros en la parrilla...

El consumo energético se puede atribuir a 3 causas:

a) Energía necesaria para la fractura del material.

Existen numerosos estudios sobre los mecanismos de fractura y pulverización de materiales pero no es objetivo de este trabajo el evaluarlos. La ecuación de Walker (Walker, et al. 1937) indica que *“La energía necesaria para provocar una reducción del tamaño de partícula es inversamente proporcional al tamaño de las partículas elevado a un exponente adecuado”*.

$$\frac{\partial E}{\partial D} = \frac{C}{D^n}$$

siendo C = constante que refleja la eficacia del proceso.

En esta caso, se utilizará la Ley de Bond (Bond 1952) que es la aplicación de la ley de Walker para $n=1.5$ cuyo uso está muy extendido para los molinos de bolas, de manera que el trabajo de pulverización, $wp[kwh]$, se puede calcular con la siguiente expresión:

$$wp = P \cdot C \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{\phi_e}} - \frac{1}{\sqrt{\phi_s}} \right)$$

$\phi_e [mm]$: Diámetro de entrada

$\phi_s [mm]$: Diámetro de salida

$P [t/h]$: Producción saliente del molino

$C = 18$, parámetro que engloba la dureza del material, la humedad, la velocidad de los martillos. De acuerdo al histórico de la empresa y teniendo en cuenta que la velocidad de los martillos siempre es la misma para las arcillas y que la dureza de la tierra no cambia, se ha determinado un valor de 18 para este parámetro.

- b) Consumo energético de las resistencias, $w_{ri}[kwh]$ o *energía consumida en calor*.

i	1	2	3	4	5
w_{ri}	24,2	24,2	35,7	43,4	50,3

Tabla 7: Consumo energía para el calor en MM

- c) Consumo energético del pequeño alimentador que le suministra la tierra, $w_{aj}[kwh]$ o *energía consumida por el alimentador del molino*.

j	1	2	3	4
$w_{aj} \cdot P$	0	0,038	0,063	0,088

Tabla 8: Consumo energía Alimentador de MM

De esta manera, el consumo total $w[kwh]$ es:

$$w = P \cdot C \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{\phi_e}} - \frac{1}{\sqrt{\phi_s}} \right) + w_{ri} + P \cdot w_{aj}$$

5.2.4 Desmenuzador (k=8)

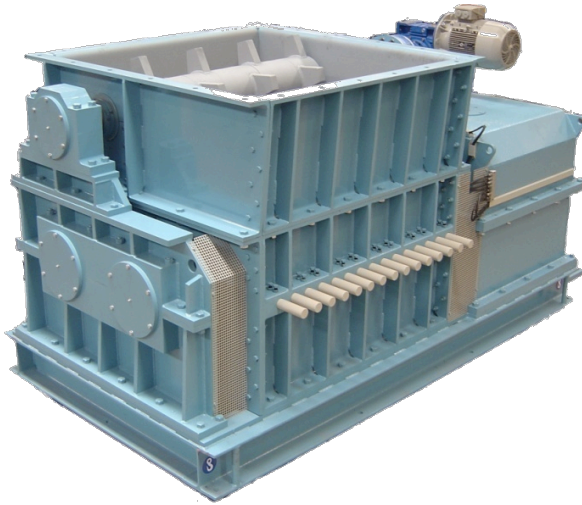


Figura 7: Desmenuzador

El desmenuzador consiste en una tolva que aloja dos ejes paralelos y horizontales provistos de picos o cuchillas que giran a distinta velocidad (típicamente uno al doble que el otro y a unas 20 rpm el más rápido). La granulometría buscada se consigue gracias a la separación de los ejes y al tamaño de los discos. Esta separación se fija en el diseño de la máquina. En algunos casos, se dispone de un tercer eje encima de los otros dos, cuya función es romper los puentes de tierra que puedan formarse encima de los ejes rompedores.

Para alimentar la máquina se sitúa encima de ésta una tolva con una altura que oscila entre los 3 y 4 metros. Esta máquina se suele disponer en el exterior de la nave de molienda por lo que la altura de la nave no supone una limitación.

El material con que se alimenta este equipo es el proveniente de la cantera, por lo que su granulometría depende de los medios extractivos utilizados y el tiempo de curado al que ha sido sometido (normalmente la tierra proveniente de la cantera se deposita en la campa cercana a la nave de molienda y se mezcla con la pala).

Con el objeto de proteger la máquina de rocas excesivamente grandes y por seguridad se dispone de una malla de vigas de acero encima de la tolva con una apertura de entre 400 a 200mm

5.2.4.1 Dimensionamiento

Para este caso, se han considerado 6 tipos de desmenzadores, $i=\{1,...,6\}$, correspondiendo cada uno a un tamaño productivo determinado, según se muestra en la tabla 9

i	Modelo	Q [m ³ /h]	h[m]
1	DE/3-1	23,1	1,15
2	DE/2-1	34,6	1,40
3	DE/2-2	42,3	1,40

4	DE/1-1	53,8	1,52
5	DE/0-1	100	1,82
6	DE/0-2	138,5	1,95

Tabla 9: Tamaño productivo DE

Como la altura de la nave no determina la altura máxima del equipo, se pueden utilizar las cinco alturas de tolva, es decir, el tamaño volumétrico es $j=\{1,...,5\}$. Las alturas totales de los equipos con las tolvas se presentan en la Tabla 11

j	1	2	3	4	5	6
h(m)	0	1	2	3	4	5

Tabla 10: Tamaño Volumétrico DE

ij	1	2	3	4	5
1	3,35	4,35	5,35	6,35	7,35
2	3,60	4,60	5,60	6,60	7,60
3	3,60	4,60	5,60	6,60	7,60
4	3,72	4,72	5,72	6,72	7,72
5	4,02	5,02	6,02	7,02	8,02
6	4,15	5,15	6,15	7,15	8,15

Tabla 11: Alturas de la etapa DE

Cada una de estas alturas combinadas con cada uno de los tamaños productivos tiene una tolva de capacidad en m^3 de:

ij	1	2	3	4	5
1	0,42	2,12	4,62	8,72	14,92
2	0,73	3,53	6,33	11,13	18,23
3	0,87	4,37	7,17	12,47	20,17
4	1,28	6,18	9,38	15,58	24,18
5	1,93	8,53	12,13	19,03	28,73
6	2,68	11,38	15,48	23,48	34,38

Tabla 12: Capacidades volumétricas de la etapa DE

Al igual que los molinos cada desmenuzador da, cuando se lo solicita, la producción para el que esta diseñado hasta que se queda sin material.

Como se ha comentado, el diámetro de entrada del material depende de cómo venga el material a la planta y es condición inicial del problema. El diámetro de salida del material es una de las opciones de diseño, pudiendo variar entre 10 y

100m. Dependiendo del tamaño de salida del material, equipos etapas posteriores como el Molino de Martillos tendrán que trabajar más o menos, por lo que esta granulometría influye en todo el proceso posterior.

Para ello, se ha tabulado la granulometría de salida en 5 tamaños diferentes.

b	1	2	3	4	5
\emptyset	10 mm	16mm	25mm	50mm	100mm

Tabla 13: Reducción de tamaño en el DE, b

5.2.4.2 Coste Maquinaria

Los costes de los equipos y tolvas se presentan en la Tabla 14 y 15.

i	Modelo	CM [€]
1	DE/3-1	42.460 €
2	DE/2-1	53.430 €
3	DE/2-2	70.250 €
4	DE/1-1	90.095 €
5	DE/0-1	108.860 €
6	DE/0-2	128.345 €

Tabla 14: Coste DE

ij	2	3	4	5
1	2.265,0 €	3.390,0 €	5.235,0 €	8.025,0 €
2	2.760,0 €	4.020,0 €	6.180,0 €	9.375,0 €
3	3.075,0 €	4.335,0 €	6.720,0 €	10.185,0 €
4	3.705,0 €	5.145,0 €	7.935,0 €	11.805,0 €
5	4.470,0 €	6.090,0 €	9.195,0 €	13.560,0 €
6	5.415,0 €	7.260,0 €	10.860,0 €	15.765,0 €

Tabla 15: Coste Tolva DE

5.2.4.3 Consumo

El desmenuzador consume básicamente al desintegrar los terrones de tierra mediante un mecanismo de cizalladura. Al igual que ocurre con el molino, las variables que entran en juego a la hora de evaluar el consumo de energía son numerosas. Las más importantes son de nuevo la dureza del material y la reducción de tamaño que se vaya a producir, aunque también influye la distribución granulométrica del material, la humedad, la velocidad de los ejes, la temperatura del material, la forma y distribución de las picos...

El consumo energético se puede atribuir a 2 causas:

- a) Energía necesaria para la fractura del material.

Para este proceso se aplicará la Ley de Kick (Kick 1885), forma integrada de la ley de Walker para $n=1$ cuyo aplicación es aceptable para partículas grandes. Así, el trabajo de pulverización, $w_p[kwh]$, se puede calcular con la siguiente expresión:

$$w_p = \frac{P \cdot C}{\eta} \cdot \ln \frac{\phi_e}{\phi_s}$$

$\phi_e[mm]$: Diámetro de entrada

$\phi_s[mm]$: Diámetro de salida

P [t/h]: Producción saliente del molino

C= 0,15, parámetro que engloba la dureza del material, la humedad, la velocidad de los martillos.

Para ajustar las observaciones con la fórmula, se ha introducido un rendimiento en función del diámetro de salida del material.

b	ϕ	η
1	10 mm	70%
2	16 mm	80%
3	25 mm	90%
4	50 mm	100%
5	100mm	90%

Tabla 16: Ajuste rendimiento en función del tamaño, DE

b) Energía consumida por el eje de picos o tercer eje, $w_i[kwh]$.

Este consumo es proporcional tanto al tamaño del desmenuzador como a la altura de la tolva que tiene encima

i	1	2	3	4	5	6
w_i	4	4	5,5	5,5	11	11

Tabla 17: Consumo tercer eje DE

Como el consumo de esta potencia depende de la altura de material que tenga encima, es necesario corregir el valor con un rendimiento, $\eta_j[kwh]$ o *rendimiento del tercer eje*.

j	1	2	3	4	5
η_j	20%	50%	70%	90%	100%

Tabla 18: Rendimiento tercer eje DE

De esta manera, el consumo total $w[kwh]$ es:

$$w = \frac{P \cdot C}{\eta} \cdot \ln \frac{\phi_e}{\phi_s} + w_i \cdot \eta_j$$

5.2.5 Alimentadores de Banda (k=2 y 6)



Figura 8: Alimentador de Banda

Los Alimentadores de Banda, también llamados Dosificadores, extraen el material de forma controlada de la tolva situada encima, mediante una banda transportadora de gran resistencia montada sobre una cama de rodillos planos. Estos rodillos son movidos por motorreductores controlado por un variador de frecuencia. En general, se les denomina dosificadores ya que tienen como misión alimentar de forma precisa a la máquina siguiente del proceso.

Los Alimentadores de Banda son de construcción robusta, con una tolva propia cuyo ancho aumenta del tambor tensor al tambor motriz para evitar que el material se apelmace. Llevan una tajadera regulable, con un eje con picos que rompe los posibles terrones de tierra que se formen y una cabeza motriz con un por un motorreductor comandado por un variador. Las relaciones de estos reductores suelen estar cerca de 1:3.000.

Suele disponerse encima de ellos una tolva de gran capacidad, normalmente de una altura de unos 4m, con detectores de mínimo, nivel de reserva, nivel máximo y nivel de seguridad en la cota más alta de la tolva para prevenir fallos del nivel de máximo.

Para situaciones extremas se siguen utilizando alimentadores de escamas que en lugar de banda utilizan escamas o lamas metálicas para transportar el material. Estos son necesarios para poder extraer el material de las tolvas donde se almacena el material ya que, al contrario de lo que sucede con otros materiales granulares como los cereales, la tierra no “fluye” con facilidad por lo que debe extraerse.

Pueden trabajar varios alimentadores en paralelo. Cuando alguno de ellos se queda sin material, el resto puede compensar la producción faltante gracias al variador. El variador permite una oscilación entre 30 y 70Hz y su frecuencia normal de trabajo es de unos 50Hz.

5.2.5.1 Dimensionamiento

Los Alimentadores de Banda tienen una anchura útil de 800, 1000, 1200 ó 1500mm con una longitud entre centros de 3, 4 ,5 y 6 m, que corresponde a 4 tamaños productivos de alimentadores, y para cada uno de ellos, 4 tamaños de capacidad disponibles. De esta manera, el índice $i = \{1..4\}$ y, tal y como se puede ver en la Tabla 17, debido a la unión de anchura con longitud, las capacidades

productivas se solapan. Por ello, en muchas ocasiones existen dos elecciones posibles para dar la producción requerida.

i	Modelo	Q [m ³ /h]
1	AB/8-3	10-40
2	AB/10-4	30-60
3	AB/12-5	50-80
4	AB/15-6	70-100

Tabla 19: Tamaño productivo AB

En el caso estudiado y para la primera etapa ($k=2$), la producción vendrá dada por las necesidades de producción de la extrusora por lo que tendrá que dar la producción exacta.

En la etapa $k=6$, alimenta un Molino de Martillos, o más exactamente la tolva que lleva el Molino de martillos, por lo que la producción simplemente deberá ser mayor que la mínima necesaria en esa etapa. Es decir si las mermas fueran cero y la producción en la extrusora fuera de 60 t/h, necesitaría dar 60t/h o más a la tolva del Molino de Martillos. Como las posibilidades son muchas, se limitan las opciones con un factor de multiplicación expresado por a de la siguiente forma:

a	1	2	3	4	5	6
x	1	1,1	1,2	1,5	2	3

Tabla 20: Multiplicador de la producción, a

Respecto al tamaño volumétrico, y a priori, no se puede descartar ningún altura de tolva, de manera que $j=\{1,...,5\}$.

j	1	2	3	4	5
h [m]	0	1	2	3	4

Tabla 21: Tamaño volumétrico AB

Como en casos anteriores, la altura total de la etapa es la de la máquina, junto con la del apoyo de la misma, la de la tolva, la de la tapa de la tolva y la altura necesaria para que descargue la cinta, es decir $h^k= 3,5m+h_j$. Pero, como siempre, esta altura total no puede superar la total de la nave. En la Tabla 22 se presenta la capacidad de cada conjunto en m³.

i j	1	2	3	4	5
1	1,34 m ³	1,66 m ³	5,66 m ³	9,66 m ³	16,66 m ³
2	2,48 m ³	3,52 m ³	9,52 m ³	16,52 m ³	27,52 m ³
3	3,94 m ³	6,06 m ³	14,06 m ³	25,06 m ³	39,06 m ³
4	6,12 m ³	8,88 m ³	20,88 m ³	35,88 m ³	55,88 m ³

Tabla 22: Capacidad en m³ de la etapa AB

5.2.5.2 Coste Maquinaria

Los costes de los equipos y tolvas se presentan en la Tabla 23 y 24.

i	Modelo	CM [€]
1	AB/8-3	32.000 €
2	AB/10-4	35.000 €
3	AB/12-5	39.000 €
4	AB/15-6	55.000 €

Tabla 23: Coste AB

i j	1	2	3	4	5
1	0	3.930 €	4.878 €	5.869 €	6.934 €
2	0	4.864 €	5.942 €	7.093 €	8.318 €
3	0	5.790 €	7.028 €	8.339 €	9.723 €
4	0	6.144 €	8.204 €	9.688 €	11.244 €

Tabla 24: coste tolva AB

5.2.5.3 Consumo Energético

Los alimentadores de banda consumen energía al extraer el material de la tolva. Esta energía es proporcional a la producción y al volumen de tierra desplazado. Además dispone de un eje de picos que rompe los terrones de tierra y cuyo consumo depende básicamente del ancho.

Como la velocidad de desplazamiento es muy baja, la potencia suele ser muy pequeña (4kw) en comparación, por ejemplo, a la de los molinos de martillos (200kw).

Así, el consumo total $w[kwh]$ es:

$$wm^k = \frac{L \cdot \mu \cdot 9,8}{3600 \cdot \eta} \cdot ps \cdot H + wi$$

L: Longitud del Alimentador[m]

H: Altura del Alimentador [m]

ps: Producción [t/h]

wi: Energía consumida por el eje de picos [kwh], según Tabla 19.

$\mu = 0,02$

$\eta = 65\%$

i	Denominación	L_i	w_i
1	AB/8-3	3	1,2
2	AB/10-4	4	1,3
3	AB/12-5	5	1,8
4	AB/15-6	6	2

Tabla 25: Consumo energético AB

5.2.6 Cintas Transportadoras (k=1,3,5,7 y 9)



Figura 9: Cinta Transportadora

Su misión es transportar el material de una máquina a otra. Consisten en una banda compuesta por varias lonas dispuesta sobre estaciones de rodillos dispuestos en artesa y movidos por un motorreductor en la cabeza de velocidad constante.

Su dimensionamiento no se elige, sino que está condicionado por las máquinas de las que recogen el material, de tal forma que su ancho debe de tener capacidad suficiente para transportar la máxima producción. Sin embargo, sí deben tenerse en cuenta a efectos de coste, consumo energético y simulación ya que sólo pueden alimentar una máquina cada vez.

Los anchos estándar (definidos por la anchura de la banda) que se suelen utilizar en la industria son: 500, 600, 650, 800, 1000 y 1200m.

Para facilitar el cálculo, no se va a utilizar un ancho estándar sino que se calculará uno teórico que se adapte a la producción máxima a transportar. Para ello se tendrá en cuenta que las cintas se desplazan a 1m/seg, así como la densidad, la velocidad y la producción a mover.

Las cintas transportadoras pueden llevar una inclinación máxima de unos 23°. Cuando recogen el material de varias máquinas en paralelo o cuando deben alimentar varias máquinas han de estar prácticamente horizontales. Generalmente el transporte entre diferentes etapas no se realiza por una única cinta sino que se van disponiendo a 90° en función del espacio en la nave y la disposición de la maquinaria. Se supondrá una cinta única que transporta el material entre etapas.

De acuerdo a las últimas instalaciones realizadas en la empresa, se ha calculado que la inclinación media es de 14°, y ésta será la inclinación supuesta para el problema.

La longitud de la cinta está determinada por el desnivel que han de salvar y por la inclinación de 14°.

5.2.6.1 Dimensionamiento

$$L[m] = \frac{h^{k-1}}{\sin(14^\circ)} \quad A[m] = \frac{P^k}{(\rho^k \cdot 0,0185 \cdot 3600)}$$

L: longitud de la banda transportadora

A: anchura de la banda transportadora

h^{k-1} : [m] desnivel. La cinta recoge el material a una cota de cero y lo eleva hasta la altura determinada por el tamaño de la máquina, de su apoyo y de la tolva que lleva encima.

p^k : [t/h] Producción a transportar

5.2.6.2 Coste Maquinaria

Únicamente a efectos de coste, el que tenga que recoger el material de una o más máquinas implicará que hay que añadir alguna cinta más y se contabiliza con un coste fijo de 2000€ por máquina. La segunda parte de la fórmula viene interpolar las tablas de precios vigentes en la ERZA

$$CM^k = 2.000 \cdot n^{k+1} + A \cdot (600 \cdot L - 2 \cdot L^2)$$

5.2.6.3 Consumo Energético

El consumo de una cinta transportadora se compone de una componente pasiva debida a pérdidas de carga por rozamientos internos, perdidas en el rascador,... y por la energía consumida para transportar una carga a una distancia y a una altura determinada.

a) Energía consumida por los rozamientos internos, w_r [kwh].

Para las cintas de la empresa, se ha calculado un valor medio de las pérdidas que van en proporción a su longitud y a su ancho.

$$w_r^k = A \cdot (-0,0193 \cdot L^2 + 25,05 \cdot L + 50,69) / 1000$$

A: Ancho de la Banda [m]

L: Longitud [m]

b) Consumo energético para mover el material, w_m [kwh].

Como en el caso anterior, se ha establecido una fórmula promedio del consumo de energía en función del rozamiento interno, desnivel a librar y de la producción.

$$w_m^k = p_e \cdot \left(\frac{9,8}{3600} \cdot h^{k-1} \cdot \left(\frac{\mu}{\tan 14^\circ} + 1 \right) \right)$$

con $\mu = 0,02$

h: Desnivel [m]

pe: Producción entrante en la cinta [t/h]

Con todo ello, el consumo total w [kwh] es:

$$w_t^k = \frac{C \cdot (w_m^k + w_r^k)}{\eta}$$

con $\eta = 82\%$

Se usa normalmente un factor C de corrección para asumir todas las pérdidas pasivas no asumidas anteriormente debidas a errores de montaje, desalineación de la banda...y que proporcionalmente son más importantes cuanto menor es la

longitud de la banda. Su valor es experimental y se tabula e interpola llegando a la fórmula: $C = 13,97 * L^{-0,472}$ (Rulmeca 2000).

5.2.7 Cantera (k=10)



Figura 10: Cantera

El material proveniente de la cantera alimenta los desmenuzadores mediante un pala excavadora o mediante camión. Cuando la tolva del desmenuzador alcanza su nivel de reserva demanda material mediante una alarma. El uso de pala o camión así como cualquier otro medio es potestad del dueño de la instalación y responde más a disponibilidad que a optimización por lo que su dimensionamiento se escapa del fin de este estudio.

Ahora bien en función de la altura de la tolva tendrá que disponerse una rampa más o menos elevada que supone un coste tanto por su ejecución como por el espacio que aloja. A veces, y para evitar su uso, se utilizan cintas transportadoras para alimentar la tolva del desmenuzador. En este proyecto, se ha supuesto este último caso para poder imputar costes debido a la altura de la tolva del desmenuzador.

5.3 Cálculo Dinámico: Simulación

Teniendo en cuenta que el proceso convierte un pulso de material en un flujo constante de material, será necesario discretizar el tiempo para poder realizar la simulación del proceso, (P.M. Duarte, O. Santos and S. Mariano 2008) .

Como se ha comentado, el sistema es de tipo “pull”. De acuerdo con esto, la extrusora demandará material y la máquina inmediatamente posterior le suministrará material mientras le sea posible. Para prevenir no quedarse sin material, cuando el material en su tolva baja de cierto nivel solicitará material a la máquina inmediatamente posterior a ella, y así sucesivamente. La solicitud de material se interrumpirá cuando la tolva llegue a cierto nivel para evitar el desbordamiento.

Hay que tener en cuenta que en cada etapa puede haber varias máquinas solicitando material y que la cinta que alimenta a esa etapa, en un instante determinado, sólo puede suministrar material a una única máquina, por lo que se tendrá que secuenciar el llenado de las tolvas en función de las necesidades.

Por todo esto deben definirse unos nuevos parámetros a incorporarse a los del cálculo estático que tendrán que adaptarse al cálculo dinámico. En cualquier caso, se considerará que en el instante inicial todas las tolvas están cargadas lo cuál es bastante próximo a la realidad.

Una vez parametrizado completamente el sistema, se puede simular el comportamiento de los equipos seleccionados, calculando el nivel de servicio obtenido con la instalación.

Para la programación del modelo se ha utilizado una herramienta de propósito general como es Matlab®. En este punto, se ha barajado la posibilidad de utilizar software específico de simulación, como por ejemplo Witness o Simio, pero en pruebas iniciales, se constató que el tiempo total de computación era mayor, ya que la comunicación entre programas ralentizaba esta opción. El tiempo de cómputo para ejecutar una simulación con Matlab® es de 61 segundos.

5.3.1 Parámetros Generales

5.3.1.1 Nivel de Servicio

La simulación tiene como objetivo principal calcular el grado de cumplimiento de la producción demandada por el conjunto de la Instalación. Este grado de cumplimiento se controla por el Nivel de Servicio, entendiendo éste como el cociente en porcentaje entre la producción demandada y la producción demandada.

$$NS = \frac{\text{producción anual entregada}}{\text{producción anual demandada}} \cdot 100$$

Una táctica habitual en problemas de optimización, sobre todo para aumentar la factibilidad o para cuando este espacio es muy complejo, consiste en transformar una restricción en un objetivo a alcanzar. Debido a que el nivel de servicio tiene una gran influencia en el coste de la instalación, y el cliente puede modificar este parámetro según el presupuesto, en este caso, se ha considerado que el nivel de servicio sea un objetivo a alcanzar y no una restricción.

Para ello, se ha introducido el concepto de penalización por no alcanzar el servicio deseado, modificando la función objetivo:

PE Penalización.

$$PE = \begin{cases} 1, & NS_{real} \geq NS \\ 1 + \frac{NS - NS_{real}}{10}, & NS_{real} < NS \end{cases}$$

De tal forma que el coste de la instalación queda de la siguiente forma:

$$\mathbf{C_{instalación} = (CM + CW) * PE}$$

Esto implica que habrá soluciones con un Nivel de Servicio excelentes pero caras, y otras, que a pesar de tener un Nivel de Servicio menor, sus costes son tan bajos que compensa su elección como óptima.

Esta penalización podría haberse pensado como un coste añadido pero dado la gran diferencia de coste entre diferentes instalaciones habría resultado una penalización excesiva en algunos casos y sin apenas influencia en otros.

5.3.1.2 Parámetros de simulación

En términos de simulación, un aspecto básico es el *horizonte de simulación*, o tiempo que se va a dejar funcionar al modelo. En este caso, y aunque el periodo de amortización sea de 10 años, no son los 10 años el horizontes, si no que se establece un periodo de evaluación de 1 ó 2 semanas ya que se considera representativo del comportamiento a lo largo de esos 10 años. La justificación de esos 10 años se puede encontrar en el *Anexo Simulación, Semanas de Evaluación*: *SemanasEvaluacion* pág 93

En cualquier caso, los resultados obtenidos para este horizonte se interpolarán a los 10 años de amortización.

