

## A1.104

### Tema A1a Diseño Mecánico: TRIZ

#### *“Análisis prospectivo de las máquinas trituradoras de quijada para concreto empleando el radar de tendencias de evolución de TRIZ”*

*Cos Díaz, J.J.<sup>a</sup>, Espinosa Bautista, A.<sup>a</sup>, Hernández Padilla, F.<sup>a</sup>*

*<sup>a</sup>Facultad de Ingeniería, UNAM, Circuito exterior, Ciudad de México, C.P.04510, México*

---

#### RESUMEN

Actualmente en la Ciudad de México se generan más de 7000 toneladas diarias de residuos de concreto y concreto armado provenientes de la construcción y demolición de estructuras. Afortunadamente estos materiales (concreto y acero) pueden reciclarse, proporcionando grandes beneficios económicos y ambientales. Sin embargo, en la Ciudad de México solo se cuenta con maquinaria fija para remover acero y triturar menos de una tercera parte del total de residuos de concreto generados. Los costos de transporte y la inversión de tiempo dificultan aún más la labor del reciclaje. En el presente trabajo se realiza un estudio de las máquinas trituradoras de quijada aplicando el radar de tendencias de innovación de TRIZ, se identifican y analizan diecinueve tendencias aplicables para encontrar oportunidades de mejora. Finalmente, proponen tres alternativas de diseño y funcionamiento como base para un diseño propio que satisfaga las necesidades de la ciudad.

*Palabras Clave: Trituradora, Concreto armado, Reciclaje, TRIZ, Radar de tendencias.*

#### ABSTRACT

Currently in Mexico City more than 7000 tons of concrete and armed concrete waste are produced on a daily-basis. Fortunately, these materials (concrete and steel) can be recycled, providing great economic and environmental benefits. Nevertheless, Mexico City only has non-mobile machinery which can remove steel and crush less than a third part of the total concrete waste production. Transportation costs and time investment make recycling even more difficult. In the present work a study of the jaw crusher machines is made applying the evolutionary potential radar of TRIZ, nineteen applicable trends are applied and analyzed to find improvement opportunities. By last, three design and functionality alternatives are proposed as a base for an own design which satisfies the city needs.

*Keywords: Crusher, Armed concrete, recycling, TRIZ, evolutionary potential.*

---

### 1. Introducción

La cantidad de residuos de la construcción y demolición (RCDs) que se generan en la Ciudad de México asciende a más de 7000 toneladas diarias [Enrique Granell comunicación personal, 13 de marzo de 2018], por lo que requiere de un proceso de separación y trituración que permita dar utilidad a este material y disminuya la contaminación generada por la disposición inadecuada de dichos residuos.

Son muchas las ventajas que presenta el concreto con respecto a otros materiales para su utilización como material de construcción: facilidad inicial de moldeo, gran resistencia a las altas temperaturas y a la carga, y materiales constitutivos de bajo costo. De hecho, en la actualidad se utiliza el doble de concreto que el total de todos los demás

materiales de construcción, incluyendo madera, plástico, acero y aluminio [1].

Sin embargo, la resistencia a la tracción del concreto es entre 10 y 15 veces menor que su resistencia a la compresión, además de experimentar dilataciones y contracciones con los cambios de temperatura. Estos inconvenientes se eliminan mediante el reforzamiento del concreto con una armadura interna. [2]

El acero es el principal material utilizado en la construcción de estructuras de concreto reforzado debido a que su coeficiente de dilatación térmica es cercano al del concreto. Además, presenta una alta resistencia a la tracción que compensa esta propiedad deficiente en el concreto [2].

Los aceros se pueden producir principalmente de dos formas: mediante la refinación del hierro y reciclando residuos de acero, por lo que el valor del acero reciclado es alto. La chatarra se introduce en un horno eléctrico de arco, en el cual las altas temperaturas funden la chatarra y

permiten recuperar el acero por completo [3], un esquema del proceso de reciclado de acero se muestra en la Figura 1.

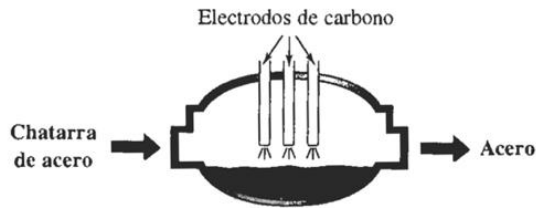


Fig. 1. Horno eléctrico de arco para producir acero líquido a partir de la fundición de chatarra [3].

