

Una herramienta para la selección automatizada de aceros en el contexto de la Ingeniería Mecánica

L. Dumitrescu, A.M. Quesada-Estrada, R. Pérez-Rodríguez, L.W. Hernández

Recibido el 25 de septiembre de 2009; aceptado el 1 de febrero de 2010

Resumen

El diseño de Ingeniería de un producto o componente constituye una actividad difícil, compleja y multidisciplinaria, enfocada a la resolución de problemas. En el presente trabajo se muestra el desarrollo de una herramienta automatizada para la selección de los aceros más utilizados en la construcción de maquinarias. La herramienta constituye una ayuda para la selección de los materiales desde la etapa conceptual del proceso de diseño, donde se identifican las diferentes categorías de materiales a utilizar. La herramienta comprende las características y propiedades más relevantes de los aceros de Ingeniería disponibles en seis normas internacionales: Japonesa (JIS), Alemana (DIN, Vbn, DIN-Vbn), Rusa (GOST), Americana (AISI, SAE, AISI-SAE, ASTM), Inglesa (BS, EN, GB), Francesa (AFNOR) y la Norma Cubana (NC) vigente.

Palabras claves: materiales, automatizada, aceros, ingeniería.

A tool for the automated selection of steels in the Mechanical Engineering's context

Abstract

The product or component design constitutes a difficult, complex and multidisciplinary activity, focused to the resolution of problems. Presently work show the development of an automated tool for the selection of the more used steels in the construction of machineries. The tool constitute a help for the selection of the materials from the conceptual stage of the design process, where the different categories of materials are identified to use. The tool analyze the characteristics and more common properties of the available steels in six international standards: JIS (Japan), DIN, Vbn, DIN-Vbn (Germany), GOST (Russia), AISI, SAE, AISI-SAE, ASTM (USA), BS, IN, GB (England), AFNOR (France) and NC (Cuba).

Key words: materials, automated, steels, engineering.

1. Introducción.

El diseño de Ingeniería de un producto o componente constituye una actividad difícil, compleja y multidisciplinaria, enfocada a la resolución de problemas. El creciente incremento de los niveles de exigencia de los requerimientos por parte de los clientes y el aumento de la velocidad con que los mismos cambian, hacen que el diseño de los productos se convierta en una actividad clave para reducir los tiempos de respuesta al mercado. A esta tarea, ya de hecho difícil, se le suma la incorporación de requisitos ambientales de carácter legal.

El diseño de un producto o componente, por regla general, constituye un esfuerzo combinado de un equipo multidisciplinario de profesionales de las disciplinas de ingeniería correspondiente, que evalúa críticamente la conformidad del producto respecto a los requerimientos del cliente. En este equipo, es vital la participación de un ingeniero o especialista en materiales, capaz de ayudar y solucionar en los aspectos relacionados con la selección óptima de los materiales. Esta selección tiene por objetivo la elección de las propiedades óptimas y del costo mínimo global de los materiales involucrados en la fabricación del producto o componente, la facilidad de su fabricación y la utilización de materiales con bajo impacto al medio ambiente durante el ciclo de vida de un producto.

El ciclo básico de diseño es una unidad fundamental, que se aplica de forma iterativa a lo largo de todo el proceso de diseño en una secuencia en forma de espiral convergente, donde cada vez las soluciones obtenidas se aproximan más a los objetivos y requerimientos del enunciado del problema. Sin embargo, debido a su carácter general y abstracto, no ofrece el

suficiente alcance para establecer una metodología, por lo que conviene estructurar el proceso de diseño en grupos de actividades relacionadas que conduzcan a ciertos estadios de desarrollo [1].

La Figura 1 (a) representa el esquema de etapas del proceso de diseño según la norma alemana VDI 2221 [2]. Como se aprecia, esta norma establece las etapas principales del proceso de diseño de un producto. Siguiendo esta filosofía de diseño convencional, se comienza por la etapa de clarificación de la tarea, que tiene por objetivo la especificación de las necesidades del cliente, hasta la etapa de elaboración del producto. En esta filosofía, los criterios relativos a la selección de materiales sólo se tienen en cuenta a partir de la etapa de preparación de la producción y de las instrucciones de operación. Este enfoque no permite una integración de los diferentes requerimientos relacionados con los materiales y sus parámetros asociados, desde una perspectiva holística.

El término Ingeniería Concurrente, por su parte, puede ser expresado como una nueva forma de concebir la ingeniería de diseño y desarrollo de productos donde concurren las perspectivas de los recursos humanos (equipos multidisciplinarios que colaboran al mismo tiempo), los recursos materiales (materiales, bases de datos y de conocimientos cada vez más integrados) y el producto (gama de fabricación y requerimientos de todas las etapas) de manera simultánea. Uno de los principios de esta nueva filosofía, consiste en considerar desde las primeras fases del desarrollo del producto, la mayor cantidad posible de requerimientos del ciclo de vida (Figura 1 (b)) tanto desde el punto de vista productivo como desde el punto de vista social.