Un segundo parámetro, es la *resolución*, ζ , o precisión de los cálculos definiendo los intervalos de hora discretos del tiempo. Hay que tener mucho cuidado en la elección de este parámetro ya que cuanto mayor sea esta valor, mayor precisión en los resultados, pero el tiempo de cálculo puede aumentar de forma exponencial.

$$\zeta = \frac{3600''}{t}$$

donde t el intervalo discreto de tiempo (si $t = 1 \text{ hora} \rightarrow \zeta = 1$)

Finalmente, se ha elegido $\zeta = 360$, lo que supone discretizar el tiempo en intervalos de 10". La justificación se encuentra en el *Anexo Simulación, Resolución*: *delta* pág. 92

5.3.1.3 Variables Binarias

Gobiernan toda la simulación

e_t^k : Vale uno cuando la etapa k solicita material a la etapa anterior ($k+1$) en el instante τ

on_t^k : Vale uno cuando la etapa k produce material en el instante τ

5.3.2 Extrusora (k=0)

La extrusora demanda material de forma continuada en el tiempo, pero como no tiene tolva, hasta que la cinta de k=1 no le suministra material, no se puede poner en marcha. Por ello, este intervalo de tiempo se considera como el periodo de calentamiento del modelo (sólo ocurre cuando se pone en marcha por primera vez la instalación), no teniéndose en cuenta a efectos de resultados, lo que haya ocurrido en este periodo.

Como la extrusora demanda material siempre y desde el primer instante:

$$e_t^{k=0} = \begin{cases} 1, & t > 0 \\ 0, & t = 0 \end{cases}$$

El nivel de servicio sólo se calculará a partir del instante T en que haya llegado material a la extrusora por primera vez, es decir, cuando $on_{t=T}^{k=0} = 1$. Para calcular este valor, hay que tener en cuenta que la extrusora se pondrá en marcha después de que la cinta que le suministra material haya cambiado su estado, es decir, $on_{t=T}^{k=1} = 1$, y así sucesivamente.

En general, cuando el elemento que suministra material es una cinta (k+1), se cumple la siguiente condición:

$$on_t^{k=0} = on_{t-1}^{k=1}$$

Las variables internas a la etapa necesarias para el cálculo dinámico son:

$ps_t^{k=0}$: producción demanda por la extrusora en el instante t.

$pe_t^{k=0}$: producción entregada a la extrusora en el instante t.

$u_t^{k=0}$: diferencia acumulada entre la producción pedida y la real

A continuación se puede ver cómo varían estas variables en función del tiempo. En estas expresiones, se presentan la interrelación que hay entre ellas, así como con los valores iniciales.

$$ps_t^{k=0} = P_o / \zeta$$

P_o es la producción horaria que deba dar la instalación $pe: P_o = 60 \text{ t/h}$

ζ es la resolución, = 360, es decir intervalos de 10"

$ps_t^{k=0}$ es la producción discreta que tiene que dar la extrusora

en este caso $60/260 = 0,166 \text{ t}$ en ese intervalo discreto de tiempo.

La producción que entra en la extrusora es la misma que sale de la etapa anterior (cinta transportadora) en el instante anterior.

$$pe_t^0 = ps_{t-1}^1$$

La diferencia acumulada entre la producción que debe dar la extrusora y la que realmente le llega se calcula según la siguiente expresión.

$$u_t^0 = pe_t^0 - ps_t^0 + u_{t-1}^0 \text{ con } u_0^0 = 0$$

Por último, la producción total a lo largo de todo el tiempo de simulación es:

$$PS^0 = \sum_{t=0}^{tmax} ps_t^0$$

5.3.3 Alimentadores de banda ($k=2$ o $k=6$)

Las variables necesarias para controlar en el modo dinámico los alimentadores de banda se pueden dividir en tres grandes grupos.

En primer lugar, están las variables que controlan cada una de las etapas, como son:

e [1,0]	Si alguna de las tolvas solicita material la etapa solicita material
on [1,0]	Si alguna máquina está disponible y la etapa anterior solicita material, los alimentadores proporcionan la producción solicitada o la más cercana a la solicitada.

Después se define $vmry$ para caracterizar el estado de cada una de las tolvas, tal y como se ve en la Tabla 26: Variables de control de las tolvas

Volumen Tolva	$vmry$	Acción
máximo	3	No pide material, disponible para trabajar
intermedio	2	No pide material aunque puede recibirlo. Disponible para trabajar
reserva	1	Pide material, disponible para trabajar
vacio	0	Pide material, no puede trabajar.

Tabla 26: Variables de control de las tolvas

El nivel de reserva de las tolvas se fija de acuerdo al que se utiliza en la realidad (Nivel de Reserva: 40%) aunque sería un parámetro susceptible de ser optimizado.

Un aspecto a tener en cuenta es que en una etapa pueden existir varias tolvas, y más de una solicitando material a la vez. Como físicamente sólo pueden llenarse de una en una, se procederá de forma secuencial, sin cambiar a la siguiente hasta que la tolva no haya llegado a su nivel máximo.

Las tolvas de los molinos de martillos y del desmenuzador son equivalentes y se comportan del mismo modo.

El último grupo de variables son las que definen en todo instante el estado del Alimentador.

pe_t^k : producción de entrada en el instante t

ps_{ti}^k : producción de salida en el instante t del Alimentador l

ρ^k : densidad de la tierra en la etapa k

qe_t^k : caudal de entrada en el instante t $qe_t^k = \frac{pe_t^k}{\rho^k}$

qs_{tl}^k : caudal de salida en el instante t del Alimentador l $qs_{tl}^k = \frac{ps_{tl}^k}{\rho^k}$

v_{tl}^k : volumen de material en la Tolva l

$$v_{tl}^k = v_{tl-1}^k + qe_{t-1}^k - qs_{t-1}^k$$

El volumen de material en la tolva en el instante t es el existente en el momento anterior más el caudal que entra menos el que sale en ese periodo discreto de tiempo.

5.3.3.1 Esquema de Funcionamiento

Como el caudal de material saliente de los alimentadores es variable debido a los variadores de frecuencia, se puede regular de una forma amplia para cumplir con los requerimientos de producción.

Cuando hay más de un alimentador de banda trabajando en paralelo hay muchas opciones de configurarlos: pueden pensarse el control de los mismos para que trabajen siempre de forma individual, de uno en uno, o que la producción la tengan que dar trabajando todos al 100%. Para garantizar que en el mayor número de casos posibles se cubra la producción deseada se utiliza el siguiente criterio para calcular la producción de cada Alimentador.

Si $n=1$ $P^k = P^{k-1}$

Si $n>1$ $P^k = P^{k-1}/0.6*n$

El alimentador gracias al variador puede dar:

$P_{max} = P*1,4$ (70Hz)

$P_{min} = P*0,6$ (30Hz)

Así por ejemplo, si la producción que tiene que dar la etapa es de $P^{k-1}=100$ t/h según el número n de alimentadores, se dispone una tabla donde aparecen las diferentes posibilidades de producción. Primero, cuando están todos los alimentadores disponibles o cuando alguno de ellos no está disponible.

P_{50Hz} representa la producción elegida para el desmenuzador, que conociendo a que caudal corresponde, se puede averiguar los modelos de Alimentador que pueden encajar.

n	n disponible		P unit nec	
2	$P_{50Hz} = 83,3$	$P_{max} = 116,7$	2	50 ok
		$P_{min} = 50,0$	1	100 ok
3	$P_{50Hz} = 55,6$	$P_{max} = 77,8$	3	33,3 ok
		$P_{min} = 33,3$	2	50,0 ok
			1	100,0 mal
4	$P_{50Hz} = 41,7$	$P_{max} = 58,3$	4	25,0 ok
		$P_{min} = 25,0$	3	33,3 ok
			2	50,0 ok
			1	100,0 mal
5	$P_{50Hz} = 33,3$	$P_{max} = 46,7$	5	20,0 ok
		$P_{min} = 20,0$	4	25,0 ok
			3	33,3 ok
			2	50,0 mal
			1	100,0 mal

Tabla 27: Ejemplo de distribución de la producción en ABs

En rojo aparecen los casos donde la producción necesaria por Alimentador es superior a la capacidad máxima. Con este criterio de diseño, se garantiza que aunque haya algunos alimentadores no disponibles, en la mayoría de los casos se puede dar la producción.

En el caso de que la producción requerida excediera la capacidad del alimentador, éste daría la máxima disponible.

5.3.4 Cintas Transportadoras (k=1,3,5,7,9)

En este caso, las variables que controlan cada una de las etapas son las mismas. Así, si la maquinaria a la que sirve la tierra pide material, la cinta solicita material a la máquina siguiente.

$$e_t^k = e_t^{k-1}$$

Por otro lado, si la máquina de la que saca el material esté en marcha, la cinta se pone en funcionamiento.

$$on_t^k = on_{t-1}^{k+1}$$

Las variables que definen el estado de las cintas transportadoras se formulan como sigue.

pe_t^k : Producción que entra en la cinta en el instante t

ps_t^k : Producción que sale de la cinta en el instante t

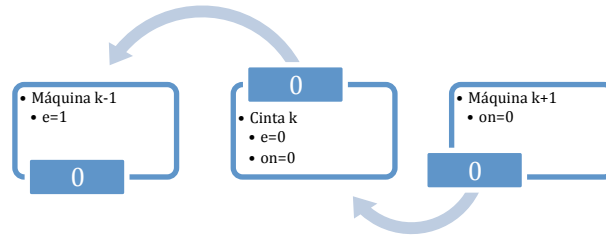
m [%]: mermas de material 0,5%...5%

$$ps_t^k = pe_{t-1}^k \cdot (1 - m)$$

$$pe_t^k = ps_t^{k+1}$$

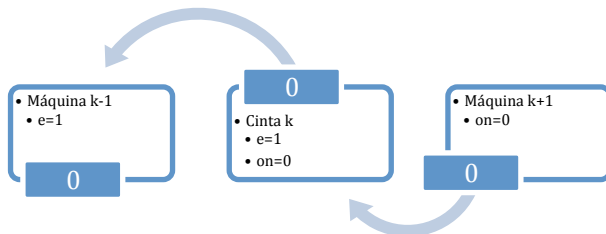
5.3.4.1 Esquema funcionamiento

Para reconocer el funcionamiento de este equipo, se presenta a continuación su evolución en 4 instantes de tiempo consecutivos. En el primer instante (t) la máquina (k-1) reclama material, $e_t^{k-1}=1$.



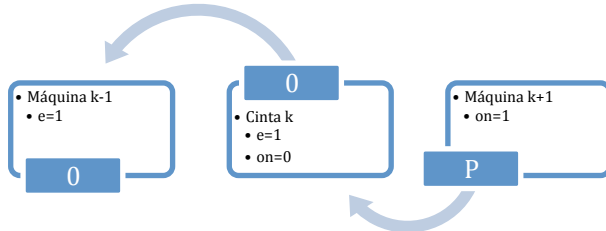
Instante 1

En el instante 2, la cinta (k) reclama material a la máquina siguiente, $e_{t+1}^k=1$.



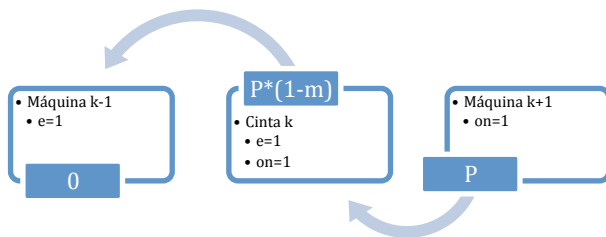
Instante 2

En el instante 3, la máquina (k+1) se pone en funcionamiento $on_{t+2}^{k+1} = 1$ y entrega una producción P a la cinta.



Instante 3

En el instante 4, la cinta entrega la producción $P*(1-m)$ a la máquina que había solicitado el material, y esta máquina ya se puede poner en funcionamiento, $on_{t+3}^{k-1} = 1$



Instante 4

5.3.5 Molino de Martillos (k=4)

Las variables que controlan el estado de esta etapa son las mismas que del resto de etapas.

e [1,0]	Si alguna de las tolvas solicita material la etapa solicita material
on [1,0]	Si alguna máquina está disponible y la etapa anterior solicita material, el molino de martillos se pone en marcha.

A éstas, hay que añadir las que controlan el estado de cada una tolvas, las cuales ya han sido comentadas en el apartado de cintas de banda.

El resto de variables son las mismas que las de los alimentadores y controlan la producción, el caudal y el volumen en cada instante de cada máquina.

Comentar que cada molino da, cuando se lo solicita, la producción para el que está diseñado hasta que se queda sin material, pudiendo funcionar varios en paralelo.

El diámetro de salida del material vendrá obligado por el que demande la extrusora que es condición inicial del problema. El diámetro de entrada del material vendrá determinado por el de salida del desmenuzador.

5.3.6 Desmenuzador (k=8)

5.3.6.1 Variables Binarias

Las variables que controlan el estado del desmenuzador son:

e [1,0]	Si alguna de las tolvas solicita material la etapa solicita material
on [1,0]	Si alguna máquina está disponible y la etapa anterior solicita material, el desmenuzador se pone en marcha.

Hay que añadir las mismas variables que a los alimentadores para controlar la producción, el caudal y el volumen en cada instante de cada máquina.

Al igual que los molinos cada desmenuzador da, cuando se lo solicita, la producción para el que esta diseñado hasta que se queda sin material, pudiendo funcionar en paralelo varios Desmenuzadores.

5.3.7 Cantera (k=10)

Se supone que siempre disponen de material así como que la pala o camión siempre está disponible.

on [1,0]	Siempre esta disponible y se pone en funcionamiento cuando se le demanda material. Multiplica la cantidad estándar demandada por 3. De esta forma se simula la introducción de los camiones o las palas de material en el sistema.
-----------------	--

6 Resolución mediante método exacto

En una primera aproximación se va a valorar la utilización de un método exacto para la resolución del problema. Estos métodos (p.e. enumeración, ramificación y acotación, etc.) tienen la ventaja de que se obtiene la solución óptima, pero presentan grandes inconvenientes, ya que son lentos y sólo resuelven problemas pequeños o problemas grandes con ciertas características particulares.

En este apartado se va a determinar el número total de soluciones que presenta el problema, así como cuántas de éstas cumplen con todas las restricciones, ya que gran parte del éxito de estos métodos radica en que el espacio de factibilidad sea reducido para que el tiempo de computación sea razonable. Una de las primeras cuestiones a tener en cuenta es que, en la mayoría de los casos, es necesario simular el comportamiento a lo largo del tiempo para determinar si una solución propuesta es factible o no.

Para ello, en una primera etapa se va a establecer el número total de soluciones que se pueden enumerar para el caso básico, teniendo en cuenta el nº de elementos diferentes que se pueden escoger en cada etapa. En este caso, la única restricción a imponer es que la producción de cada etapa sea la necesaria para cumplir con la producción requerida por la extrusora, teniendo en cuenta las pérdidas de material en el transporte. La cuestión es que esta condición siempre se cumple, ya que los diseñadores ya reconocen este tipo de necesidades para escoger los equipos a estudiar.

Sea:

m: Porcentaje de pérdidas en el transporte del material.

Ps^0 : Producción demandada por la extrusora.

y teniendo en cuenta los tipos de equipos, tolvas, cintas en cada etapa, así como la cantidad de éstos en cada una, el número total de soluciones es de 4.500.000.000, según se puede ver en la tabla siguiente: Combinatoria General

k:2 AB. Alimentador de banda	<i>Combinatoria=5·4·5=100</i>
n [1...5] Nº de máquinas en paralelo i [1...4] Rango productivo j [1...5] Tamaño volumétrico	$Ps^k = \frac{Ps^0}{(1-m)^{k/2}}$ $P_i = \begin{cases} Ps^k, & n = 1 \\ \frac{Ps^k}{0,6 * n}, & n > 1 \end{cases}$
k:4 MM. Molino de Martillos	<i>Combinatoria=5·5·4=100</i>
n [1...5] Nº de máquinas en paralelo i [1...5] Tamaño productivo j [1...4] Tamaño volumétrico	$Ps^k \geq \frac{Ps^0}{(1-m)^{\frac{k}{2}}}$

$P_i = \frac{PS^4}{n}$	
k:6 AB. Alimentador de banda	<i>Combinatoria</i> =5·4·5·6=600
n [1...5] N° de máquinas en paralelo	$PS^k = a \cdot \frac{PS^0}{(1-m)^{k/2}}$
i [1...4] Rango productivo	$P_i = \begin{cases} PS^k, & n = 1 \\ PS^k \\ 0,6 * n, & n > 1 \end{cases}$
j [1...5] Tamaño volumétrico	
a [1..6] multiplicador producción	
k:8 DT. Desmenuzador	<i>Combinatoria</i> =5·6·5·5=750
$\emptyset_e^{10} \leq \emptyset_{es}^8 \leq \emptyset_s^0$	
n [1...5] N° de máquinas en paralelo	$PS^k \geq \frac{PS^0}{(1-m)^{\frac{k}{2}}}$
i [1...6] Tamaño productivo	$P_i = \frac{PS^4}{n}$
j [1...5] Tamaño volumétrico	
b [1...5] Diámetro salida material del desmenuzador	
k:10 CN Cantera	<i>Combinatoria</i> =1
a=3	$PS^2 = a \cdot \frac{PS^0}{(1-m)^{k/2}}$

Tabla 28: Combinatoria General

$$\text{Combinatoria total} = 100 \cdot 100 \cdot 600 \cdot 750 \cdot 1 = 4.500.000.000$$

Para calcular cuantas soluciones del total son factibles, se va a estudiar un caso tipo ,que llamamos problema A.

En él las restricciones estáticas se puede clasificar como medias, es decir, las características del problema reducirán el número de soluciones de manera considerable, pero hay otros casos, en que esta disminución es menor.

Problema A

<i>Requerimientos del cliente</i>	
Ps ⁰ (producción requerida)	145 t/h
NS (nivel de servicio)	98%
∅ _s ⁰ (diámetro salida del material)	10mm
<i>Características de cintas y nave</i>	

ϕ_e^{10} (diámetro medio del material de cantera)	250mm
H (altura máx útil de nave)	6m

Tabla 29: Enunciado Problema A

Sujeto a:

<i>Distribución de la jornada</i>	
7,5 horas/día 2 turnos/día 6 días/semana 52 semanas/año	
<i>Otros</i>	
Coste Electricidad	58,47 €/MWh
m (mermas de material en su manipulación)	4%
Semanas de evaluación	1

Tabla 30: Condiciones Generales de los problemas tipo

Aplicando estas restricciones estáticas, el número total de soluciones factibles es de 3.555.720 (ver desarrollo en **ANEXO FACTIBILIDAD**), habiéndose reducido la combinatoria tal y como puede verse en la tabla siguiente: Resumen Factibilidad

Etapas	Combinatoria total	Combinatoria factible
k:2, alimentador de banda	100	18
k:4, molino martillos	100	
b = 2		16
b = 3		17
b = 4		16
b = 5		16
k:6, alimentador banda	600	84
k:8, desmenuzador	750	35
k:10, cantera	1	1

Tabla 31: Resumen de Factibilidad

Una vez que se han determinado las soluciones factibles del problema aplicando las restricciones estáticas, se puede calcular el coste del diseño, es decir la suma del coste de la instalación propiamente dicha y del consumo energético. La cuestión es que en este proyecto se va a tener en cuenta el nivel de servicio al cliente, aspecto que para ser evaluado obliga a una simulación de cada una de las soluciones.

Para resaltar la importancia de este nivel de servicio, se van a presentar dos soluciones factibles ofertadas por la empresa para este problema. Estas dos soluciones forman parte del grupo de 3.555.720 de soluciones factibles.

La tabla siguiente Solución01, muestra la primera solución ofertada que supone una inversión de 717.745€ y un gasto energético en 10 años de 1.583.442€, lo que resulta un coste total de **2.301.187€**

k	n	i	j	a	b
2	1	4	1		
4	2	5	1		
6	2	4	1	2	
8	1	6	1		3

Tabla 32: Factibilidad, Solución01

Otra posible solución se presenta en la Tabla 33: Factibilidad, Solución02

En la solución02 ofertada, la inversión es de 874.448€ y el gasto en energía es de 2.004.602 € en 10 años lo que da un coste total de **2.879.050€**.

k	n	i	j	a	b
2	3	1	3		
4	3	3	1		
6	3	2	1	3	
8	1	6	2		4

Tabla 33: Factibilidad, Solución02

En principio la primera parece mejor solución, ya que supone un coste menor en 500000€. Sin embargo cuando se realiza la simulación para ver realmente cómo se comportan, resulta que la primera tiene un nivel de servicio del 96,1% mientras que la segunda tiene un nivel de servicio del 99,8%, es decir, la primera no cumple con los requerimientos de nivel de servicio establecidos por el cliente.

En general, cuando se realiza la simulación de cada una de las soluciones factibles, el resultado es que gran parte de ellas no alcanzan el nivel de servicio deseado. Esto es debido a cuellos de botella por incompatibilidades entre producciones y tamaños de tolva.

Cada simulación conlleva un tiempo importante de cálculo que va en función del nivel de resolución. En nuestro caso, se ha intentado acelerar al máximo este apartado ya que a priori se reconocía como el cuello de botella en tiempo de computación. El resultado es que la duración de la simulación de un escenario en Matlab® es de unos 61”.

Así, si se simulan todas y cada una de las soluciones factibles, son necesarios 2.552 días (6,9 años) para poder comprobarlas todas, lo cual evidentemente es inviable. A priori es difícil saber cuál de las soluciones dará un Nivel de Servicio

adecuado, ya que aunque la heurística pueda dar ciertas pistas, la realidad puede diferir mucho de las ideas preconcebidas.

Por ello es necesario aplicar otro tipo de algoritmo que reduzca disminuir el tiempo de computación a costa de no asegurar que la solución ofrecida sea la óptima. En este caso el algoritmo elegido es el ***Evolutivo***

7 Algoritmo Evolutivo

Los algoritmos evolutivos corresponden a la clase de métodos estocásticos de búsqueda. Mientras la mayoría de estos métodos operan sobre una única solución, estos algoritmos operan en una población de soluciones. La idea básica, inspirada en los procesos evolutivos en biología, es que el contenido genético de una población contiene potencialmente la solución, o una solución mejor, a un problema dado. La combinación, la mutación y la selección de los mejores a lo largo de varias generaciones o ciclos lleva a una mejor solución.

Estos algoritmos se basan en dos principios. El primero es la selección básica, es decir, los individuos compiten por la oportunidad de reproducirse, de manera que los mejor adaptados tienen más posibilidades de procrear. El segundo de los principios consiste en que aparecen nuevos individuos en la población como consecuencia del intercambio genético que tiene lugar en la reproducción y por las mutaciones.

Uno de los aspectos claves de este tipo de algoritmos es cómo se representan cada uno de los individuos, que en nuestro caso se traduce en cómo se van a codificar las soluciones. En general, los individuos se representan como un conjunto de parámetros (genes), los cuales agrupados forman una ristra o cadena de valores (cromosomas) de longitud n .

El esquema del proceso es el siguiente:

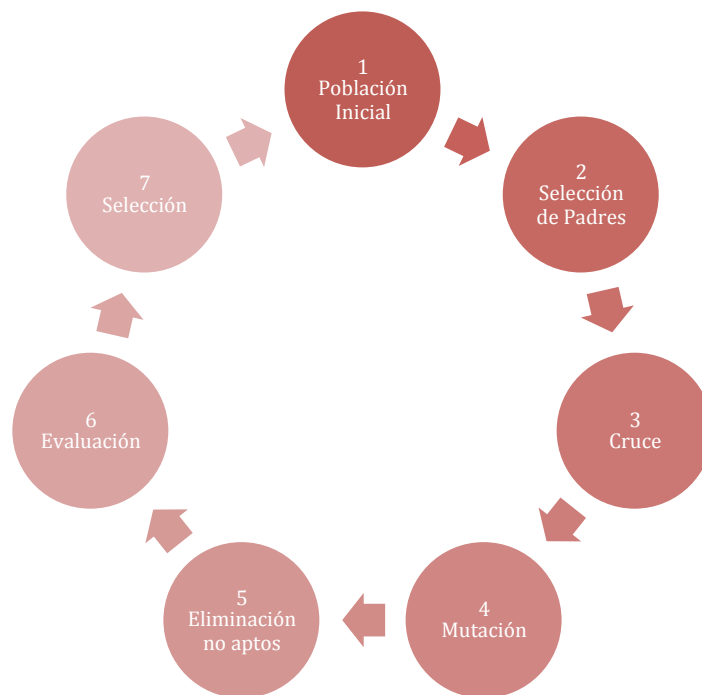


Figura 11: Ciclo algoritmo estándar

Se parte de una población inicial formada por un número determinado de soluciones. Esta población inicial se puede generar aleatoriamente o mediante alguna regla heurística (basada en la experiencia). En este caso se van a generar aleatoriamente. Parte de estos individuos serán padres de la siguiente generación

y se cruzarán entre ellos, combinando sus cromosomas para dar lugar a tantos hijos como padres había originalmente.

Algunos de los cromosomas de algunos de los hijos sufrirán mutaciones aleatorias. Se eliminarán los no aptos y se evaluará la población formada por la población inicial, los hijos y los hijos mutados y se seleccionará los mejores que pasan entonces a ser la población inicial del siguiente ciclo. Este ciclo se repite un número fijo de veces o se dispone de un criterio que dé por finalizado el ciclo.

Uno de los parámetro a definir en este tipo de algoritmos es el tamaño de la población. Este es un parámetro clave en el algoritmo, ya que poblaciones pequeñas corren el riesgo de no cubrir el espacio de búsqueda y grandes tienen el problema de excesivo costo computacional (en el caso estudiado, además del tiempo de computación propio del algoritmo, hay que añadir los 61 segundos que cuesta la simulación de cada individuo o solución). Así, (Hopper and Turton 1999) recomiendan que el tamaño de la población inicial esté entre el número de genes y el doble.