Además, debido a los cambios en las necesidades humanas o por errores de diseño o construcción en las edificaciones, se generan desechos de este material. Por otro lado, el concreto no puede ser reutilizado para su propósito original; tampoco puede ser descompuesto en sus elementos constitutivos originales. Sin embargo, el concreto puede ser fragmentado en bloques más pequeños para su uso como agregado para concreto nuevo en aplicaciones estructurales. De acuerdo con WRAP [4], los beneficios de utilizarlo en lugar de agregados vírgenes incluyen:

- Reducción en el costo de transporte derivado de la obtención de materiales vírgenes en áreas naturales lejanas a las áreas urbanas donde se requieren.
- Menor impacto ambiental sobre el uso de la tierra al destinar menos desechos a vertederos y conservar tierra que normalmente se utiliza como fuente de materias vírgenes.
- Ventajas en sostenibilidad debido a la larga vida útil del concreto reciclado.
- Menor precio para uso como agregado comparado con agregados vírgenes.

Otros usos del concreto reciclado son: bloques para pavimentar, bancas de uso público, arrecifes artificiales, bases viales, macetas y para relleno [1].

Actualmente, en la Ciudad de México existe una planta recicladora de concreto, la cual tiene una capacidad de procesamiento de 2000 toneladas de residuos de concreto al día [Enrique Granell comunicación personal, 13 de marzo de 2018]. Estos residuos no pueden ser procesados a la misma velocidad que se producen, además, debido a que la planta recicladora es fija, el costo del transporte es elevado, y el tiempo invertido en éste también, lo que constituye una barrera más en el correcto tratamiento de los residuos. Dado que no existe alguna máquina nacional trituradora y separadora para concreto armado, todas las máquinas utilizadas para los procesos de reciclaje se importan del extranjero, con el costo agregado que esto involucra.

Por consiguiente, es importante proponer una máquina de diseño propio para proporcionar una eficiente separación del concreto y material de refuerzo. La máquina debe poseer dimensiones reducidas y ser móvil, para que pueda ser

transportada fácilmente, aumentando su versatilidad. Con esta propuesta, se disminuirá la mala gestión de residuos de demolición y por lo tanto, se reducirá el impacto ambiental que se genera por esta acción, además de producir beneficios económicos al permitir el reciclaje del concreto como agregado para concreto nuevo y la reutilización del acero.

En este documento se proponen tres alternativas de diseño y funcionamiento como una respuesta a la problemática de la ciudad desde la base del análisis de las trituradoras de quijada.

## 2. Trituración y separación de concreto armado

Para poder reciclar el concreto y el acero de los desechos de concreto armado es necesario separar estos dos componentes. Para lograrlo, primero se rompe el concreto en trozos más pequeños cuyas dimensiones finales dependen del uso que se le quiera dar al concreto. Después del triturado, un imán se encarga de remover el acero, que es retirado fácilmente gracias a que el concreto se ha desprendido de él al ser triturado.

### 2.1. Trituradoras utilizadas en la industria

Los principios de funcionamiento que se utilizan para la trituración mecanizada del concreto son:

- Sistema de rotor giratorio y placa ajustable.
- Sistema de placa reciprocante y placa ajustable.

El sistema de rotor dentado rompe la materia prima en trozos pequeños gracias a la fuerza ejercida por el movimiento giratorio del mismo y la reducción de espacio entre éste y las placas, esta reducción se puede observar en la Figura 2. Las máquinas que funcionan bajo este principio son conocidas como trituradoras giratorias [5].

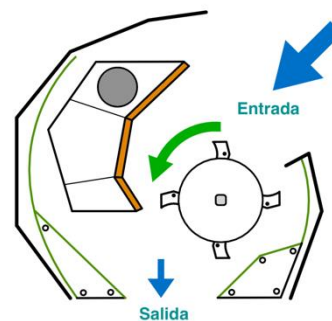


Fig. 2. Esquema de la vista lateral de una trituradora giratoria, adaptado de [6].