Otro parámetro es la probabilidad de crossover o probabilidad de que un individuo de la población base se convierta en padre. Cuanto más alta sea, mayor será el número de hijos y por tanto, más soluciones se van a generar en cada iteración. El último parámetro básico en el algoritmo es la probabilidad de mutación de individuo nuevo. Lo mismo que ocurre con la probabilidad de ser padre, cuanto mayor será la de mutación, más individuos se tiene

7.1 Algoritmo Genético Estándar

En una primera aproximación, se va a estudiar la aplicación de un algoritmo genético estándar. En el caso que concierne, la codificación de cada uno de los individuos o soluciones se basa en el siguiente cromosoma:



nº de genes: 14

que representa de manera ordenada las diferentes etapas del proceso



y donde

n	nº de máquinas
i	capacidad productiva
j	capacidad volumétrica
a	multiplicador de producción
b	tamaño salida del material

Las etapas $k=0$ (extrusora) y $k=10$ (cantera) no se codifican ya que no están sujetos a optimización por ser elementos externos al sistema. Las etapas $k=1,3,5,7,9$ corresponden a las cintas transportadoras. Como se ha comentado en apartados anteriores, su diseño es único (no hay opciones para elegir), dependiendo éste del caudal de material que deben transportar y el desnivel a salvar, de manera que el coste tanto de instalación como energético es único,

independiente de los equipos de la instalación. De todas formas, el coste debido a estas cintas, sí que se ha añadido a la función de coste de la instalación.

A continuación, se describen cada uno de los pasos de este algoritmo:

1 Población Inicial

Siguiendo las recomendaciones de (Hopper and Turton 1999), que indican que el tamaño de la población inicial esté entre el número de genes y el doble, es decir entre 14 y 28, se opta porque esta población esté formada por 14 cromosomas o soluciones (cada uno de ellos formado por 14 genes) todos ellos factibles a priori. Evaluar el comportamiento dinámico de estas soluciones con lleva un tiempo de computación de 61sg por solución, lo que supone un total de 14,2 minutos.

Respecto a la forma de generar los individuos de la población inicial, éstos se generan íntegramente de forma aleatoria, asegurando que todos cumplen las restricciones de tipo estático.

Por otro lado, el número de iteraciones o ciclos que se deben realizar, en la literatura del tema, se aconseja realizar al menos el doble del tamaño de la población, por lo que en este caso, al menos serán necesarias 28 iteraciones.

2 Selección de Padres

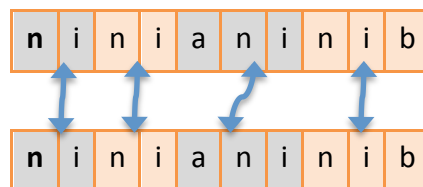
En cada iteración, hay que seleccionar cuántos y qué individuos de la población base (en la primera iteración es la población inicial) van a combinarse con otros para crear nuevas soluciones.

En este caso, la probabilidad de crossover o de que un individuo sea padre es del 80%, lo que significa que, en media, 11 de los 14 individuos podrán combinar. Como se han de emparejar dos a dos en un ciclo serán 10 y en otro 12.

3 Cruce

En esta etapa, dados dos individuos-padre, éstos deben combinarse para crear dos individuos-hijo. Para seleccionar los padres o individuos que se cruzarán para obtener descendencia se utiliza el método Fit-weak, es decir, los individuos con mejor *objetivo* se cruzan con los que lo tienen peor.

La manera en que dos individuos padres se combinan para generar dos individuos hijos es intercambiando las posiciones entre los dos padres por bloques, correspondientes estos a cada una de las etapas. La probabilidad que cada una de estas etapas se intercambie es del 50%



Así, a modo de ejemplo, partiendo de los individuos Padre01 y Padre02, se sortea para el primer hijo de quién heredera cada una de las 4 partes de su cadena. En este caso, la primera y última son del Padre02, y la segunda y cuarta del Padre01. El segundo hijo hereda al contrario, es decir, la primera y última parte son del Padre01, y la segunda y cuarta del Padre02.

Tabla 34: Padre01

1	3	2	4	1	1	2	2	2	3
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

5	1	3	2	1	1	3	2	3	4
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Tabla 35: Padre02



Tabla 36: Hijo01

5	1	2	4	1	1	2	2	3	4
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

1	3	3	2	1	1	3	2	2	3
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Tabla 37: Hijo02

En cada iteración y como valor medio, se obtienen 11 hijos (unas veces serán 10 y otras, 12) con una mezcla de genes de ambos padres.

4 Mutación

La probabilidad de que una solución-hijo mute alguno de sus genes es del 63%, es decir a partir de una población-hijo de 11 individuos, se tendrán 7 soluciones-mutadas. Además, una vez decidido que un individuo mute, no mutan todos sus genes, sino un total de 6 de los 14, seleccionándolos a sorteo y con un valor equiprobable entre todos los posibles.

5 Eliminación de los no aptos

Una parte de las soluciones-hijo y sobre todo de las soluciones-mutadas no serán viables por quedar fuera del espacio de factibilidad. Pongamos que cada vez es solo uno de ellos el que no es válido. Luego me quedan 17 cromosomas.

6 Evaluación

Tenemos que evaluar mediante simulación los 17 cromosomas, que siendo 6 segundos lo que tarda la simulación son 17,3 minutos

7 Selección

El último paso consiste seleccionar 14 soluciones (tamaño de población) de entre las 14 de la población de partida, 11 soluciones-hijo, 7 soluciones-mutadas menos la solución no factible.

El ciclo antes comentado se realizará un total de 28 veces, con la salvedad que en los siguientes ciclos solo hay que evaluar los hijos y los mutados puesto que la población inicial viene evaluada del anterior ciclo. Así, se realizarán un total de $14 + 28 \cdot 17 = 490$, de manera que si sólo el tiempo de simulación de una es de 61 segundos, el tiempo total para completar el Algoritmo Genético estándar es de 8,3 horas.

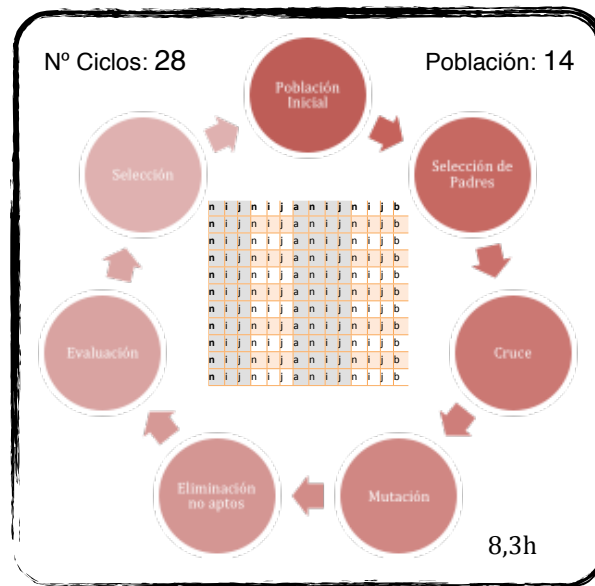


Figura 12: Algoritmo genético estándar, resumen

Debido a que este tiempo de computación es tan elevado, resulta necesario replantear el problema de nuevo. Así, en el cálculo estático de la instalación se puede estimar el consumo total de la instalación sin necesidad de realizar ninguna simulación. Las horas que trabajan los diferentes elementos se pueden estimar teniendo en cuenta que si por ejemplo la etapa de los molinos de martillos debe dar 60 t/h y la producción de estos es de 100t/h, un 60% del tiempo están trabajando (consumiendo energía) y un 40% parados. Para calcular estos consumos, el tamaño de las tolvas no es determinante, pero sí el resto de los parámetros: tamaño productivo, número de máquinas, etc.

El consumo así calculado no tiene en cuenta el Nivel de Servicio porque este sólo se puede saber realizando la simulación. Para el caso que el nivel de servicio fuera del 100% se tendría que el consumo energético sería prácticamente el mismo el simulado que el calculado estáticamente.

Así, si se aplica el algoritmo genético al cromosoma, calculando de forma estática el sistema, se obtiene una solución óptima en términos de producción. Al no realizar simulación alguna, el tiempo empleado sería extraordinariamente rápido (menor de 1 segundo).

En esta solución todas las tolvas tienen tamaño mínimo, ya que de esta manera el coste de las tolvas es cero, la energía empleada por las cintas para elevar el material es menor y la energía consumida por los alimentadores es mínima.

Por todo ello es posible sacar del cromosoma las tolvas ya que son un elemento externo a la capacidad productiva de las máquinas. Sin embargo, faltaría por comprobar si la instalación cumple con el Nivel de Servicio exigido mediante simulación. La ventaja es que en esta etapa sólo ha que centrarse en optimizar la altura que necesita la mejor solución encontrada y olvidarnos del resto de soluciones.

Se podría decir que, si bien el cromosoma óptimo tiene el potencial para ser la mejor solución, es el entorno lo que se lo impide (o facilita). Esto es lo que se conoce como epigenética. La genética expresaría el potencial para cumplir con la producción exigida y, la epigenética las condiciones externas que permiten que se expresen esos potenciales. En genética biológica, los genes que se heredan, cruzan y mutan son los responsables de las capacidades potenciales del individuo pero es la epigenética (la alimentación, el clima, el entorno...) la que hace que esos genes se manifiesten (se expresen) o no.

7.2 Algoritmo Epigenético

El algoritmo epigenético parte de la posibilidad de separar la información para que las máquinas puedan dar la producción gracias a sus capacidades productivas (genotipo), y por otra, como se comporta realmente cuando una tolva se queda vacía antes de tiempo o cuando la capacidad de la tolva es insuficiente para almacenar el material proveniente de la anterior máquina (fenotipo).

Así, para codificar la información, se parte del cromosoma original para subdividir el problema de la optimización en el cálculo estático y en el cálculo dinámico, tal y como se muestra en la Figura 13.

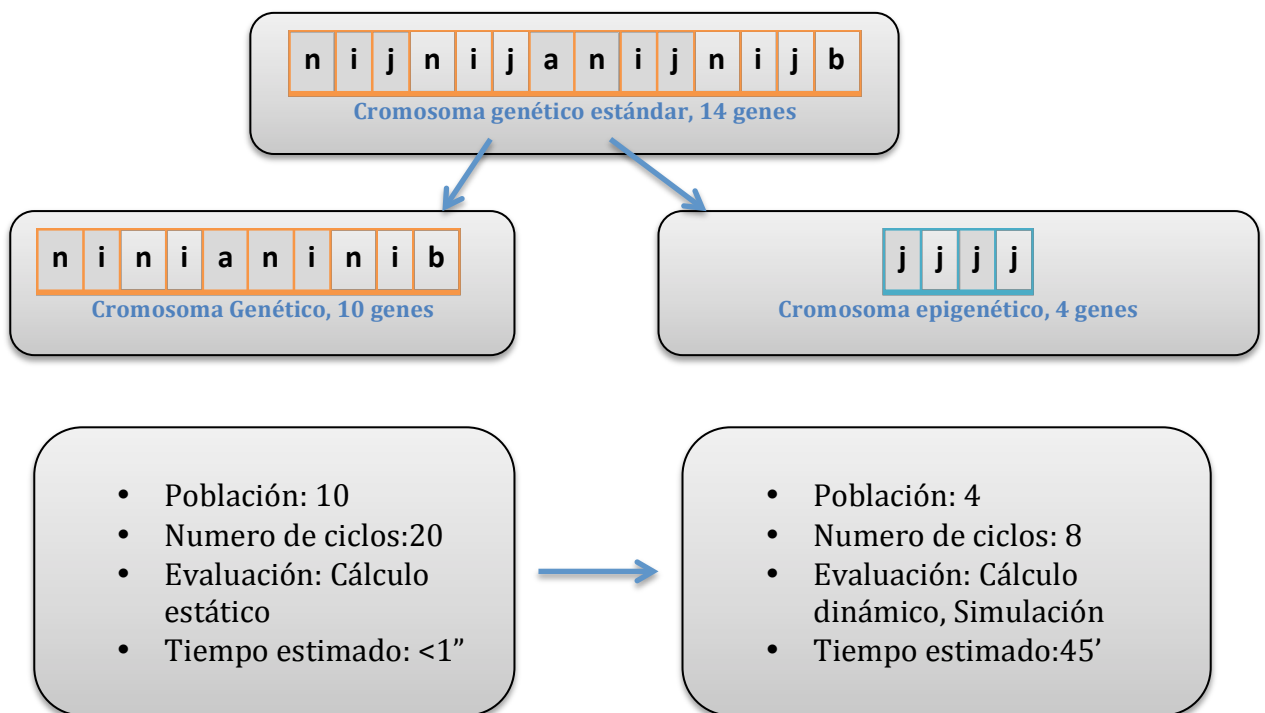


Figura 13: Algoritmo epigenético

De esta manera, la codificación de cada uno de los individuos o soluciones está definido por dos cadenas. La primera o *cromosoma genético* representa las capacidades productivas o internas del sistema, teniendo la siguiente estructura:

n i n i a n i n i b

nº de genes: 10

que representa de manera ordenada las diferentes etapas del proceso

K=2	K=4	K=6	K=8
-----	-----	-----	-----

que pueden tomar los siguientes valores:

1..5	1..4	1..5	1..5	1..6	1..5	1..4	1..6	1..5	1..5
------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

y donde

n	nº de máquinas
i	capacidad productiva
a	multiplicador de producción
b	tamaño salida del material

y que se evaluará estáticamente

La segunda de las cadenas o *cromosoma epigenético* representa las capacidades volumétricas o externas del sistema de la siguiente forma

j	j	j	j
---	---	---	---

formado por “epigenes”, uno por cada etapa donde

j: capacidad volumétrica

y que pueden tomar los siguientes valores

1..5	1..4	1..5	1..5
------	------	------	------

Concatenando ambas cadenas, el cromosoma completo tiene la siguiente forma:

n	i	n	i	a	n	i	n	i	b
j	j	j	j	j	j	j	j	j	j

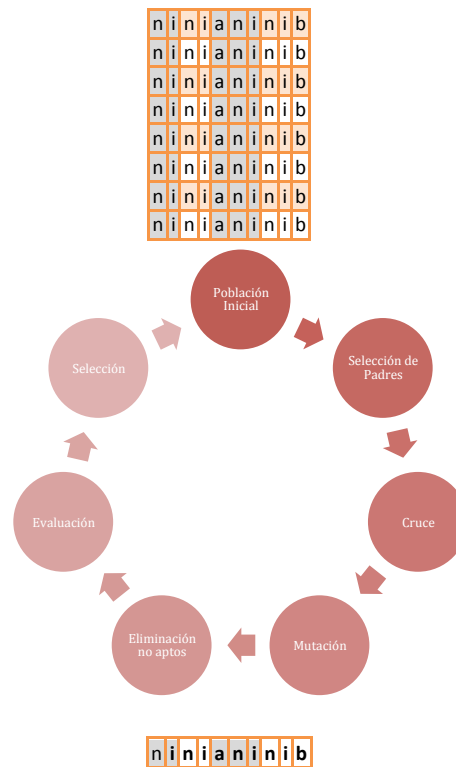
Tabla 38: Cromosoma genético-epigenético

El funcionamiento del algoritmo epigenético tiene dos etapas:

1. En primer lugar, se pondrá en marcha un algoritmo genético, llamado *Genético Líder*, con las mismas características comentados para el caso estándar pero con el cromosoma de 10 genes y sin necesidad de simulación. Este algoritmo se ejecutará un número de iteraciones, 20 en este caso, obteniéndose al final una solución o S_{MG} (mejor solución global o la de menor coste de todas las generadas).
2. En la segunda etapa, y partiendo de la mejor solución de la etapa anterior, S_{MG} , se aplica un segundo algoritmo genético, llamado *Genético Seguidor*, para encontrar las alturas óptimas para dicha solución. Las características son las mismas que el caso estándar, pero en este caso con un cromosoma de 4 componentes, simulando cada una de las soluciones y ejecutando 8 iteraciones.

A continuación, se va a explicar con detalle cada una de las etapas de estos dos algoritmos.

En primer lugar, se ejecuta el *Genético Líder*, especializado en las capacidades productivas y que no necesita evaluarse mediante simulación.



1 Población Inicial

Dado que cada solución está codificada por una cadena de 10 genes, la población inicial debe tener un tamaño entre 10 y 20 individuos, escogiendo para este caso, 10 cromosomas (cada uno de ellos formado por 10 genes) y con la cualidad de que todos ellos factibles a priori. La evaluación en este caso sólo se refiere a las restricciones estáticas, de manera que el tiempo de computación de cada una es menor de 1 segundo.

2. Selección de Padres

Siguiendo el mismo método que en el genético general, se tendrá que para una probabilidad de crossover 80%, en media, 8 de los 10 serán padres.

3. Cruce

Los 8 padres seleccionados se cruzan, obteniendo 8 soluciones-hijos. La manera de combinarse es el mejor con el peor, y con el método del algoritmo general.

4. Mutación

Como la probabilidad de mutación es del 70%, de las 8 soluciones-hijo, 5 sufrirán mutaciones en algunos de sus genes.

5. Eliminación de los no aptos.

Alguno de las soluciones-hijo y soluciones-mutadas no serán viables desde el punto de vista estático, por quedar fuera del espacio de factibilidad, con más probabilidad los mutados que los hijos.

6. Evaluación

Se calculará el coste de instalación y energético de las soluciones hijas y mutadas declaradas aptas en la etapa anterior. Como máximo son 13 valoraciones, que en conjunto el coste computacional sigue siendo menor a 1 segundo.

7. Selección

La última etapa de cada ciclo consiste en seleccionar las 10 mejores soluciones de entre el conjunto formado por las soluciones iniciales o padres, las hijo y las mutadas.

Así, si se realizan 20 iteraciones, se han generado un total de $10+20*12= 250$ soluciones, y por lo tanto, se han realizado 250 evaluaciones estáticas. El tiempo computacional de todo este proceso sigue siendo menor de 1 segundo.

8. Extracción

Al final de las 20 iteraciones, se selecciona la mejor solución de la población final, llamada mejor solución global o S_{MG} .

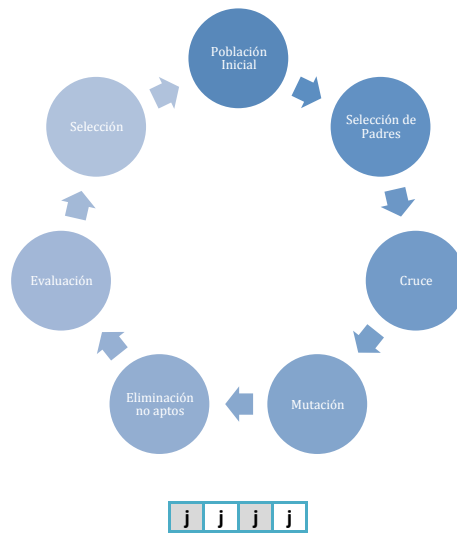
En este punto es importante destacar que la altura de las tolvas no influye en el resultado de las capacidades productivas elegidas pero sí en el coste, tanto energético como de inversión. Así, en una primera aproximación se ha supuesto que las alturas de las tolvas son fijas y conocidas. Esa altura vendrá dada por la heurística, es decir las alturas más habituales que se ponen en las instalaciones reales y que, según dicho conocimiento, son las más cercanas a cumplir el nivel de servicio.

n	i	n	i	a	n	i	n	i	b
4	1	4	4						

Tabla 39: Cromosoma con alturas heurísticas.

Concluida la primera etapa, el siguiente paso es ejecutar el algoritmo *Genético Seguidor* para encontrar las alturas óptimas de las tolvas de la S_{MG} , obtenida en el *Genético Líder*

j	j	j	j
j	j	j	j
j	j	j	j
j	j	j	j



Dado que cada solución está codificada por una cadena de 4 genes (llamados epigenes), la población inicial debe tener un tamaño entre 4 y 8 individuos, escogiendo para este caso, 4 cromosomas generados aleatoriamente, y con la cualidad de que todos ellos factibles a priori.

Como la evaluación de la solución necesita de la simulación, el tiempo de cómputo de esta etapa debido es de poco más de 4 minutos.

2. Selección de Padres

Siguiendo el mismo método que en el genético general, se tendrá que para una probabilidad de crossover 80%, en media, 3 de los 4 serán padres.

3. Cruce

En este caso, se cruzarán el mejor progenitor con el peor, obteniendo 3 soluciones-hijo, como valor medio. El tiempo de evaluación de estas 3 soluciones es de 3 minutos.

4. Mutación

Como la probabilidad de mutación es del 70%, 2 de las soluciones-hijo sufrirán mutaciones, y su evaluación tardará 2 minutos.

Ejemplo de mutación con cromosomas epigenéticos.

No mutan todos los genes o epigenes. Se elige aleatoriamente, con una probabilidad del 50% cuál es el gen que muta y este muta de forma aleatoria.

1	3	2	1
2	4	1	2
2	3	3	1

Tabla 40: Hijos algoritmo epigenético

1	2	2	1
1	3	4	1

Tabla 41: Mutados algoritmo epigenético

5. Eliminación de los no aptos y evaluación.

Una parte de las soluciones-hijo y sobre todo de las soluciones-mutadas no serán viables por quedar fuera del espacio de factibilidad. Pero para evaluarlas,

sigue siendo necesario en la mayoría de las ocasiones, simularlas. Al final se obtiene un número de soluciones factibles entre las hijo y las mutadas.

6. Selección

La última etapa de cada ciclo consiste en seleccionar las 4 mejores soluciones de entre el conjunto formado por las soluciones iniciales o padres, las hijo y las mutadas.

Así, si se realizan 10 iteraciones, se han generado un total de $4+8*(3+2)=44$ soluciones, y por lo tanto, se han realizado 24 evaluaciones dinámicas. El tiempo computacional estimado es de 44,7 minutos.

7 Extracción

Al final de los 8 ciclos, se selecciona la mejor solución de la población final, obteniendo:

n	i	n	i	a	n	i	n	i	b
j	j	j	j						

Tabla 42: Cromosoma genético-epigenético

Si se compara el tiempo de cálculo del algoritmo genético general (8,3horas) y el del epigenético (44,7 minutos), este algoritmo es 11 veces más rápido, lo que supone una importante mejora a la hora de evaluar la instalación. La cuestión es saber si la calidad de la solución no se ve mermada por esta resolución en dos fases.

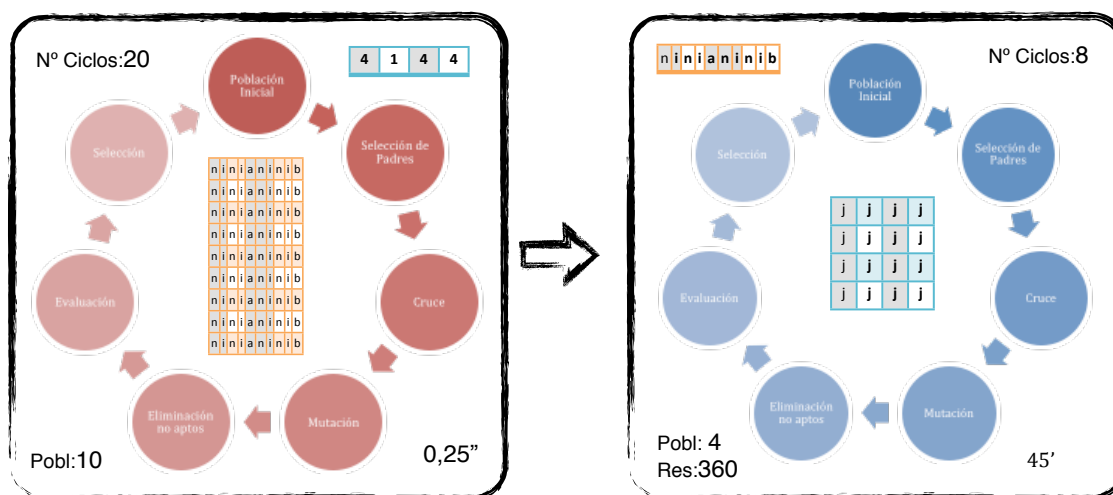


Figura 14: Algoritmo Epigenético, Resumen

En el Anexo **PARÁMETROS ALGORITMOS** se presentan los resultados obtenidos al cambiar los diferentes parámetros del algoritmo.

8 Resultados

En este apartado se van a presentar diferentes resultados obtenidos con los dos algoritmos. En primer lugar, se valorará si las soluciones obtenidas con el algoritmo epigenético realmente son buenas y tienen sentido, sobre todo cuando los problemas resueltos son conocidos. Esta primera etapa es importante debido a la complejidad del sistema modelizado.

Una vez “validado” el algoritmo, el siguiente paso es comparar los resultados obtenidos con los dos algoritmos diseñados. Se ha desarrollado el algoritmo epigenético con el argumento de que éste es mucho más rápido que el algoritmo genético estándar, pero es necesario saber si además de más rápido obtiene mejores resultados, o se pierde calidad en la solución obtenida.