El sistema de dos placas involucra el uso de un mecanismo que permite a una de ellas realizar un movimiento reciprocante, y por la presión ejercida entre ambas superficies la materia prima es triturada; la Figura 3 muestra como el espacio entre las placas puede ser fácilmente ajustado para controlar el tamaño final. A estas máquinas se les conoce como trituradoras de quijada o

mandíbula [5].

En las figuras 2 y 3, las flechas de color verde representan el tipo de movimiento de cada máquina; rotativo (Fig. 2) y reciprocante (Fig. 3).

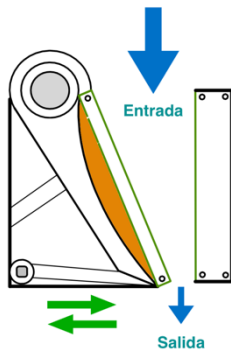


Fig. 3. Esquema de la vista lateral de una trituradora de mandíbula, adaptado de [5,7].

Las máquinas trituradoras tienen un gran uso en el sector minero y de construcción. Para la aplicación de concreto armado, un sistema adicional posterior es requerido para realizar la separación del concreto triturado y el refuerzo (varillas metálicas), mediante el uso de imanes.

A su vez, dependiendo de su independencia y versatilidad, se encuentran dos tipos de máquinas:

- Tritradoras independientes
- Accesorios para excavadoras

Las trituradoras independientes requieren de una fuente de energía externa para funcionar, y son impulsadas por un motor eléctrico o diésel. Dependiendo del modelo pueden ser fijas o móviles; en este último caso se suele utilizar un sistema motorizado con orugas para su transporte. Presentan una gran capacidad de producción y suelen contar con bandas transportadoras para su alimentación y para llevar el concreto triturado al proceso de separación. En este proceso, un imán o electroimán puede ser colocado en diferentes configuraciones para atraer las varillas de acero que después son almacenadas.

En cambio, los accesorios para excavadoras poseen gran movilidad, reducidas dimensiones y peso, y son adaptables a distintos tipos de excavadoras. Además de cucharas trituradoras, también se pueden adaptar electroimanes, cortadoras, etc. Así, estos accesorios utilizan la energía proveída por la propia excavadora para su funcionamiento y no requieren de bandas o sistemas de transporte adicionales. Dependiendo del modelo, pueden incluir electroimanes o sistemas mecánicos que mantengan al acero en el interior de la máquina hasta que el concreto triturado a sido expulsado, o expulsar el concreto junto con el acero para una separación mediante un proceso adicional. En comparación con las trituradoras independientes, su capacidad de producción es mucho más limitada por cuestiones de tamaño.

### 3. Análisis prospectivo

Se realizó una investigación sobre las máquinas trituradoras en bases de datos de patentes internacionales y con los principales proveedores de dicha maquinaria. Así, se encontró que el principio de funcionamiento más utilizado en la industria es el de mandíbulas [5], pues cuentan con un sistema mecánico más eficiente, y con un rango más amplio de índice de reducción ( $I_R$ ).

$$I_R = \frac{D}{d} \quad (1)$$

De la ec. (1) se observa que el índice de reducción es la relación entre la longitud máxima  $D$  de una pieza de concreto que admite la máquina a la entrada y la longitud mínima  $d$  del producto de la trituración a la salida [5].

Un índice de reducción mayor implica que la máquina es más compacta, o bien, que permite introducir trozos de concreto más grandes, reduciendo o evitando la necesidad de un pre-triturado. Lo anterior se observa más claramente con el esquema mostrado en la Figura 4.

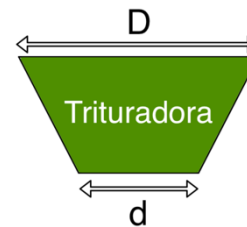


Fig. 4. Esquema del índice de reducción, adaptado de [5].

#### 3.1. Radar de tendencias de evolución

Aplicando la metodología de diseño TRIZ, se analiza el estado actual de las máquinas trituradoras de mandíbula.