En este apartado se van a presentar diferentes resultados obtenidos con la herramienta de optimización. Todas las pruebas se han realizado con Matlab® en el mismo ordenador para poder comparar resultados. Las características de dicho equipo son:

MacBook, 13 pulgadas, mediados de 2007

Procesador 2 GHz Intel Core 2 Duo

Memoria 2,5 GB 667 MHz DDR2 SDRAM

Gráficos Intel GMA 950 64 MB

Software Mac OS X Lion 10.7.3 (11D50b)

En cualquiera de los casos, se han diseñado 4 problemas, que ejercen de batería de pruebas, y que pueden representar casos variados de diseño de este tipo de instalaciones. Todos ellos presentan unas variables comunes:

<i>Distribución de la jornada</i>
7,5 horas/día
2 turnos/día
6 días/semana
52 semanas/año

Tabla 43: Distribución de la Jornada

<i>Otros</i>
Coste Electricidad: 58,47 €/MWh
Semanas de evaluación: 1
m: 4% (mermas del material)

Tabla 44: Otras variables comunes

8.1 Validación Epigenético

Se presentan para los 4 problemas siguientes las soluciones halladas por el Algoritmo Epigenético

Problema A

<i>Requerimientos del cliente</i>	
Ps ⁰ (producción requerida)	145 t/h
NS (nivel de servicio)	98%
Ø _s ⁰ (diámetro salida del material)	10mm
<i>Características de cintas y nave</i>	
Ø _e ¹⁰ (diámetro medio del material de cantera)	250mm
H (altura máx útil de nave)	6m

Tabla 45: Enunciado Problema A

Respuesta

1	4	2	4	2	4	2	2	5	2
2		1		1				1	

Tabla 46: Cromosoma Epigenético, A

NS:	100%
Coste Total:	2.161.500€
Coste Inversión:	841.900€
Consumo Energía:	22.600MW
Tiempo:	16'

Tabla 47: Resultado Problema A

Esta solución es mejor que las dos propuestas por la empresa que aparecían en el apartado de la factibilidad ver Resolución mediante método exacto pág 45

La solución desglosada es:

Maquinaria elegida			
1 AB/15-6	1 m Tolva	Ps=151 t/h	Øs=10mm
2 MM/0-3	Sin Tolva	Ps=159 t/h	Øs=10mm
4 AB/10-4	Sin Tolva	Ps=180 t/h	Øs=16mm
2 DE/0-1	Sin Tolva	Ps=317 t/h	Øs=16mm

Tabla 48: Desglose Cromosoma A

El coste de la energía supone el 61% del coste total, distribuido de la siguiente forma: Tabla: Distribución del Coste, Problema A

Etapa	Coste Energético (%)	Coste Inversión (%)
Alimentadores de Banda	2%	22%
Cintas Transportadoras	12%	20%
Desmenuzadores	29%	26%
Molino de Martillos	57%	32%

Tabla 49: Distribución del Coste, Problema A

Problema B

<i>Requerimientos del cliente</i>	
Ps ⁰ (producción requerida)	80 t/h
NS (nivel de servicio)	90%
Ø _s ⁰ (diámetro salida del material)	20mm
<i>Características de cintas y nave</i>	
Ø _e ¹⁰ (diámetro medio del material de cantera)	250mm
H (altura max útil de nave)	10m

Tabla 50: Enunciado Problema B

Respuesta

1	2	2	4	3	2	2	2	2	3
1		1		1				1	

Tabla 51: Cromosoma epigenético B

NS:	94,6%
Coste Total:	1.085.100€
Coste Inversión:	574.290€
Consumo Energía:	8.736MW
Tiempo:	33'

Tabla 52: Resultado Problema B

Maquinaria elegida			
1 AB/10-4	Sin Tolva	Ps=83 t/h	Øs=20mm
2 MM/1-3	Sin Tolva	Ps=158 t/h	Øs=20mm
2 AB/10-4	Sin Tolva	Ps=109 t/h	Øs=25mm

2 DE/2-1	Sin Tolva	Ps=109 t/h	Øs=25mm
----------	-----------	------------	---------

Tabla 53: Desglose cromosoma B

El coste de la energía supone el 47% del coste total, distribuida de la siguiente forma: Tabla Distribución del Coste, Problema B

Etapa	Coste Energético (%)	Coste Inversión (%)
Alimentadores de Banda	3%	18%
Cintas Transportadoras	18%	16%
Desmenuzadores	30%	19%
Molino de Martillos	49%	47%

Tabla 54: Distribución del Coste, Problema B

Problema C

<i>Requerimientos del cliente</i>	
Ps ⁰ (producción requerida)	60 t/h
NS (nivel de servicio)	100%
Ø _s ⁰ (diámetro salida del material)	0.5 mm
<i>Características de cintas y nave</i>	
Ø _e ¹⁰ (diámetro medio del material de cantera)	350mm
H (altura max útil de nave)	10m

Tabla 55: Enunciado Problema C

Respuesta

1	2	1	4	3	1	2	2	3	2
3	1	2	1						

Tabla 56: Cromosoma epigenético C

NS:	100%
Coste Total:	5.408.200€
Coste Inversión:	435.930€
Consumo Energía:	85.040MW
Tiempo:	46'

Tabla 57: Resultado Problema C

La solución desglosada es:

Maquinaria elegida			
1 AB/10-4	Tolva 2m	Ps=63 t/h	$\varnothing_s=0,5\text{mm}$
1 MM/0-3	Sin Tolva	Ps=80 t/h	$\varnothing_s=0,5\text{mm}$
1 AB/10-4	Tolva 1m	Ps=81 t/h	$\varnothing_s=16\text{mm}$
2 DE/3-1	Sin Tolva	Ps=134 t/h	$\varnothing_s=16\text{mm}$

Tabla 58: Desglose Cromosoma C

El coste de la energía supone el 92% del coste total, distribuida de la siguiente forma:

Etapa	Coste Energético (%)	Coste Inversión (%)
Alimentadores de Banda	0,3%	19%
Cintas Transportadoras	1%	18%
Desmenuzadores	4%	32%
Molino de Martillos	95%	31%

Tabla 59: Distribución del Coste, Problema C

Así, la solución ofertada por la empresa era un 40,6% superior (142.670€) en cuanto a la inversión necesaria. El consumo de energía a lo largo de los siguientes 10 años sería un 112% superior. Este consumo de energía como se dijo al comienzo, no suele tener en cuenta a la hora de tomar la decisión sobre el proyecto final sin embargo vemos que supone mas del 60% del coste total.

Al final el sobrecoste total de la oferta realizada por la empresa era del 83,7% (768.700€). En este ejemplo concreto el cliente rechazó el presupuesto y substituyó los dos molinos ofertados por un molino de la competencia. La instalación no se ha puesto en marcha.

Problema D

Los requerimientos del cliente son

Requerimientos del cliente	
Ps ⁰ (producción requerida)	45
NS (nivel de servicio)	100%
\varnothing_s^0 (diámetro salida del material)	5 mm
Características de cintas y nave	
\varnothing_e^{10} (diámetro medio del material de cantera)	200mm
H (altura max útil de nave)	10m

Tabla 60: Enunciado Problema D

Respuesta

2	1	1	2	2	1	2	2	1	1
2	1	3	1						

Tabla 61: Cromosoma Epigenético D

NS:	99.997%
Coste Total:	917.900€
Coste Inversión:	351.400€
Consumo Energía:	9.606MW
Tiempo:	36'

Tabla 62: Resultado Problema D

La solución desglosada es:

Maquinaria Elegida			
2 AB/8-3	Tolva 1m	Ps=47 t/h	Øs=5mm
1 MM/1-3	Sin Tolva	Ps=51 t/h	Øs=5mm
1 AB/10-4	Tolva 2m	Ps=56 t/h	Øs=10mm
2 DE/3-1	Sin Tolva	Ps=73 t/h	Øs=10mm

Tabla 63: Desglose Cromosoma D

El coste de la energía supone el 62% del coste total, distribuida de la siguiente forma:

Etapas	Coste Energético (%)	Coste Inversión (%)
Alimentadores de Banda	3%	32%
Cintas Transportadoras	9%	16%
Desmenuzadores	25%	24%
Molino de Martillos	64%	28%

Tabla 64: Distribución del Coste, Problema D

Comparativa

Para este problema la empresa ofertó la siguiente solución

1	2	2	1	2	2	3	1	4	3
5	1	5	5						

Tabla 65: Cromosoma epigenético ofertado

NS:	100%
Coste Total:	1.686.600€
Coste Inversión:	494.070€
Consumo Energía:	20.395MW

Tabla 66: Resultado Oferta

La solución desglosada es:

Maquinaria Elegida			
1 AB/10-4	Tolva 4m	Ps=47 t/h	Øs=5mm
2 MM/1-3	Sin Tolva	Ps=69 t/h	Øs=5mm
2 AB/12-5	Tolva 4m	Ps=56 t/h	Øs=25mm
1 DE/1-1	Tolva 4m	Ps=85 t/h	Øs=25mm

Tabla 67: Maquinaria ofertada por la empresa

El coste de la energía supone el 71% del coste total, distribuida de la siguiente forma:

Distribución del Coste de la energía	
3%	Alimentadores de Banda
7%	Cintas Transportadoras
11%	Desmenuzadores
79%	Molino de Martillos

Tabla 68: Distribución del Coste dela Energía

Es decir la solución ofertada por la empresa era un 40,6% superior (142.670€) en cuanto a la inversión necesaria. El consumo de energía a lo largo de los siguientes 10 años sería un 112% superior. Este consumo de energía como se dijo al comienzo, no se suele tener en cuenta a la hora de tomar la decisión sobre el proyecto final sin embargo vemos que supone mas del 71% del coste total.

Al final el sobrecoste total de la oferta realizada por la empresa era del 83,7% (768.700€) respecto a la encontrada por el algoritmo.

8.2 Conclusiones Generales Resultados Algoritmos Epigenéticos.

En este apartado vamos a analizar y comparar las soluciones obtenidas por el algoritmo epigenético con las soluciones de uso habitual en la Industria cerámica.

Generalmente se busca que la altura de las tolvas sean lo mayor posible, el algoritmo sin embargo busca la altura menor que garantiza un nivel de servicio adecuado. En este caso un “exceso” de altura conlleva un pequeño aumento de la energía consumida (el global de energía consumido en las cintas y alimentadores difícilmente llega al 20% del total) y del coste de inversión. Toda la altura “sobrante” sirve como pulmón y reserva para casos imprevistos luego el uso común en este caso es correcto. Quizás se podría objetar que el poner el nivel de reserva entorno al 40% es excesivo ya que no se aprovecha toda la capacidad de las tolvas. Y quizá el uso de este nivel de reserva de forma generalizado venga de hecho de situaciones donde el Nivel de Servicio no se ha cumplido.

Otro uso común es no poner ninguna tolva en el Molino de Martillos y vemos que el algoritmo lleva a la misma solución luego la experiencia es correcta en este sentido.

Una diferencia importante es debida al reparto de la disminución de tamaño entre el desmenuzador y el molino de martillos. Generalmente el desmenuzador suele disminuir la granulometría hasta un tamaño de unos 30mm aunque excepcionalmente se busca que el tamaño de salida del desmenuzador sea menor, sobre todo en casos de molienda por vía húmeda. Sin embargo el algoritmo busca que el desmenuzador alcance el máximo posible de disminución de tamaño ya que proporcionalmente consume menos energía. Puede que la modelización del consumo sea una aproximación basta al comportamiento de ambas máquinas pero cualitativamente reflejan el comportamiento real lo que indica que se tendría que buscar en las instalaciones descargar de trabajo el molino intentando sacar el máximo partido al desmenuzador.

La diferencia más notable esta relacionada precisamente con los desmenuzadores. Nunca se ponen dos desmenuzadores trabajando en paralelo; sin embargo vemos que es bastante habitual que los algoritmos nos den esta opción como óptima. Los desmenuzadores generalmente se sitúan en el exterior de la planta y con la tolva lo más alta posible, esto obliga a construir unas rampas que deben salvar un desnivel de unos 4 metros por las que subirá la pala excavadora o el camión. Esa rampa además del gasto en obra civil que conlleva suele dar problemas al ocupar gran espacio en la campa, espacio que en muchos casos es vital pues allí es donde se hace la preparación previa de material.

Sin embargo con la posibilidad de poner dos desmenuzadores en paralelo las tolvas no tienen que ser tan altas facilitándose de esta forma su llenado.

La optimización no solo nos ha dado información de alternativas más baratas y funcionales en cuanto a la inversión sino que además nos da una evaluación del consumo energético de las plantas aspecto que hasta ahora no era tenido en cuenta.

En general vemos que la optimización nos permite volver a replantearnos la forma de diseñar plantas industriales de molienda fijando nuestra atención sobre detalles que quizás se habían pasado por alto.

8.3 Algoritmo Epigenético Vs Genético

Se ha desarrollado el algoritmo epigenético con el argumento de que éste es mucho más rápido que el algoritmo genético estándar, pero se necesita saber si además de más rápido obtiene mejores resultados.

Así, en una primera batería de pruebas, se va a utilizar el mismo tiempo en los dos casos. Para ello, se va a dejar funcionar el algoritmo epigenético durante las 20+8 iteraciones, y ese tiempo es el que se va a asignar al genético estándar.

Debido a que estos algoritmos presentan componentes aleatorias, las soluciones obtenidas pueden ser diferentes en cada réplica. Para ello, se realizarán 10 réplicas para cada uno de los cuatro problemas planteados anteriormente y para cada tipo de algoritmo.

La eficiencia de los algoritmos se ha medido en términos del mayor, menor y valor medio del objetivo (coste con penalización) de las soluciones obtenidas en las 10 réplicas para cada uno de los problemas, resueltos con los dos algoritmos. En la Tabla 69: Comparativa Epigenético-Genético con tiempo limitado se presentan los resultados

		Epigenético	Genético	Epi-Gen	Dif %	t(min)
A	min	1.734.200 €	2.055.000 €	-320.800 €	-16%	16,9
	promedio	2.078.320 €	2.537.920 €	-667.150 €	-26%	
	max	2.869.600 €	3.244.000 €	-374.400 €	-12%	
	desviación	381.994 €	403.681 €			
	desv/promed	18%	16%			
B	min	894.060 €	1.261.600 €	-367.540 €	-29%	34,2
	promedio	1.124.656 €	1.440.490 €	-338.500 €	-23%	
	max	1.364.400 €	1.624.900 €	-260.500 €	-16%	
	desviación	141.325 €	126.099 €			
	desv/promed	13%	9%			
C	min	4.852.800 €	4.924.000 €	-71.200 €	-1%	38,2
	promedio	5.399.800 €	5.649.850 €	-321.550 €	-6%	
	max	7.314.100 €	6.892.900 €	421.200 €	6%	
	desviación	687.916 €	726.726 €			
	desv/promed	13%	13%			
D	min	917.900 €	1.280.100 €	-362.200 €	-28%	32,4
	promedio	1.314.880 €	1.676.350 €	-461.050 €	-28%	
	max	1.788.800 €	2.037.200 €	-248.400 €	-12%	
	desviación	298.735 €	244.080 €			
	desv/promed	23%	15%			

Tabla 69: Comparativa Epigenético-Genético con tiempo limitado

Tras la revisión de los resultados, se puede observar que si los dos algoritmos funcionan el mismo tiempo de cálculo, el algoritmo epigenético obtiene mejores resultados que el algoritmo genético.

Los resultados promedio del epigenético son, en 3 de los 4 problemas, más de un 20% mejores que los del algoritmo genético. Se constata que para el problema C

donde el peso de la energía es muy importante (entorno al 90% del coste total) la diferencia se reduce hasta el 6%. En este caso tenemos una reducción de tamaño enorme, esto conlleva un coste energético muy elevado y prácticamente constante independientemente de la combinación de máquinas elegidas. Por eso el grado de optimización del coste, o el margen de maniobra que tiene el algoritmo para mejorar la solución es porcentualmente muy pequeño.

Una segunda prueba consiste en estudiar la calidad de la solución del algoritmo genético. Para ello, cada algoritmo va a funcionar durante un tiempo diferente: el genético realizará las 28 iteraciones completas, y el epigenético las 20+8.

Como en la anterior batería de pruebas, se han ejecutado 10 réplicas para cada problemas y cada algoritmo, utilizando como métrica el mayor, menor y valor medio del objetivo (coste con penalización). En la Tabla 70: Comparativa Epigenético-Genético completo se presentan estos resultados.

		Epigenético	Genético	Epi-Gen	Dif %	t(h)
A	min	1.734.200 €	1.693.000 €	41.200 €	2%	4,5
	promedio	2.078.320 €	1.955.500 €	122.820 €	6%	
	max	2.869.600 €	2.357.600 €	512.000 €	18%	
	desviación	381.994 €	188.985 €			
	promed/desv	18%	10%			
B	min	894.060 €	834.960 €	59.100 €	7%	8,0
	promedio	1.124.656 €	902.997 €	221.659 €	20%	
	max	1.364.400 €	1.012.800 €	351.600 €	26%	
	desviación	141.325 €	49.215 €			
	promed/desv	13%	5%			
C	min	4.852.800 €	4.568.900 €	283.900 €	6%	8,6
	promedio	5.399.800 €	4.832.140 €	567.660 €	11%	
	max	7.314.100 €	5.261.700 €	2.052.400 €	28%	
	desviación	687.916 €	262.847 €			
	promed/desv	13%	5%			
D	min	917.900 €	849.090 €	68.810 €	7%	8,2
	promedio	1.314.880 €	1.007.734 €	307.146 €	23%	
	max	1.788.800 €	1.417.700 €	371.100 €	21%	
	desviación	298.735 €	162.974 €			
	promed/desv	23%	16%			

Tabla 70: Comparativa Epigenético-Genético completo

Revisando estos resultados, el primero que resalta es referente al tiempo de computación, ya que el genético estándar es 14,6 veces más lento que el epigenético. Así, para resolver una réplica del problema C, el epigenético ha tardado 38,2 minutos, mientras que el genético estándar 8,6 horas.

Si se compara la calidad de las soluciones obtenidas con estos algoritmos, el genético da mejores resultados que el epigenético. En todos los casos, revisando la mejor solución obtenida con los dos métodos, la diferencia no es mayor del 7%, lo que hace que el epigenético sea una muy buena alternativa al genético general.

Revisando los problemas de manera particular, se puede ver como para los problemas A y C, el valor medio obtenido con el genético estándar sólo mejora entorno a un 10% que el del epigenético. Esto puede ser debido a que estos problemas representan situaciones extremas. El primero de ellos porque la altura de la nave es muy baja y el segundo por la necesidad de un elevado gasto energético debido a la fuerte reducción de tamaño del material.

En los otros dos problemas, B y D, donde el campo de posibles soluciones es más amplio, se produce una clara mejoría en el valor promedio con el genético estándar, sobre todo porque las soluciones del epigenético tienen mucha más dispersión que las otras (ver $\text{promed}/\text{desv}$).

Esto hace pensar que las respuestas obtenidas por el algoritmo epigenético están fuertemente condicionadas por el espacio de soluciones donde se encuentre, quizá debido al azar en la elección de la población inicial. El hecho de que el algoritmo epigenético sea capaz de encontrar soluciones mínimas de valores muy cercanos al del algoritmo genético completo, refuerza esta idea.

8.4 Extensiones del Algoritmo Epigenético

Comparados los dos algoritmos, y con el fin de mejorar las soluciones del epigenético, se han probado diferentes cambios en éste, todos ellos para disminuir la influencia de la población inicial en el resultado. Así, se ha aumentado la probabilidad de mutación, no obteniéndose grandes mejoras. También se ha incrementado el número de individuos en la población base, mejorando un poco los resultados, pero con un gran aumento de los tiempo de cálculo.

Como estos pequeños cambios no mejoran el resultado, el siguiente paso consiste en un estudio profundo del algoritmo. Así, analizándolo se constata que para poder realizar los cálculos de consumo, se parte de unas tolvas con alturas fijas, y posteriormente el genético-seguidor optimiza estas alturas. La cuestión que se plantea es que quizás estas alturas predeterminadas limitan la búsqueda a un espacio de soluciones del cual, una vez elegida la población inicial, no se puede salir.

Así, la propuesta es realizar la optimización por etapas, e ir aproximándose poco a poco a la solución. La idea es como jugar al golf: primero se hace una aproximación basta al hoyo y, conforme se está más cerca, se cambia de palo para ir afinando la puntería.

El punto de partida es el mismo salvo que ahora, después de una pocas iteraciones con el genético-líder, se realizan unas pocas iteraciones con el genético-seguidor con la mejor solución encontrada. Las alturas obtenidas en ese momento se utilizarán para proseguir con el algoritmo genético-líder, ejecutando una segunda tanda de iteraciones, en mayor número que la primera vez, y, calculando para la solución obtenida la mejor altura de tolvas con el genético-seguidor, aumentando también en este caso el número de iteraciones respecto al primero. Este ciclo se repetirá un número de veces.

El algoritmo probado, llamado en adelante *EpigenéticoPar4*, está compuesto por cuatro de los ciclos antes descritos, con la siguientes características:

Ciclos	Iteraciones líder	iteraciones seguidor	Resolución Simulación
1 ^a	5	2	120
2 ^a	40	4	200
3 ^a	135	6	280
4 ^a	320	8	360

Tabla 71: Descripción Ciclos EpigenPar4

El número de iteraciones del genético-líder crece con el número de ciclos, siguiendo la siguiente fórmula $N^{\circ}\text{Ciclos}=5*\text{etapa}^3$. Por otro lado, la población base del genético-líder pasa de 10 a 20, ya que el tiempo de cálculo no aumenta perceptiblemente. La población del genético-seguidor sigue siendo 4 ya que cualquier aumento, incrementa enormemente el tiempo de cálculo.

En el *Anexo Simulación, Resolución* :delta se detalla la relación entre la resolución y el tiempo de cálculo, así como entre la resolución y la precisión del resultado.

Así, en la primera etapa, las alturas de las tolvas para todos los genes se calculan aplicando la heurística; en el segundo ciclo, la altura que se aplica a todos los genes es la hallada para el mejor de ellos por el algoritmo epigenético y así sucesivamente.

El esquema global se detalla a continuación:

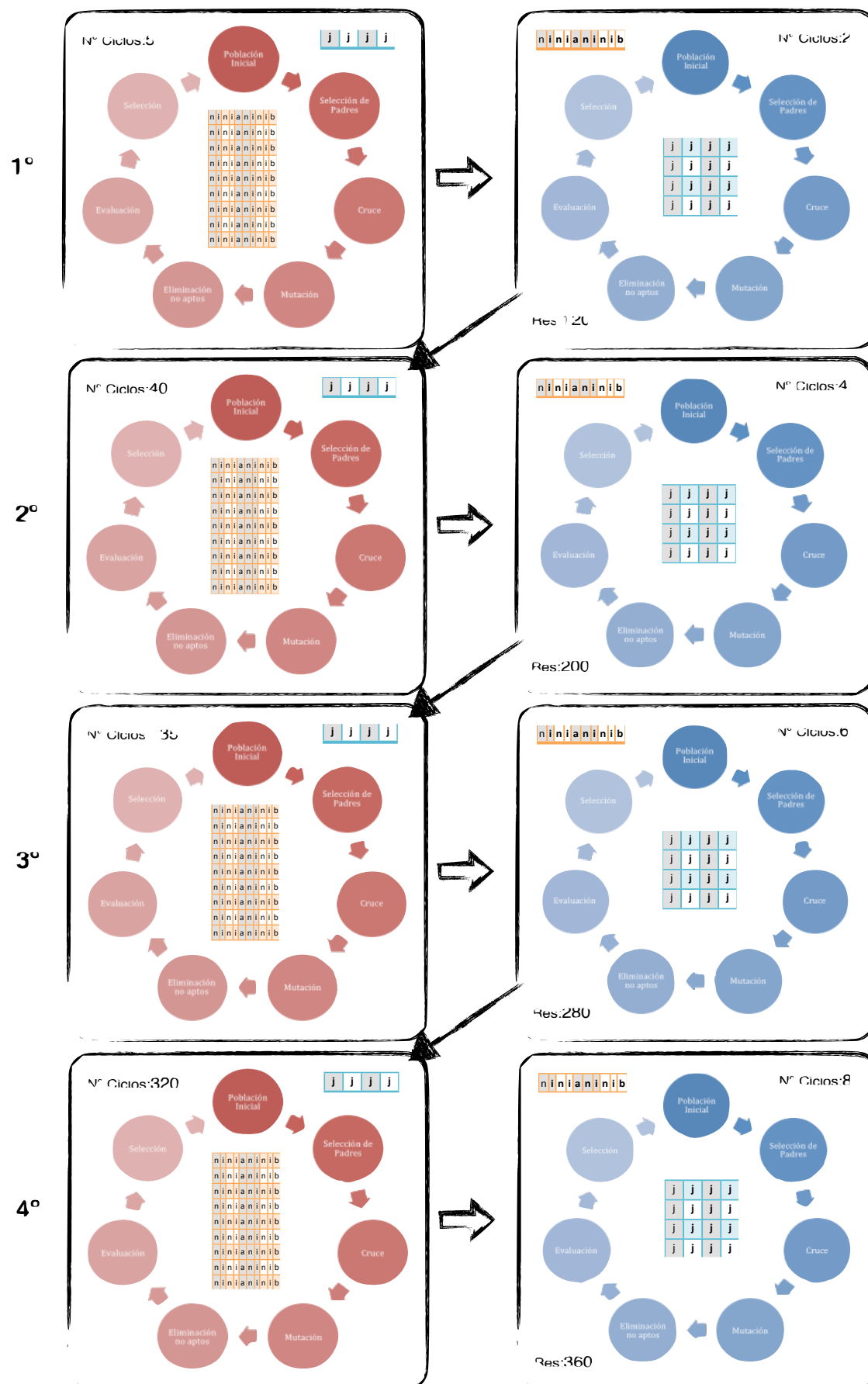


Figura 15: Algoritmo Epigenético Par 4, resumen

Los tiempos de cada una de las etapas para un problema concreto es:

Ciclos	tiempo genético líder (seg)	tiempo genético seguidor (seg)	tiempo total (min)
1ª	0,15	367	6
2ª	1,1	878	21
3ª	3,8	1470	45
4ª	6,5	1810	75

Tabla 72: Desglose de tiempos Algoritmo EpigenéticoPar4

En la Tabla 73: Comparativa Genético & EpigenéticoPar4, se presentan los resultados obtenidos con esta nueva versión del epigenético, dejando a los dos algoritmos finalizar todas las iteraciones.

Problema	Varemos	Genético		EpigenPar4		Gen-Epi	% Gen-Epi
A	min	1.693.000 €	4,5h	0,6h	1.637.400 €	55.600 €	3%
	promedio	1.955.500 €			1.912.580 €	42.920 €	2%
	max	2.357.600 €			2.116.400 €	241.200 €	10%
	desviación	188.985 €			178.607 €		
	promed/desv	10%			9%		
B	min	834.960 €	8,2h	1,4h	821.550 €	13.410 €	2%
	promedio	902.997 €			948.471 €	-45.474 €	-5%
	max	1.012.800 €			1.165.100 €	-152.300 €	-15%
	desviación	49.215 €			109.811 €		
	promed/desv	5%			12%		
C	min	4.568.900 €	8,2h	1,3h	4.320.300 €	248.600 €	5%
	promedio	4.832.140 €			4.447.560 €	384.580 €	8%
	max	5.261.700 €			4.674.100 €	587.600 €	11%
	desviación	262.847 €			119.521 €		
	promed/desv	5%			3%		
D	min	849.090 €	8,2h	1,3h	800.600 €	48.490 €	6%
	promedio	1.007.734 €			954.341 €	53.393 €	5%
	max	1.417.700 €			1.170.700 €	247.000 €	17%
	desviación	162.974 €			105.088 €		
	promed/desv	16%			11%		

Tabla 73: Comparativa Genético & EpigenéticoPar4

Un primer resultado es referente al tiempo de computación. En la tabla se muestra el tiempo medio que tarda el *EpigenéticoPar4* en realizar una réplica, que para el problema A es de 0,6h, mientras que al genético estándar le cuesta 4,5h. En general, el nuevo epigenético es 6 veces más rápido.

Respecto a la calidad de la solución, con el *EpigenéticoPar4* se mejora respecto al epigenético inicial. Si se compara con el genético estándar, se observa que en todos los casos, se obtiene el mejor valor con el nuevo, mejorando hasta un 6% los resultados del estándar. También se ha mejorado mucho en el valor máximo y promedio, adelantando al estándar en todos los problemas excepto en el B. Por último, destacar que la dispersión de los resultados obtenidos tras 10 iteraciones también se ha reducido mucho, lo que significa que no sólo es capaz de encontrar una solución muy buena, sino que el resto se encuentran cerca de ésta.

A la vista de estos resultados, se puede concluir que el algoritmo *EpigenéticoPar4* es claramente superior a los otros dos para la resolución de este tipo de problemas.

9 Conclusiones y Trabajos futuros

Tal y como se había comentado durante el desarrollo de este trabajo no se han encontrado estudios que realicen la optimización del proceso de selección y dimensionamiento de equipos en instalaciones de molienda.

La metodología de optimización a obligado primeramente a lograr parametrizar todo el proceso. Nuevamente se ha constatado que, si bien ciertas áreas están ampliamente desarrolladas en la industria (por ejemplo las relativas a las cintas Transportadoras), en otras áreas como la energía consumida en la trituración en molinos de martillos y desmenuzadores no se posee una información lo suficientemente consolidada. Finalmente se ha logrado una parametrización consistente de todos los elementos de la Instalación que garantiza unos resultados en la valoración de los costes correcta.

Para poder evaluar correctamente la instalación ha sido necesario desarrollar una metodología para poder simular el comportamiento a la largo del tiempo del sistema de forma adecuada.

Debido a la alta factibilidad del problema se ha tenido que recurrir al uso de algoritmos evolutivos. Se ha evaluado el sistema para cuatro problemas propuestos mediante un algoritmo genético estándar y al constatar el tiempo tan elevado de cálculo se ha optado por desarrollar un nuevo algoritmo denominado Algoritmo Epigenético obteniendo resultados satisfactorios.

Se han evaluado los problemas tipo propuestos con este algoritmo encontrándose resultados adecuados para poder mejorar la optimización del proceso de selección y dimensionamiento de equipos en instalaciones de molienda, lo cuál era el objetivo final de este trabajo.

Finalmente se ha desarrollado un nuevo algoritmo que se ha denominado Algoritmo EpigenéticoPar4 que mejora aún más el algoritmo anterior.

Los resultados de este trabajo animan a ampliar el estudio de estos sistemas ampliando el rango de aplicación a instalaciones más complejas, por vía húmeda, con lazos cerrados como ocurre en sistemas con tamices,...

Se ha trabajado con un único producto, pero se podría trabajar con varios, con requerimientos variables de granulometría y de producción, con variaciones a lo largo del tiempo del material a la entrada del sistema, de su dureza, etc

Se podría incluso incidir en la optimización del funcionamiento de los Molinos y Desmenuzadores. Sería interesante mejorar la modelización de cómo trabajan estas máquinas pudiendo introducir más parámetros de evaluación tales como la dureza del material, la distribución granulométrica (sobre todo si se van a introducir los tamices en la instalación), la velocidad de los ejes,...

Y finalmente se podría trabajar en el algoritmo genético desarrollando su adaptabilidad a diferentes problemas.

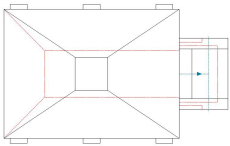
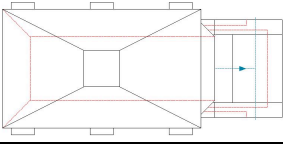
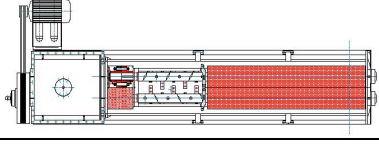
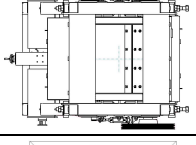
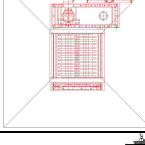
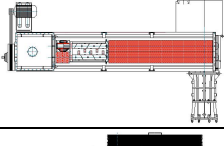
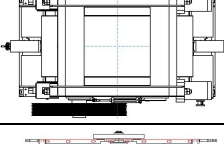
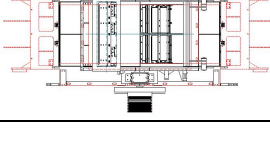
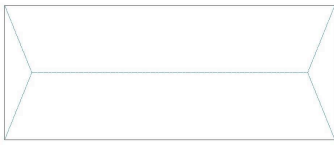
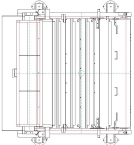
10 Anexos

10.1 Bibliografía

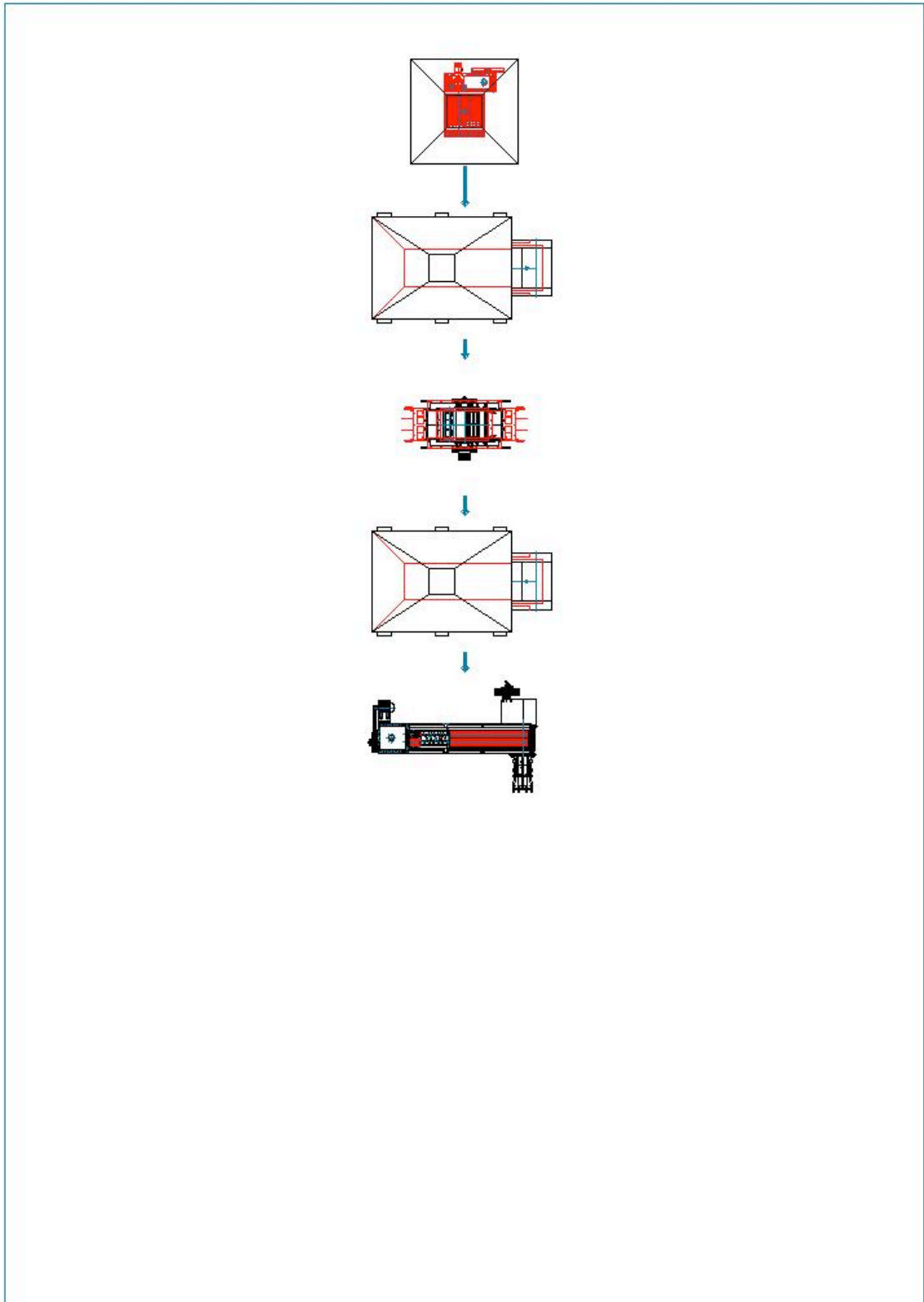
- Bitelli, M, GS Campbell, y M Flury. «Characterization of particle-size distribution in soils with a fragmentation model.» *Soil Science Society of America Journal* 63, nº 4 (1999): 782-788.
- Bond, FC. «The third theory of comminution.» *Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers* 193 (1952): 484-494.
- Castro, PM, AP Barbosa-Póvoa, HA Matos, y AQ Novais. «Simple continuous-time formulation for short-term scheduling of batch and continuous processes.» *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 2004: 43:105-18.
- Castro, PM, AP Barbosa-Póvoa, y AQ Novais. «Simultaneous design and scheduling of multipurpose plants using resource task based continuous-time formulations.» *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 2005: 44:343-57.
- Davis, L. «Handbokk of genetic algorithms.» *Van Nostrand Reinhold*, 1991: 1991.
- Etienne Parent, Leon, Serge Etienne Parent, Thomas Kätterer, y Juan José Egozcue. «Fractal and compositional analysis of soil aggregation.» *Proceedings of the 4th International Workshop on Compositional Data Analysis*. Sant Feliu e Guixols: CoDaWork, 2011. 1-15.
- Floudas, CA, y X Lin. «Continuous-time versus discrete-time approaches for scheduling of chemical processes: a review.» *Computer and Chemical Engineering*, 2004: 44:343-57.
- Goldberg, D. E. «Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning.» *Addison-Wesley*, 1989: 3:153-171.
- Grossmann, I. «Enterprise-wide optimization:a new frontier in process systems engineering.» *AIChE Journal*, 2005: 51:1846-57.
- Hollan, J. «Adaptation in Natural and Artificial Systems.» *The University of Michigan Press, Ann Arbour*, 1975.
- Hopper, E, y B Turton. «A genetic algoritm for a 2D industrial packing problem.» *Computer and Industrial Engineering* 37 (1999): 375-378.
- Hukki, R.T. «Proposal for a solomnic settlement between the theories of von Rittinger, Kick and Bond.» *Trans A.I.M.E.*, 1962: 223.
- Kallrath, J. «Planning and scheduling in the process industries.» *OR Spectrum*, 2002: 24:219-50.
- Kick, Friedrich. *Law of Proportional Resistances*. 1885.
- Kondili, E, CC Pantelides, y RWH Sargent. «A general algorithm for short-term scheduling of batch operations-I MILP formulation.» *Computer and Chemical Engineering*, 1993: 17:211-27.
- Lin, X, y CA Floudas. «Design, synthesis and sheduling of multipurpose batch plants via an effective continuous-time formulation.» *Computer and Chemical Engineering*, 2001: 25:665-74.
- Méndez, CA, J Cerdá, IE Grossmann, I Harjunkski, y M Fahl. «State-of-the-art reviwie of otimization methods for short-term scheduling of batch processes.» *Computers and Chemical Engineering*, 2006: 30:913-46.
- Miao, Z, TE Grift, AC Hansen, y KC Ting. «Energy requirement for comminution of biomass in relation to particle physical properties.» *Industrial crops and products* 33, nº 2 (03 2011): 504-513.

- Michalewicz, Z. «Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs.» *Springer-Verlag*, 1992.
- Ni, HY, WM Zheng, XL Liu, y YC Gao. «Fractal-statistical analysis of grain-size distributions of debris-flow deposits and its geological implications.» *Landslides* 8, nº 2 (2011): 253-259.
- P.M. Duarte, Belmiro, Lino O. Santos, y Jorge S. Mariano. «Optimal sizing, scheduling and shift policy of the grinding section of a ceramic tile plant.» *Computer & Operations Research*, 2008: 36:1825-34.
- Pantelides, CC. «Unified frameworks for optimal process planning and scheduling.» *Foundations of computer aided process operations*, 1994: 253-74.
- Reeves, C. «A genetic algorithm for flowshop sequencing.» *Computer & Operations Research* 22 (1995): 5-13.
- Rittinger, Peter Ritter Von. *Lehrbuch der Aufbereitungskunde*. 1867.
- Rulmeca. «Bulk Handling.» *Rodillos y componentes para el transporte por banda de material a granel*. Rulli Rulmeca SpA, 2000.
- Shi, FN, T Kojovic, JS Esterle, y D David. «An energy-based model for swing hammer mills.» *International Journal of Mineral Processing* 71, nº 1-4 (2003): 147-166.
- Trumic, M, y N Magdalinovic. «New model of screening kinetics.» *Minerals Engineering* 24, nº 1 (2011): 42-49.
- Walker, W.H., W.K. Lewis, W.H. Mcadams, y E.R. Gilliland. «Principles of Chemical Engineering.» (McGraw-Hill) 1937.
- Xie, S.Q., J. Gan, y G. Gary Wang. «Optimal process planning for compound laser cutting and punch using Genetic Algorithms.» *Mechatronics and Manufacturing Systems* 2, nº 1/2 (2009): 20-38.
- Zambrano, AR. «General work input function for sizing grinding ball mills.» 19, nº 4 (2001): 178-186.

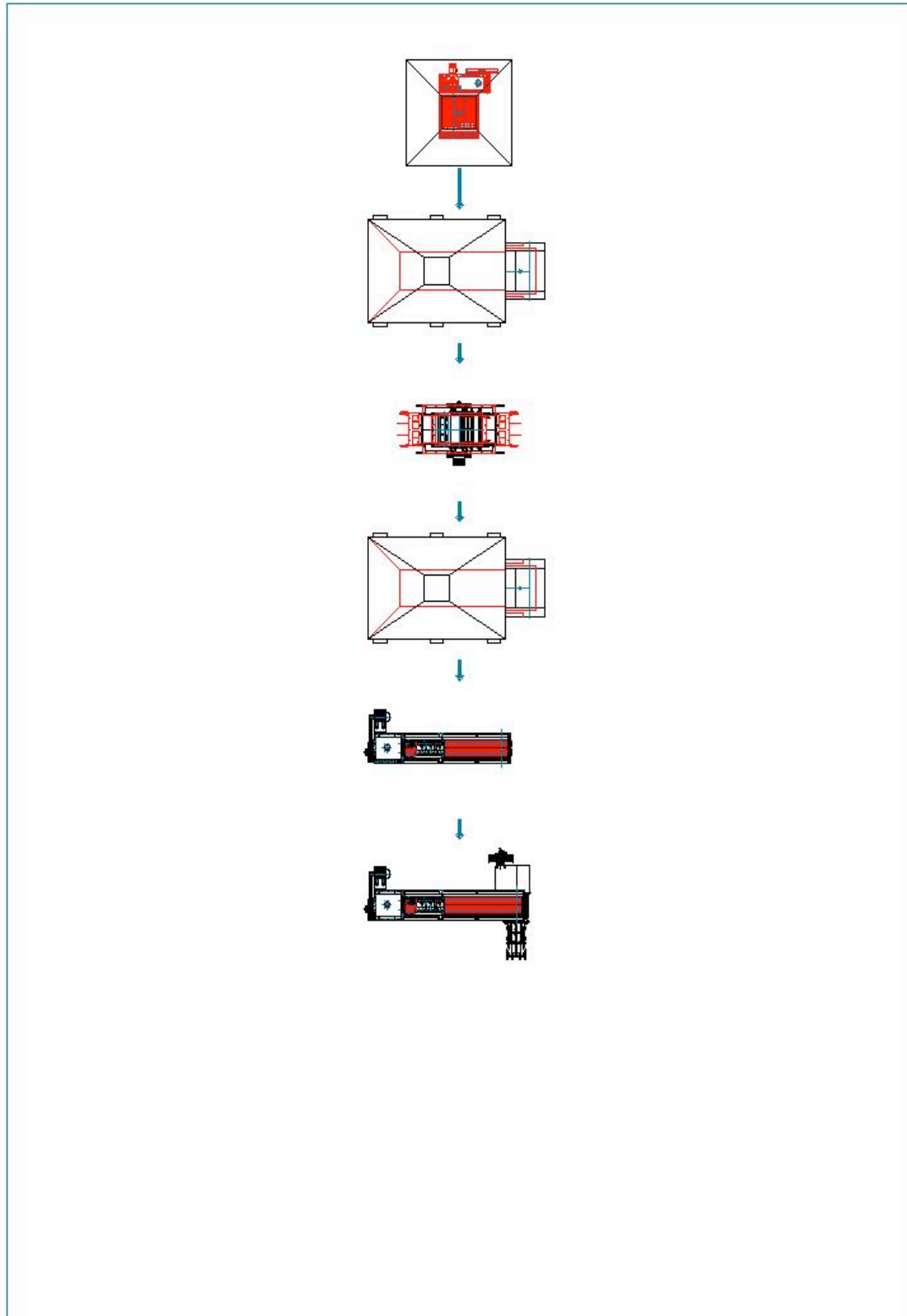
10.2 Anexo: Esquemas de Instalaciones de Molienda

	Alimentador
	Alimentador de Barro
	Amasadora
	Cepillador
	Desmenuzador
	Bomba de Vacio
	Laminador
	Molino de Martillos
	Pudridero
	Tamiz