En un estudio de millones de patentes, iniciado por Genrich Saulovich Altshuller en 1946, se identificó que los productos evolucionan. Treinta y una tendencias fueron identificadas para conocer el estado de evolución de un producto. Para el caso de las máquinas trituradoras, se recopiló información de las máquinas utilizadas por las principales empresas dedicadas al desarrollo de trituradoras tipo quijada a nivel internacional: Hammel [8], Cams [9], Vipeak [6], Atlas Copco [10] y MB [11], así como patentes, de entre las que se destacan PCT/AU2003/000062 [7] y EP0985452 [12]. Sin embargo, de las 31 tendencias, no todas pueden aplicar a todos los productos, debido a la naturaleza de estos. Así, se encontraron 19 tendencias que se pueden aplicar al sistema, de las cuales se procede a analizar en que punto de su proceso evolutivo se encuentran.

Las tendencias identificadas y su estado actual son:

- Reducir las conversiones de energía de  $n$  a 0: Una conversión de energía
- Metodología de diseño: Efectos de degradación lenta

- Disminuir la participación humana: Humano + herramienta semi-automática
- Controlabilidad: Adición de retroalimentación
- Disminución de la complejidad del sistema: Una parte por función útil principal
- Grados de libertad: Un grado de libertad (1DOF)
- Evolución del mercado: Producto
- Enfoque de compra del cliente: Rendimiento y confiabilidad
- Amortiguamiento reducido: Amortiguamiento pesado
- Mono-bi-poli Incremento de diferencias: Componentes con características parcialmente diferentes
- Mono-bi-poli Varios objetos: Poli-sistema
- Mono-bi-poli Objetos similares: Bi-sistema
- Coordinación rítmica: Acciones pulsantes
- Reducción de fronteras: Primera etapa, muchos límites
- Incrementar asimetría: Asimetría emparejada
- Reducción de la densidad: Segunda etapa, materiales densos utilizados
- Escala macro a nano: Primera etapa, maquinaria con gran volumen
- Segmentación de objetos: Sólidos altamente segmentados
- Segmentación de superficies: Superficie con protuberancias en 2D

A partir de este análisis, se genera el radar de tendencias de evolución de TRIZ, mostrado en la Figura 5, que permite observar fácilmente el estado evolutivo de las máquinas actuales e identificar los puntos específicos donde es más conveniente realizar una mejora de diseño.

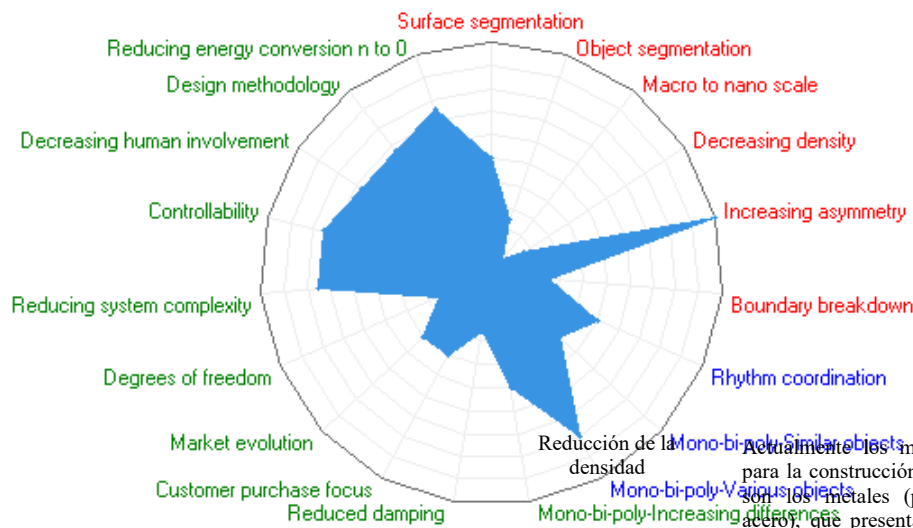


Fig. 5. Radar de tendencias de evolución para trituradoras de mandíbula CREAX

### 3.2. Tendencias con oportunidades de mejora

Así mismo, algunas de estas tendencias ya están desarrolladas por completo o casi por completo, como es el caso del *incremento de asimetría*, ya que no presentan planos de simetría, o *mono-bi-poly varios objetos* pues existe una gran variedad de componentes mecánicos y eléctricos que en conjunto permiten realizar las funciones de la máquina.

Por lo tanto, no es conveniente proponer mejoras de diseño para estas tendencias, sino que hay que enfocarse en aquellas que se encuentren aún en etapas tempranas. Así, se identifican 9 tendencias con una amplia oportunidad de mejora, las cuales se desarrollan en la Tabla 1.