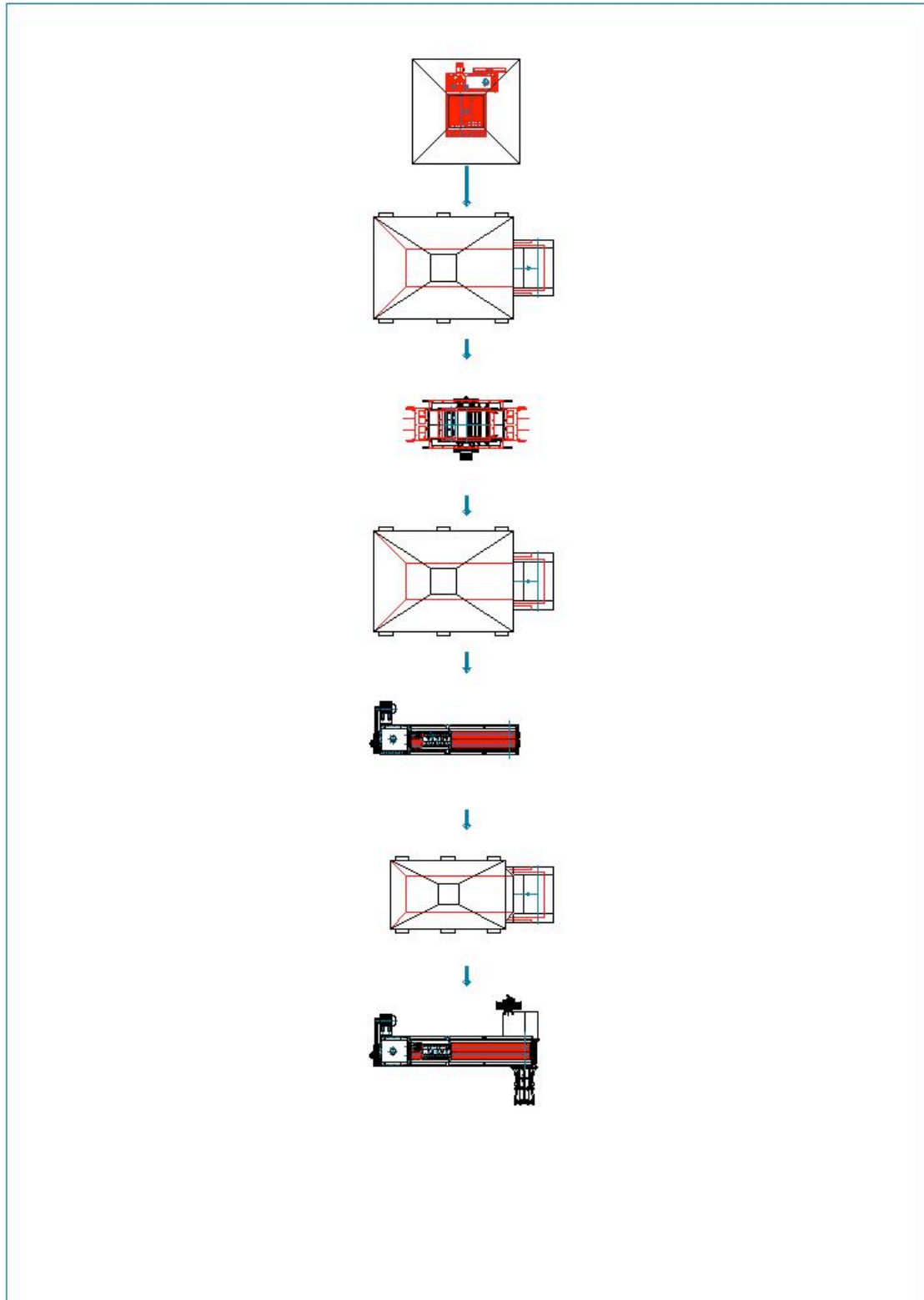
leyenda



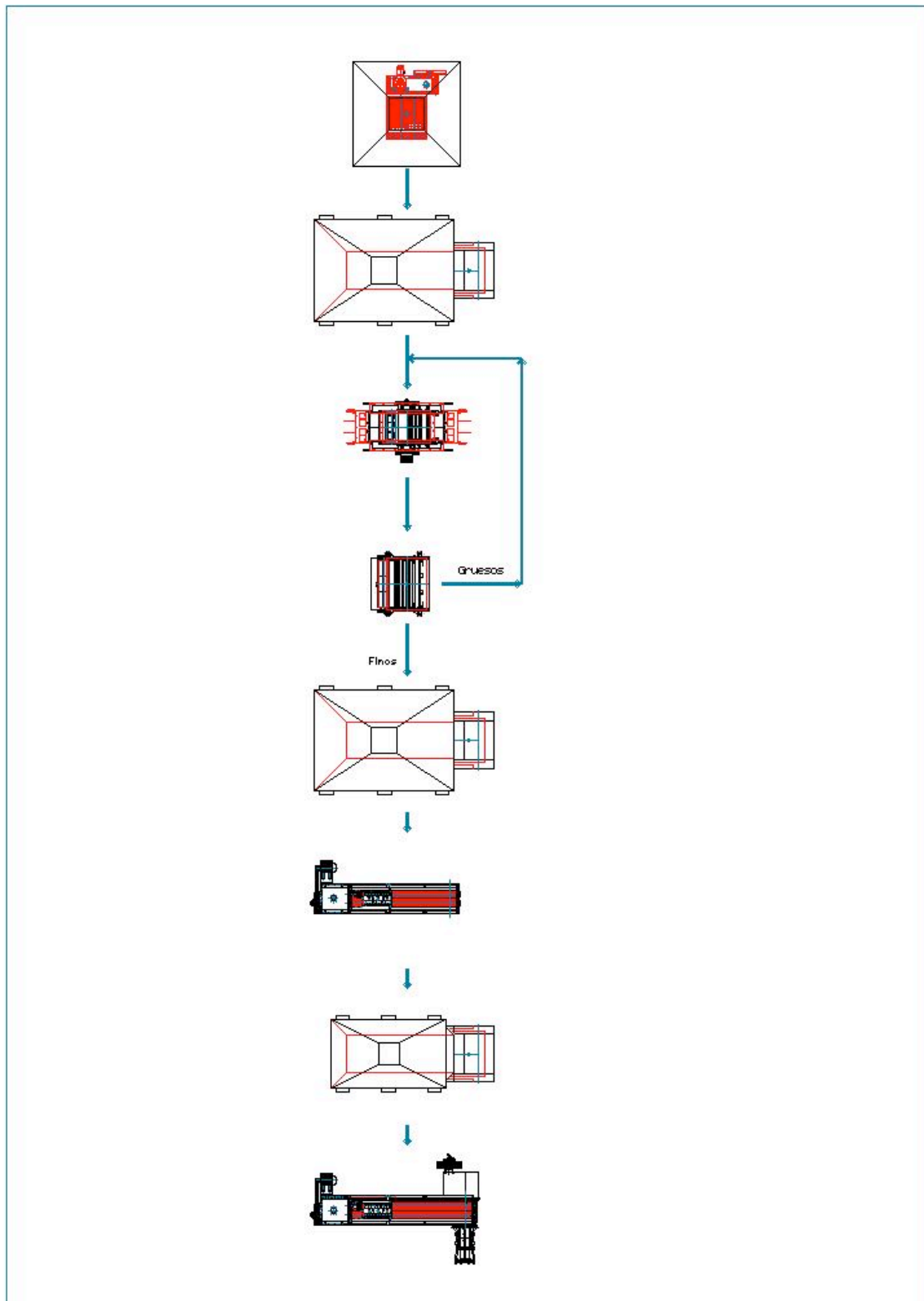
Vía Seca Básica



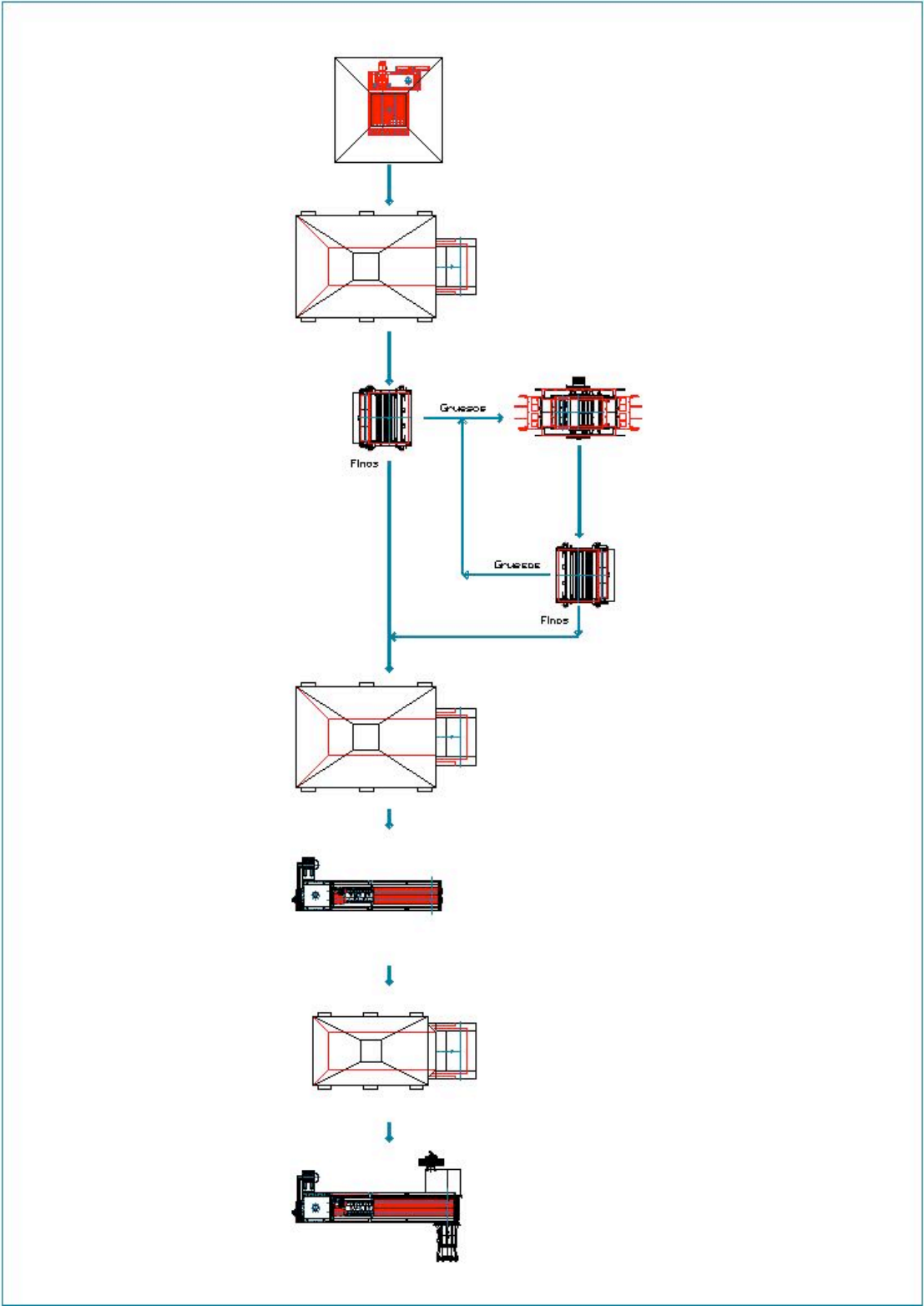
Vía Seca con preamasado



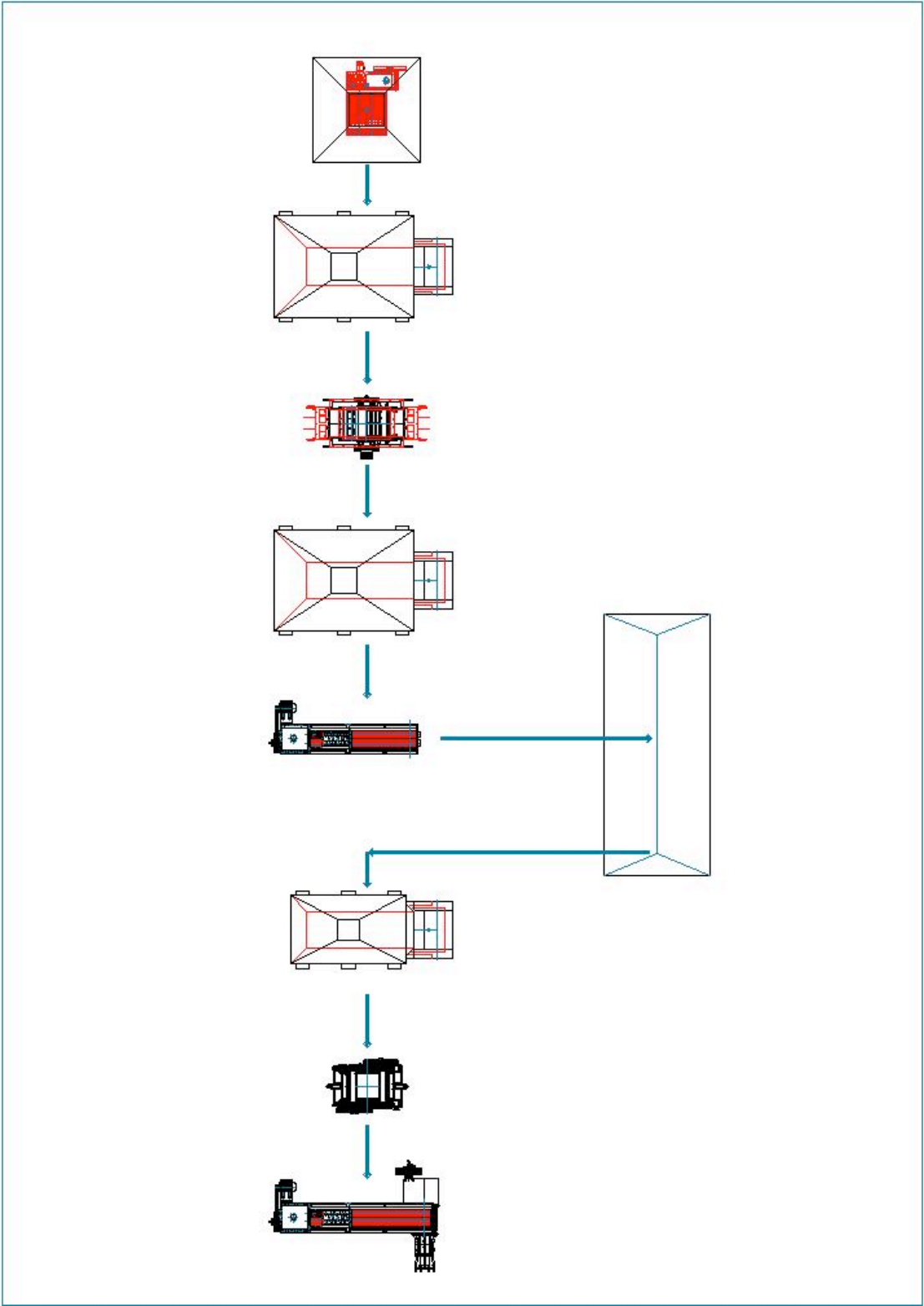
Vía Seca con premasado y reposo de arcilla



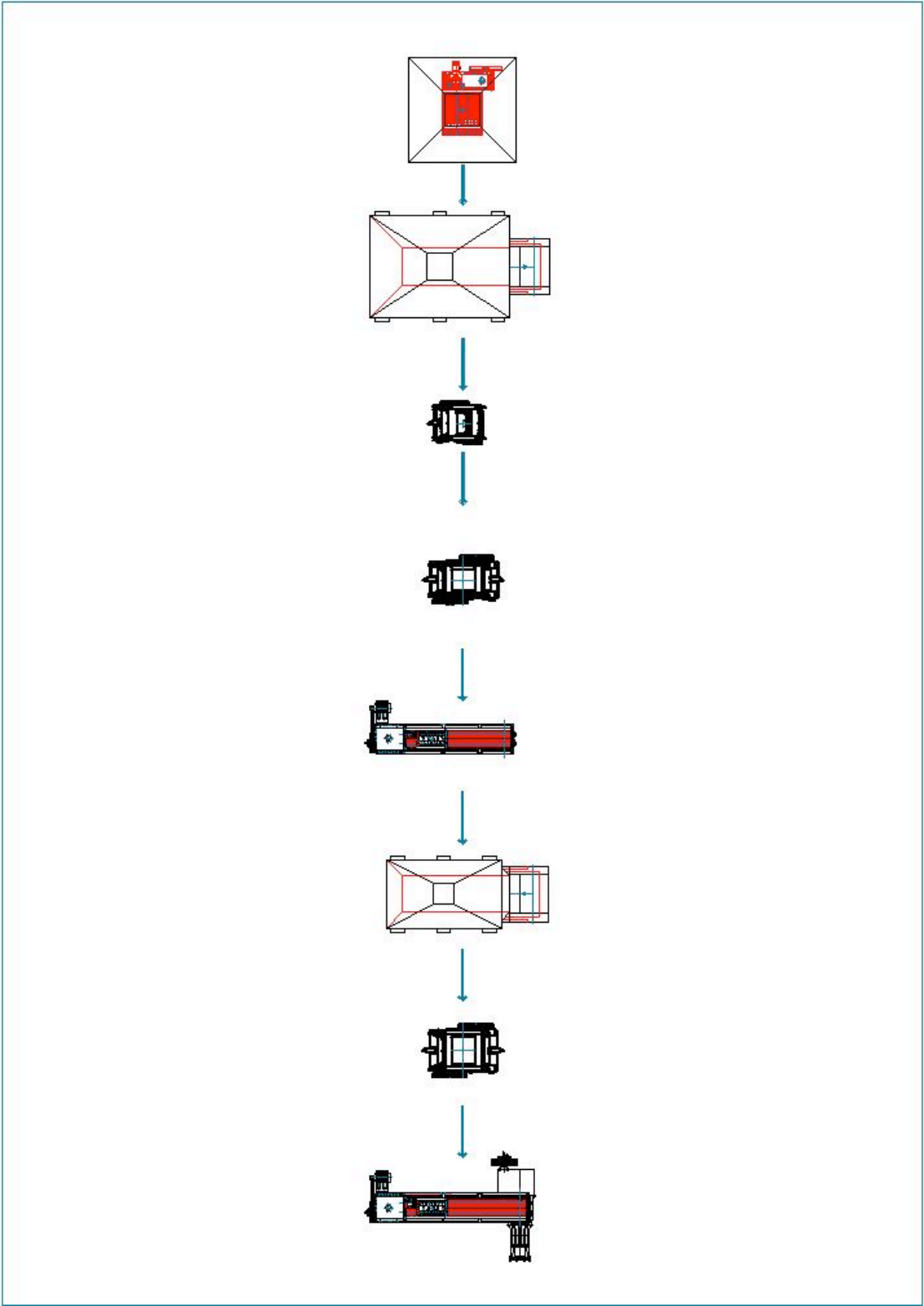
Vía seca con tamiz secundario

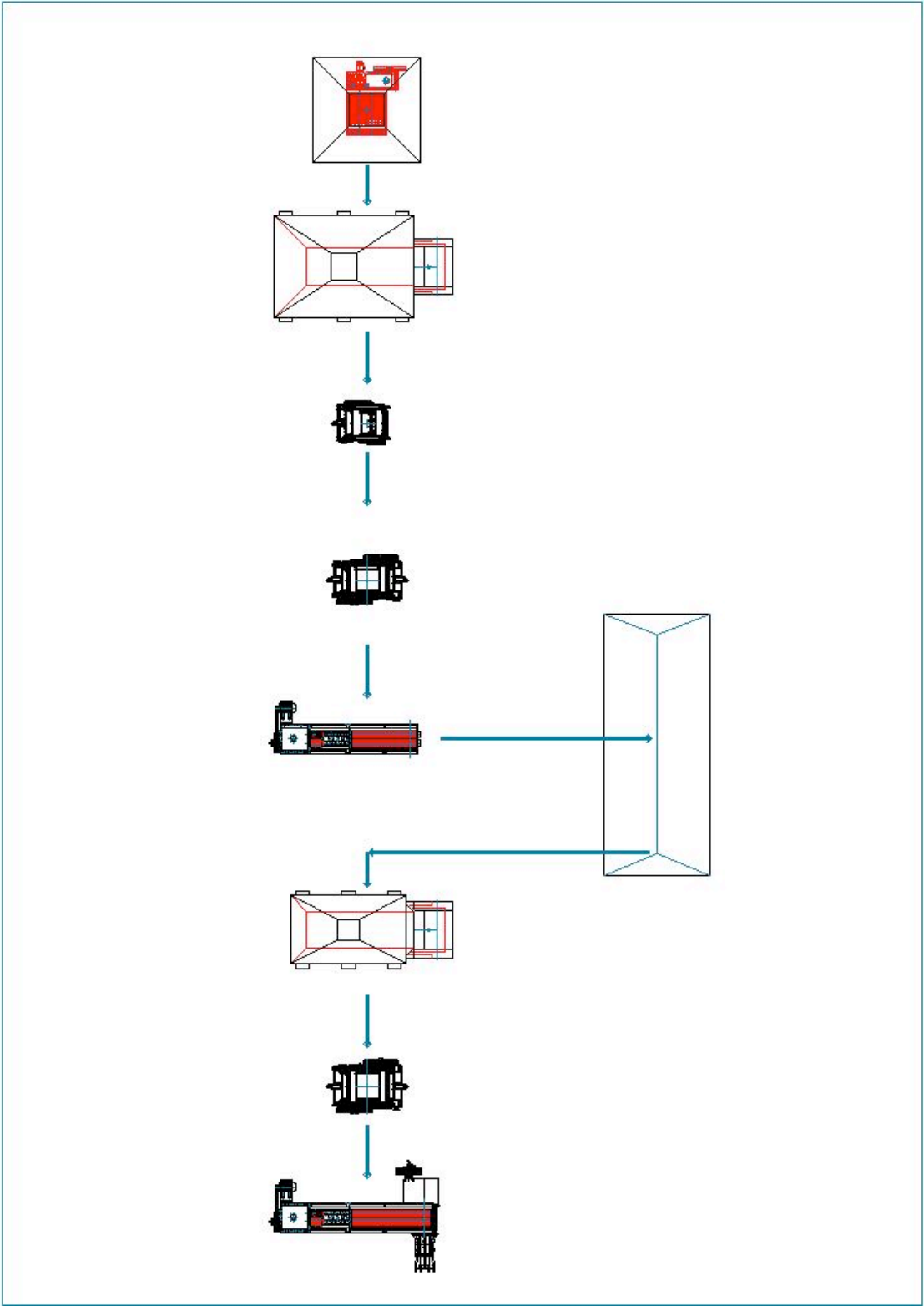


Vía seca contamiz primario y secundario

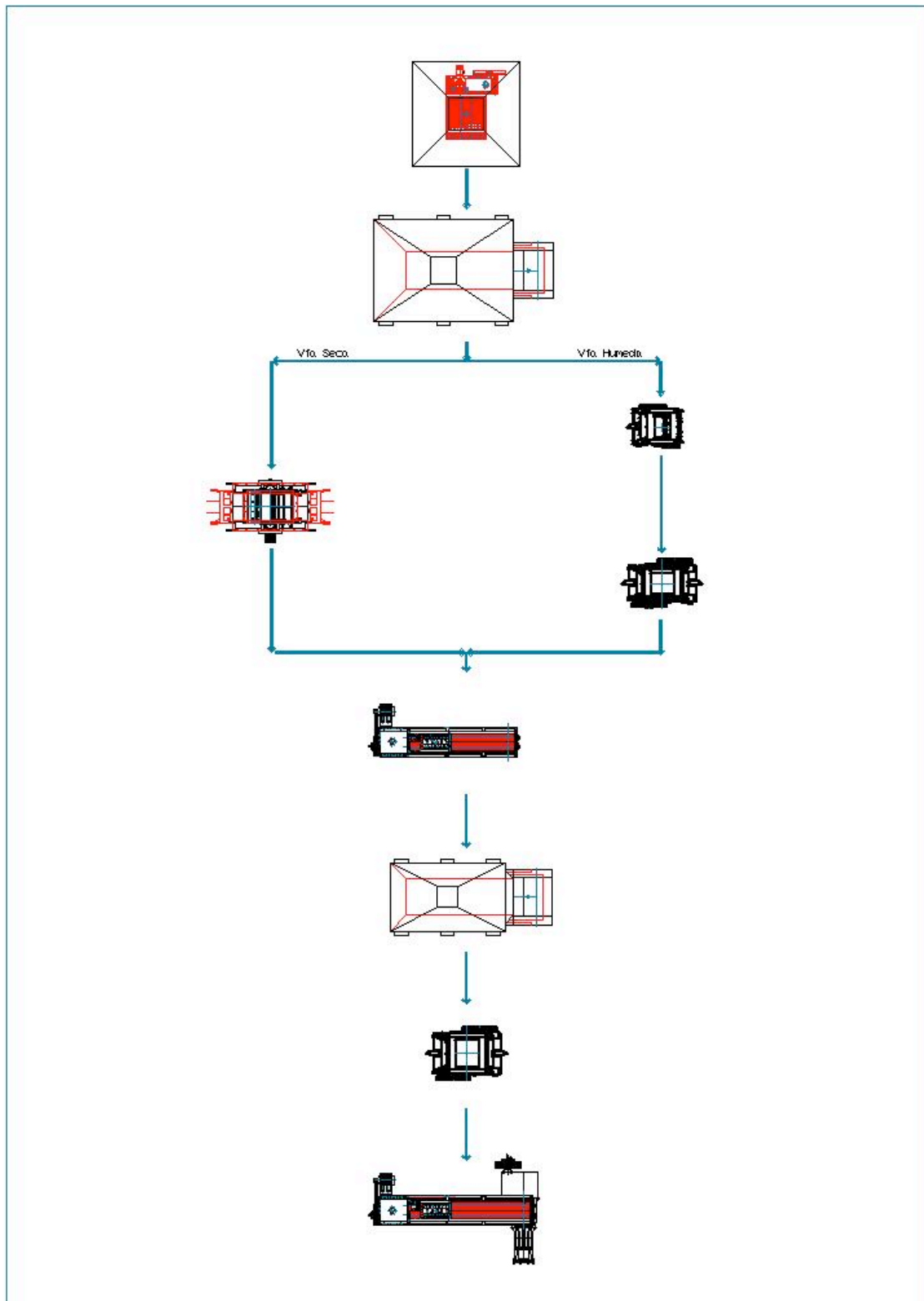


Vía seca con pudridero





Vía Húmeda con Pudridero



Instalación Mixta: Vía seca y vía húmeda

10.3 Anexo: Análisis de la Factibilidad

Estudio de la factibilidad para un caso práctico

H: 6 m	turno/día 2
m: 4%	días/semana 6
\varnothing_s^0 : 10 mm	periodo evaluación 1 semana
\varnothing_e^{10} : 250 mm	semanas/año 52
Ps ⁰ : 145 t/h	Jornada 7,5 h
NS: 90%	Pausa Producción 0,5 h
Coste Electricidad: 58,47 €/MWh	Horas Evaluación 90 h
	Horas Totales 46.800 h

Desarrollo de la factibilidad

Factibilidad

$b=[2,3,4,5]$.

Si $b=2$

k:2 AB. Alimentador de banda

n	1	2	3	4	5
i					
1	FALSO	FALSO	VERDADERO	VERDADERO	VERDADERO
2	FALSO	FALSO	VERDADERO	FALSO	FALSO
3	FALSO	VERDADERO	FALSO	FALSO	FALSO
4	VERDADERO	FALSO	FALSO	FALSO	FALSO

$ni=14;23;31;32;41;51$

j	1	2	3	4	5
j	VERDADERO	VERDADERO	VERDADERO	FALSO	FALSO

$j=0;1;2$

$Combinatoria=6 \cdot 3 \cdot 1=18$

k:4 MM. Molino de Martillos

n	1	2	3	4	5
i					
1	FALSO	FALSO	FALSO	FALSO	VERDADERO
2	FALSO	FALSO	FALSO	VERDADERO	VERDADERO
3	FALSO	FALSO	VERDADERO	VERDADERO	VERDADERO
4	FALSO	VERDADERO	VERDADERO	VERDADERO	VERDADERO
5	FALSO	VERDADERO	VERDADERO	VERDADERO	VERDADERO

j	1	2	3	4
i				
1	VERDADERO	VERDADERO	FALSO	FALSO
2	VERDADERO	VERDADERO	FALSO	FALSO
3	VERDADERO	FALSO	FALSO	FALSO
4	VERDADERO	FALSO	FALSO	FALSO
5	VERDADERO	FALSO	FALSO	FALSO

$nij=241;251;331;341;351;421;422;431;441;451;511;512;521;522;531;541;551$

$Combinatoria=17$

k:6 AB. Alimentador de banda

$a=1 \rightarrow$

n	1	2	3	4	5
i					
1	FALSO	FALSO	VERDADERO	VERDADERO	VERDADERO
2	FALSO	FALSO	VERDADERO	FALSO	FALSO
3	FALSO	VERDADERO	FALSO	FALSO	FALSO
4	FALSO	VERDADERO	FALSO	FALSO	FALSO

j	1	2	3	4	5
j	VERDADERO	VERDADERO	VERDADERO	FALSO	FALSO

$$ni=23;24;31;32;41;51 \quad j=1,2,3 \quad 6 \cdot 3=18$$

$$\begin{aligned} a=2 \rightarrow ni=24;32;41;51 & \quad j=1,2,3 \quad 4 \cdot 3=12 \\ a=3 \rightarrow ni=24;32;41;51 & \quad j=1,2,3 \quad 4 \cdot 3=12 \\ a=4 \rightarrow ni=32;33;41;42;51 & \quad j=1,2,3 \quad 5 \cdot 3=15 \\ a=5 \rightarrow ni=33;34;42;51;52 & \quad j=1,2,3 \quad 5 \cdot 3=15 \\ a=6 \rightarrow ni=43;44;52;53 & \quad j=1,2,3 \quad 4 \cdot 3=12 \\ \text{Combinatoria} &= 18+12+12+15+15+12=84 \end{aligned}$$

k:8 DT. Desmenuzador

n	1	2	3	4	5
i Pi	129,7	64,9	43,2	32,4	25,9
1	FALSO	FALSO	FALSO	FALSO	FALSO
2	FALSO	FALSO	FALSO	VERDADERO	VERDADERO
3	FALSO	FALSO	FALSO	VERDADERO	VERDADERO
4	FALSO	FALSO	VERDADERO	VERDADERO	VERDADERO
5	FALSO	VERDADERO	VERDADERO	VERDADERO	VERDADERO
6	VERDADERO	VERDADERO	VERDADERO	VERDADERO	VERDADERO

j j	1	2	3	4	5
i 1	VERDADERO	VERDADERO	VERDADERO	FALSO	FALSO
2	VERDADERO	VERDADERO	VERDADERO	FALSO	FALSO
3	VERDADERO	VERDADERO	VERDADERO	FALSO	FALSO
4	VERDADERO	VERDADERO	VERDADERO	FALSO	FALSO
5	VERDADERO	VERDADERO	FALSO	FALSO	FALSO
6	VERDADERO	VERDADERO	FALSO	FALSO	FALSO

$$nij=161;162;251;252;261;262;341;342;343;421;422;423;431;432;433;441;442;443;451;452;461;462;521;522;523;534;532;533;541;542;543;551;552;562;563$$

$$\text{Combinatoria}=35$$

k:10 CN Cantera

$$a=2$$

$$\text{Combinatoria}=1$$

$$\text{Combinatoria Total}=18 \cdot 17 \cdot 84 \cdot 35 \cdot 1 = 899.640$$

Si $b=3$

k:4 MM. Molino de Martillos (el resto de etapas no cambia)

$$nij=251;331;341;351;421;422;431;441;451;511;512;521;522;531;541;551$$

$$\text{Combinatoria}=16$$

$$\text{Combinatoria Total}=18 \cdot 16 \cdot 84 \cdot 35 \cdot 1 = 856.800$$

Si $b=4$ (no cambia)

$$\text{Combinatoria Total}=18 \cdot 16 \cdot 84 \cdot 35 \cdot 1 = 899.640$$

Si $b=5$ (no cambia)

$$\text{Combinatoria Total}=18 \cdot 16 \cdot 84 \cdot 35 \cdot 1 = 899.640$$

$$\text{Nº de Soluciones factibles} = 3.555.720$$

10.4 Anexo: Evaluación de parámetros del Algoritmo

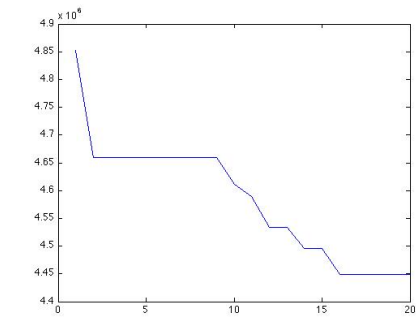
Realizamos cambios parámetro a parámetro para comprobar la influencia en la respuesta.