Tabla 1 – Evoluciones identificadas con oportunidades de mejora

Tendencia	Análisis
Escala macro a nano	Debido al trabajo que realizan, se requiere de mecanismos de grandes dimensiones que sean capaces de proporcionar la fuerza necesaria para triturar efectivamente. Por consiguiente, aún no se ha disminuido casi nada las dimensiones de la maquinaria, por lo que un diseño nuevo que permita reducir el espacio utilizado por el mecanismo es clave para la reducción de espacio.

Actualmente los materiales utilizados para la construcción de las trituradoras son los metales (primordialmente el acero), que presentan densidades muy elevadas. Sin embargo, con los avances recientes en materiales compuestos capaces de soportar cargas similares a los metales, será posible sustituir todos los elementos mecánicos metálicos con compuestos. Una evolución se puede realizar al reemplazar los eslabones sometidos a las menores cargas/fatiga

	con compuestos.	Evolución de mercado	Debido a que la demanda de estas máquinas es reducida dado su alto costo y al nicho de clientes que las requieren, existen muy pocas empresas dedicadas al desarrollo y venta de trituradoras de mandíbula en el mundo. El enfoque que se maneja está lejos de ofrecer una experiencia sofisticada para el cliente.
Reducción de fronteras	Pueden utilizarse elementos electromecánicos que permitan realizar dos o más funciones simultáneamente, sin embargo, más funciones se comprometerían si falla dicho elemento, sin contar con el incremento en la dificultad del mantenimiento y el costo de dicho elemento, por lo que deben analizarse cuidadosamente las propuestas realizadas sobre esta tendencia.	Enfoque de compra del cliente	El rendimiento y la confiabilidad son los factores clave para la compra, sin embargo, el enfoque puede cambiar al diseñar una máquina que ofrezca un fácil y accesible mantenimiento, así como bajos costos del producto y de los componentes de fácil desgaste.
Mono-bi-poli objetos similares	Cada objeto dentro de las trituradoras se encarga de realizar una función única: Una placa se encuentra estática y su única función es soportar la presión ejercida durante la operación para poder romper el concreto. La segunda placa realiza el movimiento que permite la trituración. Pueden disminuirse los esfuerzos generados en la máquina si el movimiento lo realizaran ambas placas simultáneamente, además, en caso de falla de un componente, la máquina seguiría funcionando con el movimiento simple de una placa.	Grados de libertad	Al solo tener un grado de libertad, las trituradoras solo requieren de un motor para su funcionamiento. Añadir otro actuador puede incrementar la versatilidad de la máquina, permitiendo intercambiar los roles de las placas o utilizar ambas para una mayor fuerza de compresión. Sin embargo, el consumo de energía se incrementaría, así como la complejidad general de la máquina.
Reducción del amortiguamiento	Debido al principio de trabajo de la máquina, un amortiguamiento pesado es necesario para garantizar la extensión de la vida útil de los elementos mecánicos. Se pueden utilizar materiales con mayor resistencia a la fatiga así como un aislamiento externo para no requerir un amortiguamiento en el movimiento del mecanismo, incluso las vibraciones producidas podrían beneficiar el proceso de triturado.		
Segmentación de superficies	La varilla de concreto presenta distintas configuraciones, sin embargo, la mayoría de las superficies de las trituradoras de mandíbula mantienen protuberancias en 2D. Se pueden introducir protuberancias 3D como conos truncados para permitir una mayor adaptabilidad a entramados de metal.		

---

De las anteriores tendencias analizadas, existen algunas que entran en conflicto, como *grados de libertad* y *escala macro a nano*, pues si se añade otro grado de libertad, y por tanto otro actuador, se estaría incrementando el espacio físico requerido por la trituradora, que es precisamente lo que se quiere reducir con la tendencia *escala macro a nano*.

---

**4. Propuestas de diseño**

De acuerdo con los objetivos particulares de cada diseñador, se pueden realizar diversas propuestas a partir de las tendencias mostradas en la Tabla 1.