El problema sobre el que hacemos las pruebas es

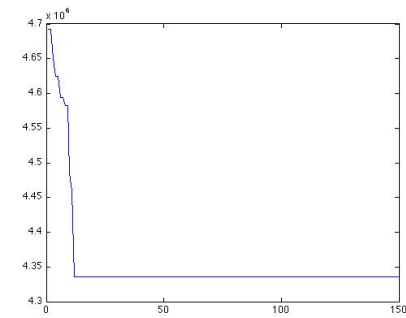
H: 6 m	turno/día	2
m: 4%	días/semana	6
\varnothing_s^0 : 10 mm	periodo evaluación	1 semana
\varnothing_e^{10} : 250 mm	semanas/año	52
Ps ⁰ :145 t/h	Jornada	7,5 h
NS: 90%	Pausa Producción	0,5 h
	Horas Evaluación	90 h
	Horas Totales	46.800 h
Coste Electricidad: 58,47 €/MWh		

10.4.1 Genético, Número de iteraciones: Nitergen

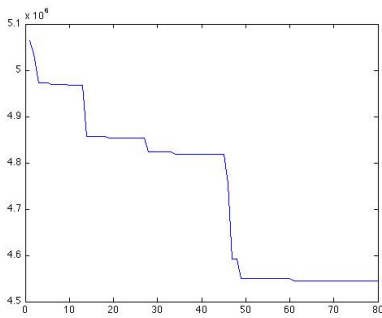
Para un mismo problema se representa como mejora la respuesta en cada iteración. La diferencia de tiempo de cálculo es pequeña.



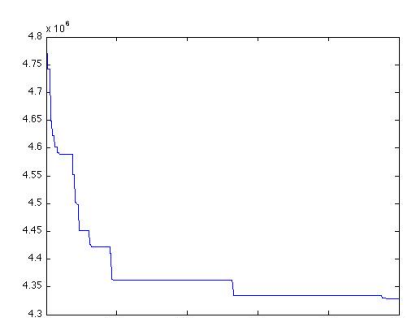
Iteraciones 20



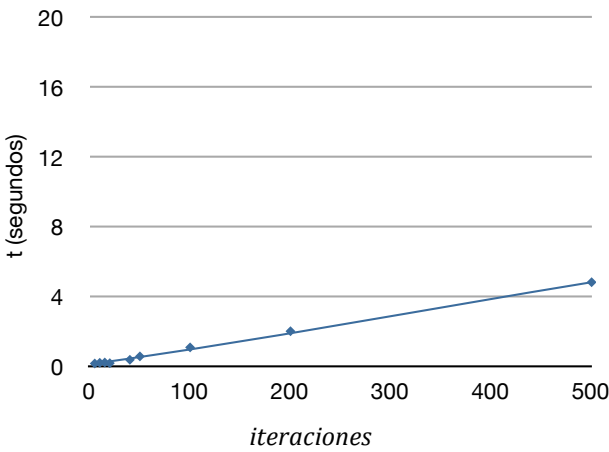
Iteraciones 150



Iteraciones 80

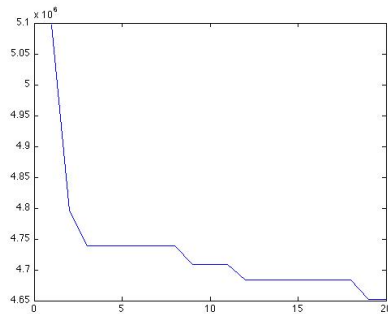


Iteraciones 500

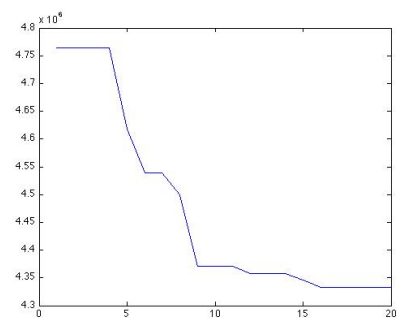


10.4.2 Genético, Tamaño de la Población :NPoblacion

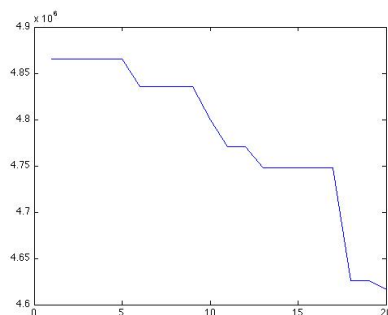
Para el mismo problema se representa como mejora la respuesta en cada iteración si aumentamos la población inicial.



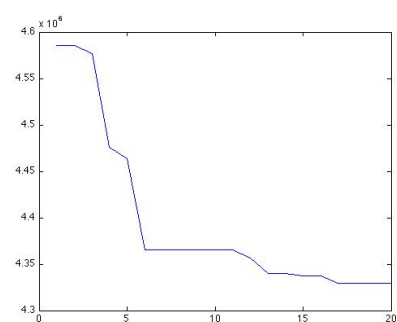
Poblacion:5



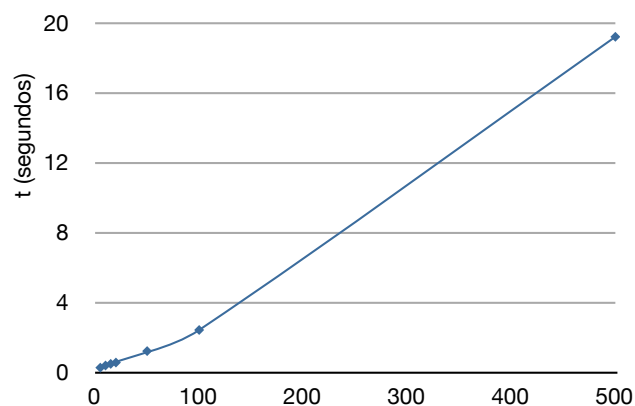
Población: 40



Poblacion:10



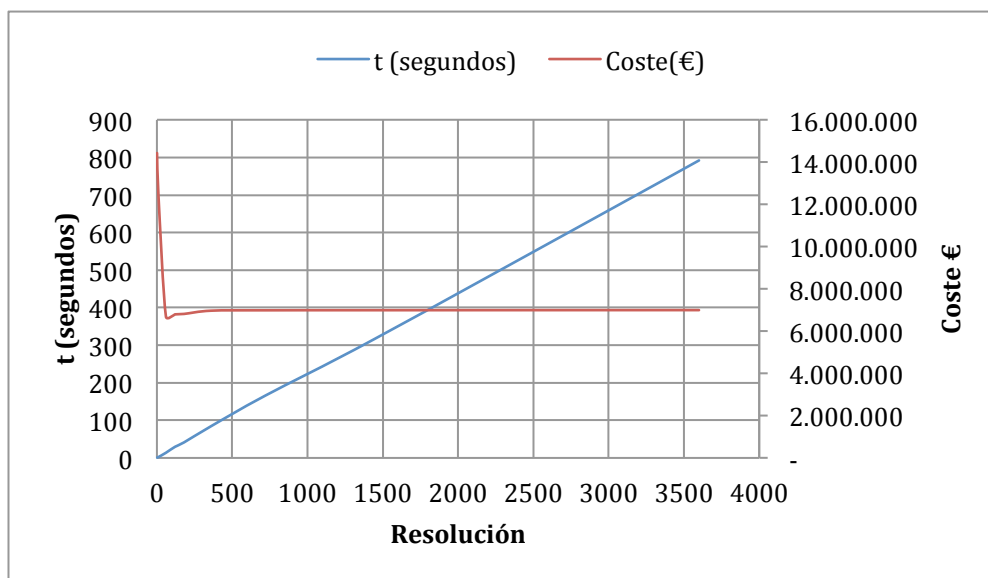
Poblacion: 100



10.4.3 Simulación, Resolución :delta

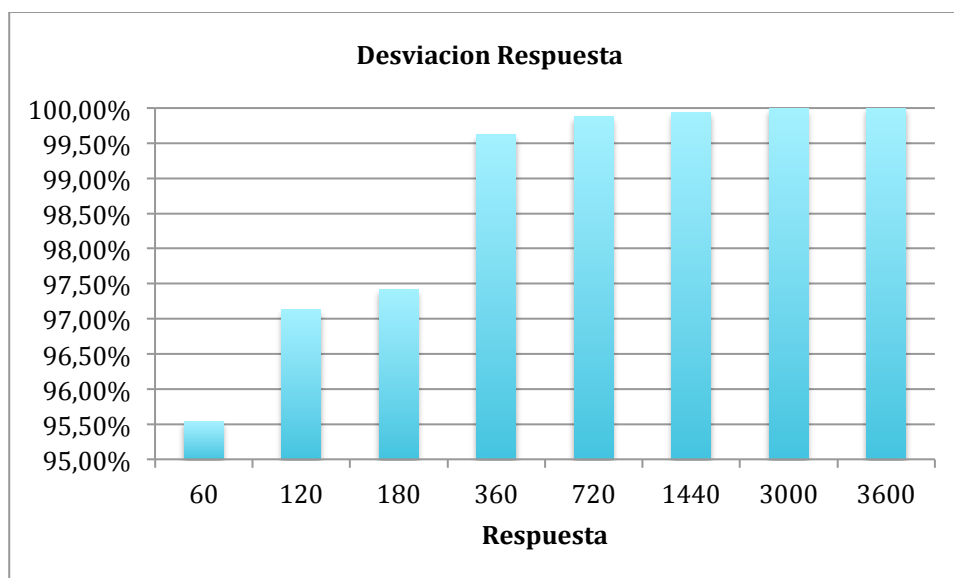
Partiendo de una solución fija evaluamos como varía tanto el tiempo necesario para el cálculo como el coste obtenido.

Cuando simulamos una solución la resolución es determinante en el tiempo empleado en el cálculo. Si la resolución es 1, es decir se calcula de hora en hora el tiempo de cálculo es de 0,7698" sin embargo no es válida porque los volúmenes que por ejemplo alcanzan las tolvas alcanzan valores extremos, tanto negativos como positivos, muy alejados de la realidad.



En los Alimentadores de Banda cuando la altura del material en la tolva es menor que cero consideramos que la resolución es insuficiente.

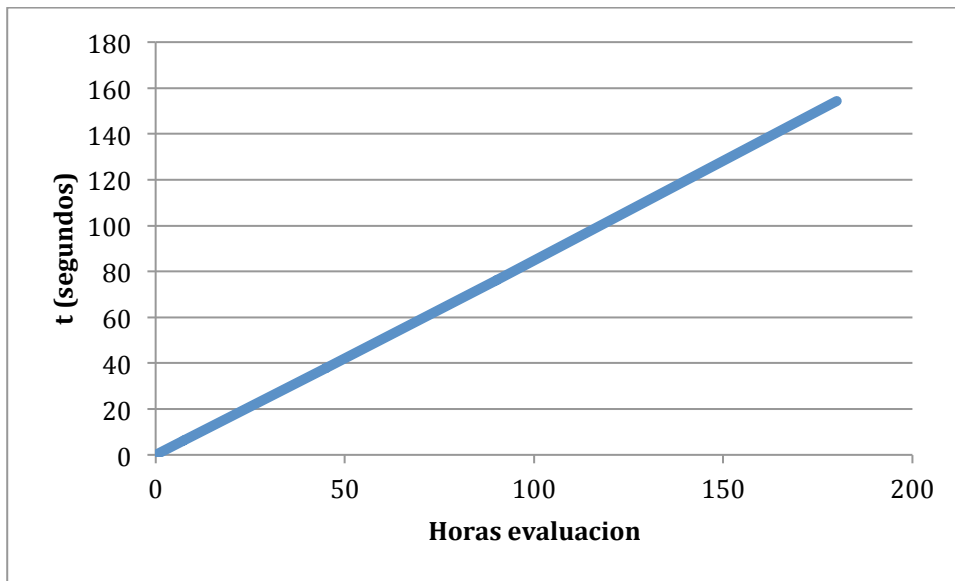
Para resoluciones inferiores a 120 las tolvas dan lugar a valores negativos por debajo de lo que consideramos permitido. Para 120 y 180 no suele haber problemas salvo en el caso de tolvas muy pequeñas en combinación con producciones grandes.



Si consideramos que con la resolución 3600 encontramos la respuesta exacta vemos 360 es una resolución adecuada teniendo en cuenta que aumentando la resolución aumentamos el tiempo de cálculo y el resultado prácticamente no mejora en una proporción medianamente parecida.

10.4.4 Simulación, Semanas de Evaluación :SemanasEvaluacion

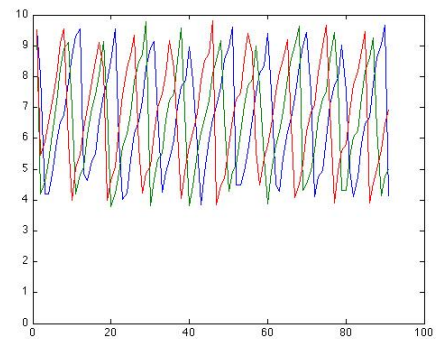
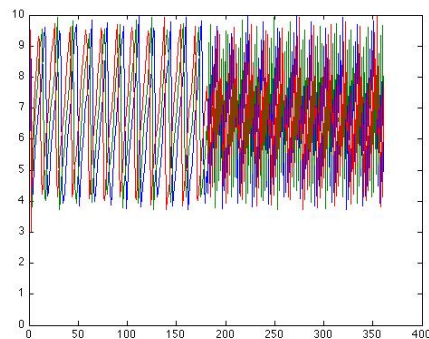
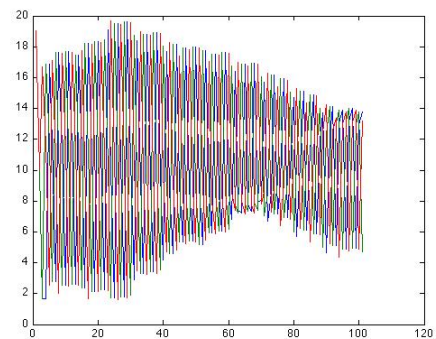
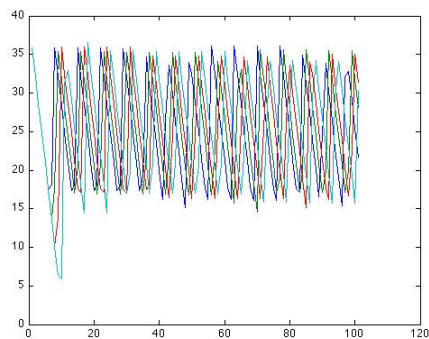
Para el mismo problema se representa como cambia el tiempo de cálculo en función del periodo de evaluación.



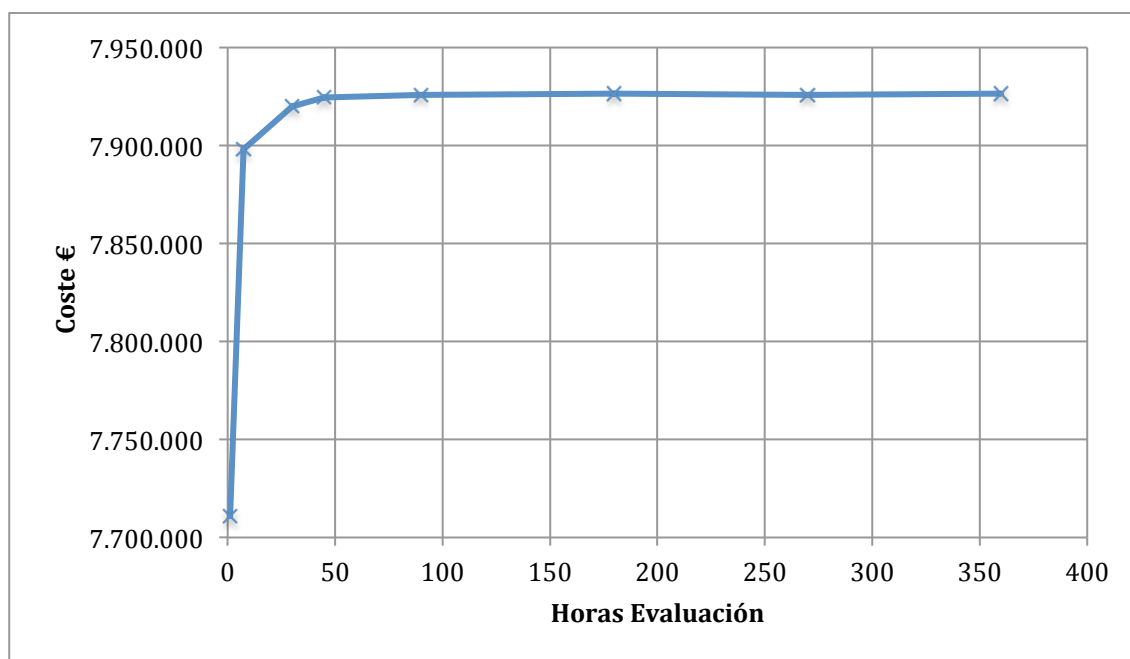
Como se esperaba a mayor periodo de evaluación mayor tiempo de cálculo. La pregunta sería ¿cuál sería el mínimo necesario?

Estimamos que el mínimo sería aquel periodo donde los ciclos de llenado y vaciado de las tolvas se repiten. Esto depende en gran medida del tamaño, del número y producción de las mismas.

Si vemos las gráficas de cómo se comportan las tolvas en las diferentes etapas y con diferentes escalas de tiempo vemos que sin un análisis riguroso es difícil apreciar cuando se puede considerar que los ciclos se repiten.



Por ello vamos a considerar que los ciclos se estabilizan cuando el coste calculado se estabiliza.



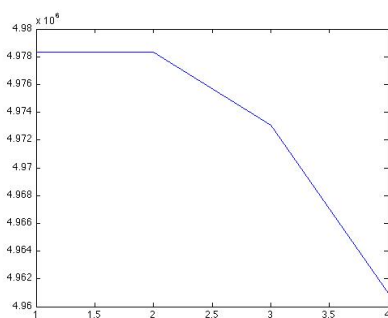
Para la distribución de la jornada del problema que hemos tomado como ejemplo tenemos:

horas	1	7,5	30	45	90	180	270	360
semanas	1/90	1/45	1/3	1/2	1	2	3	4

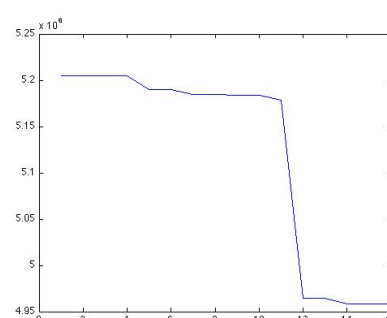
En general para producciones pequeñas los ciclos se estabilizan en pocas horas mientras que para producciones grandes es cuestión de días por lo que se ha tomado una semana el tiempo necesario para estar seguros de que el ciclo es estable; a partir de lo cuál el resultado se puede interpolar para los 10 años de vida del ciclo. Este parámetro creemos que sería uno de los primeros candidatos para ser optimizado en futuras ampliaciones del trabajo ya que tiene un peso considerable en el tiempo de cálculo.

10.4.5 Epigenético, Número de iteraciones :Itergenepi

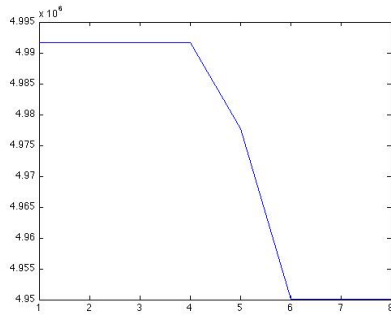
Para el mismo problema se representa como mejora la respuesta y el tiempo de cálculo con diferente número de iteraciones.



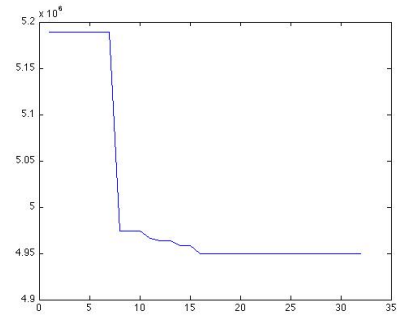
Iteraciones: 4



Iteraciones: 16



Iteraciones: 8



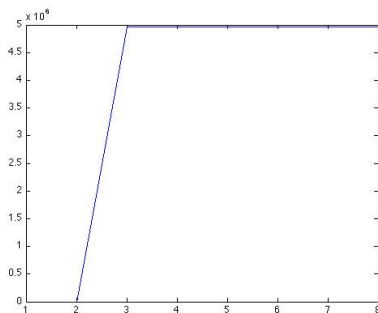
Iteraciones: 32



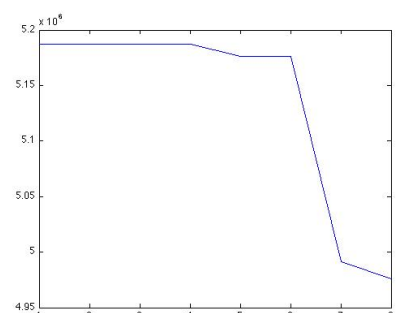
Se observa que a partir de cierto número de iteraciones el tiempo de cálculo no aumenta en la misma proporción. Esto es debido a que alguna de las soluciones propuestas por el algoritmo vuelven a aparecer en generaciones posteriores y no se vuelven a calcular.

10.4.6 Epigenético, Tamaño de la Población : NPoblacionepi

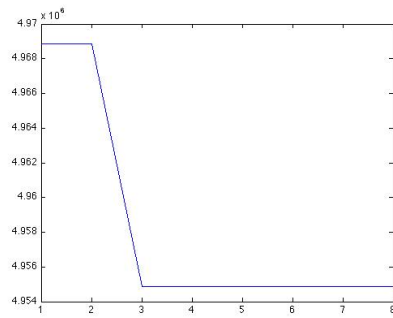
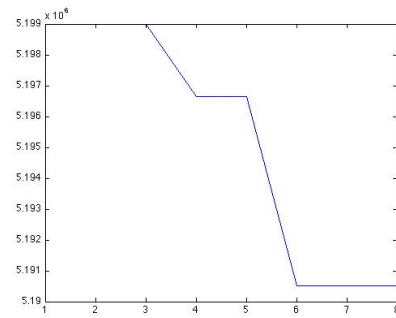
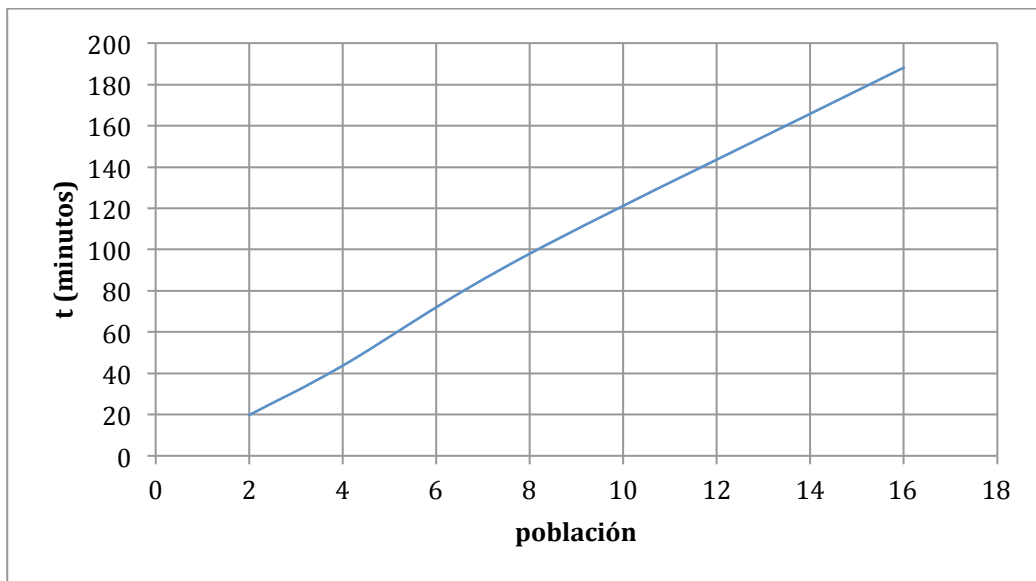
Para el mismo problema se representa como mejora la respuesta y el tiempo de cálculo con diferente tamaño de población.



Población: 2



Población: 8

*Población: 4**Población: 16*

Se observa que a partir de cierto número de iteraciones el tiempo de cálculo no aumenta en la misma proporción. Esto es debido a que alguna de las soluciones propuestas por el algoritmo vuelven a aparecer en generaciones posteriores y no se vuelven a calcular.

10.5 Anexo: Código Fuente Matlab®

[illegible]

[illegible]

[illegible]

[illegible]

```
fenotipo
tiempounico=etime(clock,tiempounico)
figure(5)
plot(vol)

end

>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>

Preguntarsimulacion

%Variables Necesarias para la simulación
global HorasEva delta reserva NS HorasTotales
disp('Resolucion de calculo')
disp('delta=1->intervalos de una hora?delta=60->intervalos de un
minuto?delta=3600->intervalos de segundo')
delta=360
disp('Periodo de evaluación. De entre 1 o 4 semanas,dependiendo de la
producción y capacidad de las tolvas')
jornada_turno=input(' horas por turno(7/8)?');
turnos_dia=input (' Turnos por día?')
dias_semana=input(' D as a la semana?')
SemanasEvaluacion=1
HorasEva=jornada_turno*turnos_dia*dias_semana*SemanasEvaluacion;
reserva=0.4
NS=input(' Nivel de servicio deseado?(50-100)');
agnos=10
semanaagno=52
HorasTotales=agnos*HorasEva*semanaagno/SemanasEvaluacion;

>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>

poblar

global alturaheuristica
val=0; %validez de cada evaluación
%inicializo la matriz donde se almacenan los cromosomas
cromosoma=zeros(NPoblacion,19);
for n=1:NPoblacion
    cromosoma(n,12:15)=alturaheuristica;
end
%variables;
%recorro "individualmente" para crear 10 cromosomas en principio
factibles
%de atr  alante ya que la variable tamaño influye en los dem s
bloques.
n=1;
while n < NPoblacion+1
    %B Tamaño de partícula k=8
    while val==0
        cromosoma(n,10)= round((10*rand)*4/10+1);
        val=factibleB8(cromosoma(n,10));
    end
    Dintermedio=bdt8(cromosoma(n,10));
    val=0;
    InicializarK;
    %AB Alimentador de Banda k=2
    while val==0
        cromosoma(n,1)= round((10*rand)*4/10+1);
        cromosoma(n,2)= round((10*rand)*3/10+1);
        val=factibleAB2(cromosoma(n,1),cromosoma(n,2));
    end
    val=0;
    %MM Molino de Martillos k=4
```

[illegible]

```

        nab=6;
        iab=7;
        jab=14;
        pos=7;
    end
    wi=potenciamodAB(cromosoma(q,iab));
    wii=ejepicos(cromosoma(q,iab));
    hab=cromosoma(q,jab)-1;
    porcentaje=mapa(pos,10,q)/mapa(pos,2,q);
    Horas=porcentaje*HorasTotales;
    pth=mapa(pos,2,q)/cromosoma(q,nab);
    MwhAB1=potenciaAB(pth,hab,wi,wii,1);
    MwhAB=MwhAB+cromosoma(q,nab)*Horas*MwhAB1;
end

%Calculo del consumo del molino K=4
global calorMol alimMol
Os=mapa(5,4,q);
Oe=mapa(5,5,q);
wi=calorMol(cromosoma(q,4));
wj=alimMol(cromosoma(q,13));
porcentaje=mapa(5,10,q)/mapa(5,2,q);
Horas=porcentaje*HorasTotales;
pth=mapa(5,2,q)/cromosoma(q,3);
MwhMM=potenciaMolino(pth, Os,Oe,wi,wj,1);
MwhMM=cromosoma(q,3)*Horas*MwhMM;

%Calculo del consumo del Desmenuzador K=8
global renddt tercereje perdidaaltura
Os=mapa(9,4,q);
Oe=mapa(9,5,q);
rendiDT=renddt(cromosoma(q,10));
wi=tercereje(cromosoma(q,9));
wj=perdidaaltura(cromosoma(q,15));
porcentaje=mapa(9,10,q)/mapa(9,2,q);
Horas=porcentaje*HorasTotales;
pth=mapa(9,2,q)/cromosoma(q,8);
MwhDT=potenciaDesmenuzador(pth, Os,Oe,rendiDT,wi,wj,1);
MwhDT=MwhDT*Horas*cromosoma(q,8);

%Calculo del consumo de las cintas k=1,3,5,7,9
MwCT=0;
for c=2:2:10
    h=mapa(c-1,11,q);
    l=mapa(c,12,q);
    a=mapa(c,13,q);
    pe=mapa(c,3,q);
    porcentaje=mapa(c+1,10,q)/mapa(c+1,2,q);
    Horas=porcentaje*HorasTotales;
    mwct1=potenciaCinta(pe,h,l,a,1);
    MwCT=MwCT+mwct1*Horas;
end

%Suma de las potencias de cada maquina
global cmwe
cromosoma(q,16)=MwhAB+MwhMM+MwhDT+MwCT;
cromosoma(q,17)=100;
cromosoma(q,18)=cromosoma(q,16)*cmwe;
cromosoma(q,19)=cromosoma(q,18)+cromosoma(q,11);
end

```


[illegible]

[illegible]


```

for m=1:10
Kresumen(m+1,1)=Kresumen(m,1)+1;
end
Dintermedio=bdt8(alelo(10));
%Produccion
Kresumen(1,2)=Produccion;
Kresumen(1,3)=Kresumen(1,2);
Kresumen(2,2)=Kresumen(1,3);
Kresumen(2,3)=Kresumen(2,2)/(1-Mperdidas);
Kresumen(3,2)=Kresumen(2,3);
%Diametros
Kresumen(1:5,4:5)=Dsalida;
Kresumen(9:11,4:5)=Dentrada;
Kresumen(9,4)=Dintermedio;
Kresumen(6:8,4:5)=Dintermedio;
Kresumen(5,5)=Dintermedio;
for m=1:11
    Kresumen(m,6)=1.60114-0.00114*Kresumen(m,4);
    Kresumen(m,7)=1.60114-0.00114*Kresumen(m,5);
end
for m=1:11
    Kresumen(m,8)=Kresumen(m,2)/Kresumen(m,6);
    Kresumen(m,9)=Kresumen(m,3)/Kresumen(m,7);
end
%completo la produccion teorica minima para cada etapa
Kresumen(1,10)=Produccion;
for m=2:2:11
    Kresumen(m,10)=Kresumen(m-1,10)/(1-Mperdidas);
    Kresumen(m+1,10)=Kresumen(m,10);
end
K=Kresumen;
%ProduccionMolinoMartillo
K(5,2)=alelo(3)*Kresumen(5,6)*caudalMM(alelo(4));
K(4,3)=K(5,2);
K(4,2)=K(4,3)*(1-Mperdidas);
K(3,3)=K(4,2);
K(7,2)=K(6,10)*multiplicadorAB(alelo(5));
K(6,3)=K(7,2);
K(6,2)=K(6,3)*(1-Mperdidas);
K(5,3)=K(6,2);
K(9,2)=alelo(8)*Kresumen(9,6)*caudalDT(alelo(9));
K(8,3)=K(9,2);
K(8,2)=K(8,3)*(1-Mperdidas);
K(7,3)=K(8,2);
K(11,2)=3*K(10,10);
K(10,3)=K(11,2);
K(10,2)=K(10,3)*(1-Mperdidas);
K(9,3)=K(10,2);
%completando caudales
for m=1:11
    K(m,8)=K(m,2)/K(m,6);
    K(m,9)=K(m,3)/K(m,7);
end
%completando alturas
global alturaAB alturaMM alturaDT
K(1,11)=2;
K(3,11)=alturaAB(alelo(12));
K(5,11)=alturaMM(alelo(4),alelo(13));
K(7,11)=alturaAB(alelo(14));
K(9,11)=alturaDT(alelo(9),alelo(15));
%completando dimensiones cinta
for m=2:2:11
    if m<5

```

[illegible]

```
kwh=cdesmenuzador*log(Oe/Os)*ps/rend+wi*wj/tiempo;
mwh=kwh/1000;
end
```

[illegible]

PotenciaCinta

```
function [ mwh ] = potenciaCinta( pe, h, l, a, tiempo )
%Calcula la potencia consumida por una cinta
global wCinta
c=13.97*l^(-0.472);
wr=a*(50.69+25.05*l-0.0193*l^2)/1000;
wm=9.8*h*(wCinta(1)/tan(0.244346095)+1)*pe/3600;
kwh=c*(wr/tiempo+wm)/wCinta(2);
mwh=kwh/1000;
end
```

[illegible][illegible]

epigenetico

```
function [ fenotipo tolvaAB2 ] = epigenetico( gen,a)
%Algoritmo epigenético
% Devuelve el mejor epigen encontrado y como se comportan las tolvas
de
% los primeros Alimentadores de Banda
global cmwe NS
tepi=clock;
NPoblacionepi=4;
Itergenepi=8;
Ngenmutar=3;
Pcross=0.809;
Pmutar=0.6245;
epigenetic=zeros(4,19);
epipoblar;
for yy=1:Itergenepi
    yy
    epipaternidad;
    if size(epipadres)>1
        epicruzar;
        epimutar;
        epieliminarinoaptos;
        epimapear;
        simularevaluar;
    end
    epiordenar;
    fenprogreso(yy)=fenotipo(1,19);
    epinuevageneracion;
end
tepi=etime(clock,tepi)
%% Gráfico de la tolva de los Alimentadores de Banda
tolvaAB2=llenadotolva;
    hold
    figure(3)
    plot(fenprogreso);
%end
fenotipo=fenotipo(1,:);
jotas=fenotipo(12:15)
niveldeservicio=fenotipo(17)
costetotal=fenotipo(19)
end
```

[illegible]

epipoblar

```

global Hmaxima
n=1;
val=0; %validez de cada evaluación
global alturaAB alturaMM alturaDT
global bdt8
Dintermedio=bdt8(gen(10),1);
InicializarK;
%inicializo la matriz donde se almacenan los cromosomas
epigen=zeros(NPoblacionepi,4);
%recorro "individualmente" para crear 4 epigenes en principio
factibles
while n < NPoblacionepi+1
    while val==0
        j= round((10*rand)*4/10+1);
        epigen(n,1)=j;
        altura=alturaAB(j);
        if altura<Hmaxima
            val=1;
        end
    end
    val=0;
    while val==0
        j= round((10*rand)*3/10+1);
        epigen(n,2)=j;
        altura=alturaMM(gen(4),j);
        if altura<Hmaxima
            val=1;
        end
    end
    val=0;
    while val==0
        j= round((10*rand)*4/10+1);
        epigen(n,3)=j;
        altura=alturaAB(j);
        if altura<Hmaxima
            val=1;
        end
    end
    val=0;
    while val==0
        j= round((10*rand)*4/10+1);
        epigen(n,4)=j;
        altura=alturaDT(gen(9),j);
        if altura<Hmaxima*2
            val=1;
        end
    end
    val=0;
    n=n+1;
end
genexpandido=gen;
for n=1:NPoblacionepi
    genexpandido(n,:)=gen;
end
genexpandido(:,12:19)=[ ];
ceros=zeros(NPoblacionepi,4);
fenotipo=[genexpandido,epigen,ceros];
contador=1;

```

[illegible]

epicruzar

```
%cruzo mejores con peores
%se intercambia segmentos de código con una probabilidad del 50% por
tramo
% si los padres sin impares uno se quedar sin ser padre
%hay que borrar la última columna al generar los hijos ya que estos
habría
%que evaluarlos otra vez
n=1;
min=1;
[max l]=size (epipadres);
while min<max
    padre=epipadres(min,:);
    madre=epipadres(max,:);
    if rand< 0.5
        k2j=padre(1);
        k2n=madre(1);
    else
        k2j=madre(1);
        k2n=padre(1);
    end
    if rand< 0.5
        k4j=padre(2);
        k4n=madre(2);
    else
        k4j=madre(2);
        k4n=padre(2);
    end
    if rand< 0.5
        k6j=padre(3);
        k6n=madre(3);
    else
        k6j=madre(3);
        k6n=padre(3);
    end
    if rand< 0.5
        k8j=padre(4);
        k8n=madre(4);
    else
        k8j=madre(4);
        k8n=padre(4);
    end
    epihijos(n,:)=[k2j,k4j,k6j,k8j];
    epihijos(n+1,:)=[k2n,k4n,k6n,k8n];
    n=n+2;
    min=min+1;
    max=max-1;
end
```

[illegible]

epimutar

```
%Mutan los hijos
%la probabilidad de que muten es de 62,45%
%muta 6 genes al azar de los mutantes
[fil col]=size (epihijos);
m=1;
mutados=ones(1,col);
```

[illegible]

[illegible]

```
        else  
            multiplicador=1;  
        end  
        fenotipo(y,19)=(fenotipo(y,11)+fenotipo(y,18))*multiplicador;  
    end  
end  
  
epiordenar  
fenotipo=sortrows(fenotipo,19);  
  
epinuevageneracion  
epigen=fenotipo(1:NPoblacionepi,12:15);  
if yy==1  
    epigenetic=fenotipo;  
else  
    epigenetic=[epigenetic;fenotipo];  
end  
fenotipo=fenotipo(1:NPoblacionepi,:);  
  
simulacion  
function [ energia NSob voltolva] = simulacion( fen ,map )  
%Calcula para un determinado fenoma su comportamiento a lo largo del tiempo  
%dando lugar al coste energético-económico de dicho fenoma  
%   NS=Nivel de servicio  
global vtope  
vtope=0;  
global perdidas HorasEva delta Produccion HorasTotales  
global eon vpeo puerta PotMaq mwsim  
global volumentolval  
eon=zeros(11,4);  
vpeo=zeros(11,5,5);  
puerta=[1 1 1 1];  
mwsim=[0;0;0;0;0;0;0;0;0;0];  
eon(1,2)=1;  
%%  
%inicializo los valores de producción para las diferentes máquinas  
%la primera columna es para la cantidad de maquinas  
PotMaq=zeros(4,4);  
%completo los datos de producción del alimentador solo la primera vez  
%para los Alimentadores de la primera fase  
nmaquinas=fen(1);  
psteor=map(3,2);  
if nmaquinas>1  
    Pab=psteor/(0.6*nmaquinas);  
else  
    Pab=psteor;  
end  
Pmax=1.4*Pab;  
Pmin=0.6*Pab;  
PotMaq(1,1)=nmaquinas;  
PotMaq(1,2)=Pab;  
PotMaq(1,3)=Pmax;  
PotMaq(1,4)=Pmin;  
%Para AB 4 etapa  
nmaquinas=fen(6);
```



```

psteor=map(7,2);
if nmaquinas>1
    Pab=psteor/(0.6*nmaquinas);
else
    Pab=psteor;
end
Pmax=1.4*Pab;
Pmin=0.6*Pab;
PotMaq(3,1)=nmaquinas;
PotMaq(3,2)=Pab;
PotMaq(3,3)=Pmax;
PotMaq(3,4)=Pmin;
%% Las tolvas inicialmente estan llenas
global m3AB m3MM m3DT reserva minm3MM
% para AB2
for n=1:fen(1)
    vpeo(3,n,2)=m3AB(fen(2),fen(12));
    vpeo(3,n,1)=3;
end
% para MM
for n=1:fen(3)
    vpeo(5,n,2)=m3MM(fen(4),fen(13));
    vpeo(5,n,1)=3;
end
% para AB
for n=1:fen(6)
    vpeo(7,n,2)=m3AB(fen(7),fen(14));
    vpeo(7,n,1)=3;
end
% para DT
for n=1:fen(8)
    vpeo(9,n,2)=m3DT(fen(9),fen(15));
    vpeo(9,n,1)=3;
end

%% Inicializo las capacidades de las tolvas
% se considera que en la tapa de los alimentadores y desmenuzadore se
puede
% almacenar hasta un 5% de de excedente.
global vmaxmin
% para AB2
vmaxmin(1,1)=m3AB(fen(2),fen(12));
    %vmax
vmaxmin(1,2)= m3AB(fen(2),1)/2;
    %v mínimo
vmaxmin(1,3)= vmaxmin (1,1)*1.05;
    % volumen seguridad
vmaxmin(1,4)= vmaxmin (1,1)*reserva;
    % v reserva
% para MM
vmaxmin(2,1)=m3MM(fen(4),fen(13));
vmaxmin(2,2)=minm3MM(fen(4));
vmaxmin(2,3)=vmaxmin(2,1);
vmaxmin(2,4)=vmaxmin(2,1)*reserva;
% para AB$
vmaxmin(3,1)=m3AB(fen(7),fen(14));
vmaxmin(3,2)=m3AB(fen(7),1)/2;
vmaxmin(3,3)=vmaxmin (3,1)*1.05;
vmaxmin(3,4)=vmaxmin(3,1)*reserva;
% para DT
vmaxmin(4,1)=m3DT(fen(9),fen(15));
vmaxmin(4,2)=m3DT(fen(9),1);
vmaxmin(4,3)=vmaxmin(4,1)*1.05;

```

[illegible]

[illegible]

```

        a=a+vpeo(k+1,n,4);
    end
    if a>0
        e=1;
    else
        e=0;
    end
    eon(k+1,2)=e;
    estado=vpeo(k+1,:,4);
    %%
    %compruebo si algùn alimentador puede dar material
    %coloco un uno en la tolva dispuesta
    nready=0;
    for n=1:m
        if vpeo(k+1,n,1)==0
            vpeo(k+1,n,5)=0;
        else
            vpeo(k+1,n,5)=1;
            nready=nready+1;
        end
    end
    %%
    %si la cinta posterior demanda material el alimentador la cantidad
    %solicitada sin exceder nunca ni el mìnimo ni el m•ximo de su
    capacidad
    Psolicitada=map(k+1,2);
    Pmaq=Psolicitada/nready;
    if Pmaq>PotMaq(k/2,3)
        Pmaq=PotMaq(k/2,3);
    elseif Pmaq<PotMaq(k/2,4)
        Pmaq=PotMaq(k/2,4);
    end
    vpeo(k+1,:,3)=Pmaq*vpeo(k+1,:,5)/delta;
    ps=0;
    for n=1:m
        ps=ps+vpeo(k+1,n,3);
    end
    eon(k+1,1)=ps;
    if ps~=0
        eon(k+1,3)=1;
    end

    %%
    %Solo se puede llenar una tolva cada vez. Se elige entre las que piden
    el
    %material de forma secuencial
    if t==0
        it=1;
    else
        it=puerta(k/2);
    end
    if estado*estado'==0
        itolva=m;
    else
        if estado(it)==1
            it=it;
        else
            while estado(it)==0
                if it==1
                    c=1;
                elseif it==m
                    c=-1;
                end
            end
        end
    end

```

[illegible]

```

end
eon(k+1,2)=e;
estadodesmen=vpeo(k+1,:,4);
%compruebo si alg n desmenuzador puede dar material
%coloco un uno en la tolva dispuesta
for n=1:m
    if vpeo(k+1,n,1)==0
        vpeo(k+1,n,5)=0;
    else
        vpeo(k+1,n,5)=1;
    end
end
%si la cinta posterior demanda material el molino entrega material de
%acuerdo a su capacidad hasta que se quede vacio.
ps=0;
for n=1:m
    vpeo(k+1,n,3)=vpeo(k+1,n,5)*map(k+1,2)/(m*delta);
    ps=ps+vpeo(k+1,n,3);
end
eon(k+1,1)=ps;
if ps~=0
    eon(k+1,3)=1;
end

%Solo se puede llenar una tolva cada vez. Se elige entre las que piden
el
%material de forma secuencial
if t==0
    it=1;
else
    it=puerta(k/2);
end
if estadodesmen*estadodesmen'==0
    it=m;
else
    if estadodesmen(it)==1
        it=it;
    else
        while estadodesmen(it)==0
            if it==1
                c=1;
            elseif it==m
                c=-1;
            end
            it=it+c;
        end
    end
end
puerta(k/2)=it;

%%
% Se calcula la potencia consumida en cada instante de c.lculo
global calorMol alimMol
Os=map(k+1,4);
Oe=map(k+1,5);
wi=calorMol(fen(4));
wj=alimMol(fen(13));
pot=0;
for n=1:m
    psm=vpeo(k+1,n,3);
    on=vpeo(k+1,n,5);
    pot=pot+potenciaMolino(psm, Os,Oe,wi,wj,delta)*on;
end

```


[illegible]


```

% actualiza en cada iteración
global eon vpeo puerta
%El caudal que sale depende de la máquina que tiene debajo
vmry=2;
de=map(k+1,7);
ds=map(k+1,7);
%se actualiza las señales del nivel de tolva en función de su nivel de
%carga
for n=1:m
    if n==(puerta(k/2))
        in=1;
    else
        in=0;
    end
    ventra=eon(k+1,4)*in*de*vpeo(k+1,n,4)/de;
    vsale=vpeo(k+1,n,3)*vpeo(k+1,n,5)/ds;
    v=vpeo(k+1,n,2)+ventra-vsale;
    %El material que excede el nivel de seguridad se pierde.
    %El excedendete de tierra se pierde
    if v>vmaxmin(k/2,3)
        v=vmaxmin(k/2,3);
    end
    vpeo(k+1,n,2)=v;
    if v>=vmaxmin(k/2,1)
        vmry=3;
    else
        vmry=2;
        if v<=vmaxmin(k/2,4)
            vmry=1;
        end
        if v<=vmaxmin(k/2,2)
            vmry=0;
        end
        if v<0
            disp('resolución insuficiente')
            k
        end
    end
end
vpeo(k+1,n,1)=vmry;
end

```

10.6 Índice de Gráficos

<i>Figura 1: Esquema de una instalación de Molienda</i>	<i>8</i>
<i>Figura 2: Esquema Molienda por vía Seca Básica</i>	<i>14</i>
<i>Figura 3: Esquema Parametrizado.....</i>	<i>16</i>
<i>Figura 4: Elemento Parametrizado.....</i>	<i>17</i>
<i>Figura 5: Extrusora.....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 6: Molino de Martillos.....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 7: Desmenuzador.....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 8: Alimentador de Banda</i>	<i>28</i>
<i>Figura 9: Cinta Transportadora</i>	<i>31</i>
<i>Figura 10: Cantera.....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 11: Ciclo algoritmo estándar.....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 12: Algoritmo genético estándar, resumen.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 13: Algoritmo epigenético</i>	<i>52</i>
<i>Figura 14: Algoritmo Epigenético, Resumen.....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 15: Algoritmo Epigenético Par 4, resumen</i>	<i>70</i>

10.7 Índice de Tablas

Tabla 1: Tamaño productivo AB.....	21
Tabla 2: Tamaño volumétrico MM.....	21
Tabla 3: Alturas Etapa MM.....	21
Tabla 4: Capacidades volumétricas etapa MM.....	21
Tabla 5: Coste MM.....	22
Tabla 6: Coste tolva MM.....	22
Tabla 7: Consumo energía para el calor en MM.....	23
Tabla 8: Consumo energía Alimentador de MM.....	23
Tabla 9: Tamaño productivo DE.....	25
Tabla 10: Tamaño Volumétrico DE.....	25
Tabla 11: Alturas de la etapa DE.....	25
Tabla 12: Capacidades volumétricas de la etapa DE.....	25
Tabla 13: Reducción de tamaño en el DE, b.....	26
Tabla 14: Coste DE.....	26
Tabla 15: Coste Tolva DE.....	26
Tabla 16: Ajuste rendimiento en función del tamaño, DE.....	27
Tabla 17: Consumo tercer eje DE.....	27
Tabla 18: Rendimiento tercer eje DE.....	27
Tabla 19: Tamaño productivo AB.....	29
Tabla 20: Multiplicador de la producción, a.....	29
Tabla 21: Tamaño volumétrico AB.....	29
Tabla 22: Capacidad en m3 de la etapa AB.....	29
Tabla 23: Coste AB.....	30
Tabla 24: coste tolva AB.....	30
Tabla 25: Consumo energético AB.....	30
Tabla 26: Variables de control de las tolvas.....	37
Tabla 27: Ejemplo de distribución de la producción en ABs.....	39
Tabla 28: Combinatoria General.....	43
Tabla 29: Enunciado Problema A.....	44
Tabla 30: Condiciones Generales de los problemas tipo.....	44
Tabla 31: Resumen de Factibilidad.....	44
Tabla 32: Factibilidad, Solución01.....	45
Tabla 33: Factibilidad, Solución02.....	45
Tabla 34: Padre01.....	50
Tabla 35: Padre02.....	50
Tabla 36: Hijo01.....	50
Tabla 37: Hijo02.....	50
Tabla 38: Cromosoma genético-epigenético.....	53
Tabla 39: Cromosoma con alturas heurísticas.....	55
Tabla 40: Hijos algoritmo epigenético.....	56
Tabla 41: Mutados algoritmo epigenético.....	56
Tabla 42: Cromosoma genético-epigenético.....	57
Tabla 43: Distribución de la Jornada.....	58
Tabla 44: Otras variables comunes.....	58
Tabla 45: Enunciado Problema A.....	59
Tabla 46: Cromosoma Epigenético, A.....	59
Tabla 47: Resultado Problema A.....	59
Tabla 48: Desglose Cromosoma A.....	59
Tabla 49: Distribución del Coste, Problema A.....	60
Tabla 50: Enunciado Problema B.....	60
Tabla 51: Cromosoma epigenético B.....	60
Tabla 52: Resultado Problema B.....	60
Tabla 53: Desglose cromosoma B.....	61
Tabla 54: Distribución del Coste, Problema B.....	61
Tabla 55: Enunciado Problema C.....	61
Tabla 56: Cromosoma epigenético C.....	61
Tabla 57: Resultado Problema C.....	61

<i>Tabla 58: Desglose Cromosoma C</i>	<i>62</i>
<i>Tabla 59: Distribución del Coste, Problema C.....</i>	<i>62</i>
<i>Tabla 60: Enunciado Problema D.....</i>	<i>62</i>
<i>Tabla 61: Cromosoma Epigenético D.....</i>	<i>63</i>
<i>Tabla 62: Resultado Problema D.....</i>	<i>63</i>
<i>Tabla 63: Desglose Cromosoma D.....</i>	<i>63</i>
<i>Tabla 64: Distribución del Coste, Problema D</i>	<i>63</i>
<i>Tabla 65: Cromosoma epigenético ofertado</i>	<i>64</i>
<i>Tabla 66: Resultado Oferta</i>	<i>64</i>
<i>Tabla 67: Maquinaria ofertada por la empresa</i>	<i>64</i>
<i>Tabla 68: Distribución del Coste dela Energía</i>	<i>64</i>
<i>Tabla 69: Comparativa Epigenético-Genético con tiempo limitado</i>	<i>66</i>
<i>Tabla 70: Comparativa Epigenético-Genético completo.....</i>	<i>67</i>
<i>Tabla 71: Descripción Ciclos EpigenPar4.....</i>	<i>69</i>
<i>Tabla 72: Desglose de tiempos Algoritmo EpigenéticoPar4.....</i>	<i>71</i>
<i>Tabla 73: Comparativa Genético & EpigenéticoPar4.....</i>	<i>71</i>

10.8 Anexo: Hardware

MacBook, 13 pulgadas, mediados de 2007

Procesador 2 GHz Intel Core 2 Duo

Memoria 2,5 GB 667 MHz DDR2 SDRAM

Gráficos Intel GMA 950 64 MB

Software Mac OS X Lion 10.7.3 (11D50b)