En este sentido, enfocando el estudio a las necesidades de la Ciudad de México, que involucran un costo de fabricación bajo, mantenimiento sencillo y un tamaño total pequeño que permita adaptar la trituradora como accesorio para excavadora, se decide generar las propuestas a partir de las tendencias Escala macro a nano, Segmentación de superficies y Enfoque de compra del cliente.

Por lo anterior, se proponen tres alternativas, de mayor impacto, en el diseño y funcionamiento del equipo:

- Geometría simple del mecanismo.  
Se propone un mecanismo de 4 o 6 barras, que convierta el movimiento rotacional del actuador al movimiento recíprocante de la placa móvil, de esta forma, es sencillo dar mantenimiento al sistema mecánico, además de que su volumen total es pequeño. Se considerará la ventaja

mecánica proporcionada, así como el espacio físico requerido por el mecanismo.

- Perfil curvo de las placas.  
Ante todo, el diseño de la curvatura debe ser óptimo para incrementar los esfuerzos lo menos posible. Además, un diseño curvo permite incrementar la velocidad de triturado, ayudando a reducir las dimensiones de la máquina.
- Superficie con diseño 3D.  
Reducir el área de las protuberancias en las superficies de contacto permitiría romper el concreto con mayor efectividad, pues la presión aumentaría reduciendo la fuerza necesaria ejercida por el mecanismo para una trituración efectiva.

## 5. Conclusiones

A partir del análisis de las trituradoras de concreto y concreto armado, tanto las utilizadas actualmente en la industria, como aquellos diseños de patentes que aún no se encuentran en el mercado, se identificó el nivel de desarrollo de las trituradoras de mandíbula en todas las tendencias aplicables utilizando el radar de tendencias de evolución que propone el método TRIZ.

Mediante el análisis de dichas tendencias se identificaron aquellas con un alto potencial de mejora, y se propusieron tres alternativas de diseño y funcionamiento a partir de estas. Dichas alternativas tienen como prioridad mantener un mecanismo sencillo que permita un mantenimiento simple y se evita aumentar el número de elementos en la máquina, con el fin de mantener un costo de producción bajo. A partir de las tres propuestas de diseño planteadas, actualmente se trabaja en la síntesis del mecanismo para una trituradora de mandíbula de diseño propio.

## REFERENCIAS

- [1] World Business Council for Sustainable Development. (2015) *Sustainability benefits of Concrete*. Último acceso 6 de abril de 2018, de <http://www.wbcscement.org/index.php/about-cement/benefits-of-concrete>
- [2] Callister, William D. (2009). *Materials Science and Engineering an Introduction*. (8ª edición) EE.UU.: John Wiley & Sons, Inc. ISBN: 978-0-470-41997-7
- [3] Askeland, Donald R. (1998). *Ciencia e ingeniería de los materiales*. (3ª edición) México: International Thomson Editores. ISBN: 968-7529-36-9
- [4] The Waste and Resources Action Programme (WRAP). *Recycled Aggregates: guidance for contractors*. Último acceso 8 de marzo de 2018, de <http://www.wrap.org.uk/search/gss/aggregain>
- [5] Benitez, P.L. (1975). *Técnicas modernas de producción de agregados*. México: Facultad de Ingeniería UNAM. Último acceso 9 de mayo de 2018, de <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/handle/132.248.52.100/13339>
- [6] Henan Vipeak Heavy Industry Machinery Co., Ltd. Página oficial Último acceso 9 de febrero de 2018, de <http://www.vipeakgroup.com>
- [7] Went, G.N. (2003) Peter Maxwell & Associates. Jaw Crusher Bucket. AU patent 2003000062. Sydney: AU.
- [8] Hammel Recyclingtechnik GmbH. Página oficial. Último acceso 16 de abril de 2018, de <https://www.hammel.de/index.php/en/>
- [9] Cams srl. Página oficial. Último acceso 16 de abril de 2018, de <http://www.camssrl.it/en/p/2/company.html>
- [10] Atlas Copco. Página oficial. Último acceso 16 de abril de 2018, de <https://www.atlascopco.com/en-uk/Atlas-Copco-in-the-UK>
- [11] MB. Página oficial. Último acceso 16 de abril de 2018, de <https://www.mbcruiser.com/es/mx/compañ%C3%ADa>
- [12] Howard, B. E. (2000) CAEC HOWARD HOLDINGS LTD. Crusher. European Patent Application EP0985452.