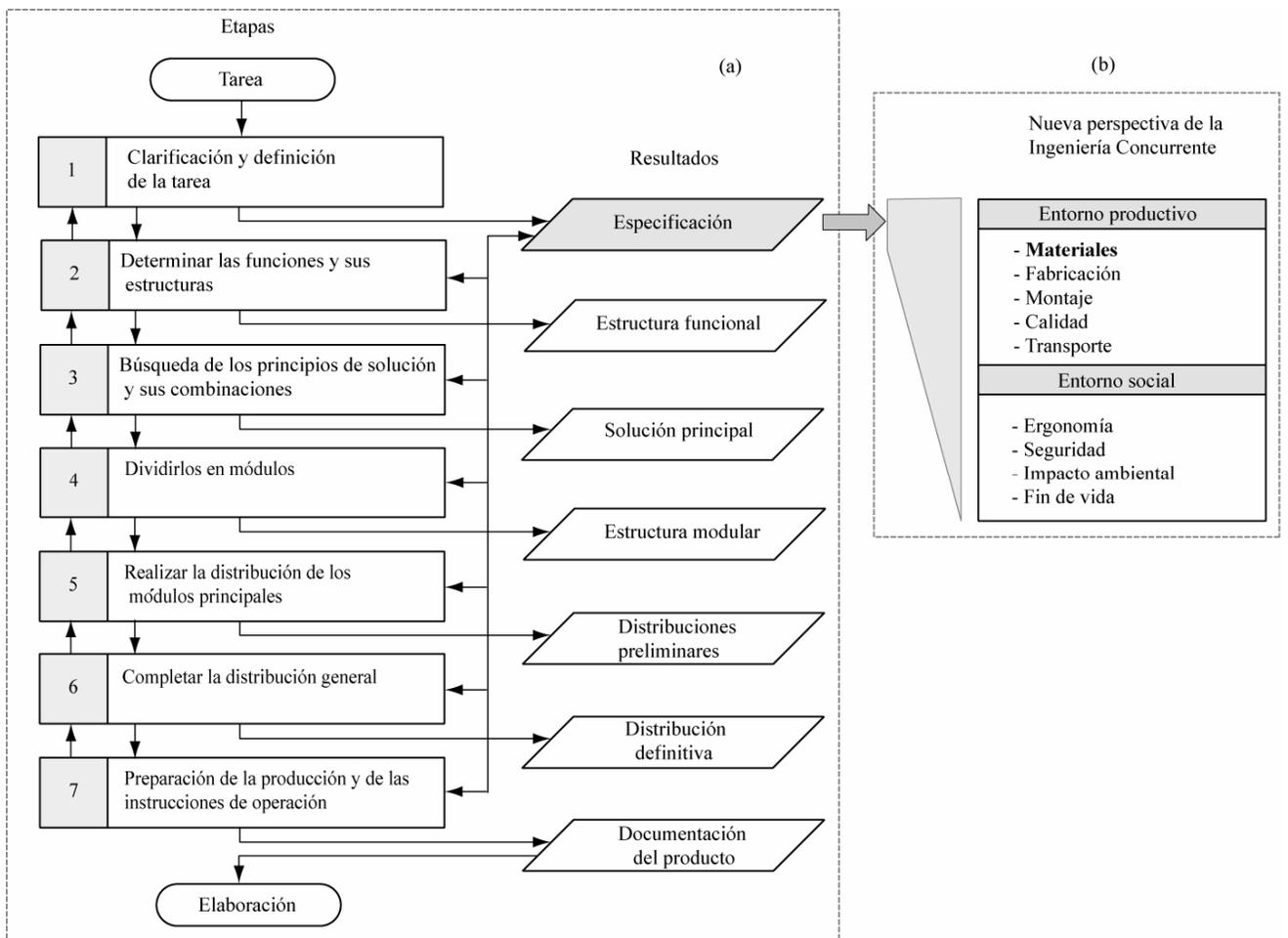


Figura 1. Etapas del proceso de diseño según la norma VDI 2221 [2]

Esta nueva perspectiva, incluye el análisis de los requerimientos vinculados con los materiales para ingeniería, permitiendo identificar y facilitar desde la etapa de especificación, cuáles aspectos son esenciales desde el punto de vista de los materiales.

En este contexto, el objetivo del artículo consiste en mostrar el desarrollo de una herramienta automatizada para la selección de los aceros más utilizados en la construcción de maquinarias. La herramienta constituye una ayuda para la selección de los materiales desde la etapa conceptual del proceso de diseño, donde se identifican las diferentes categorías de materiales a utilizar. La herramienta comprende las características y propiedades más relevantes de los aceros de Ingeniería disponibles en seis normas internacionales: Japonesa (JIS), Alemana

(DIN, Vbn, DIN-Vbn), Rusa (GOST), Americana (AISI, SAE, AISI-SAE, ASTM), Inglesa (BS, EN, GB), Francesa (AFNOR) y la Norma Cubana (NC) vigente.

2. Criterios y herramientas convencionales para la selección de aceros.

La selección de materiales constituye un aspecto importantísimo en el desarrollo del producto y debe estar presente en cada etapa de la toma de decisiones. El enfoque de la ingeniería concurrente permite al ingeniero o especialista conocer, en los inicios del proceso de diseño, si existe algún problema en cuanto a disponibilidad, costo o procesamiento del material. Es evidente la necesidad de decidir con suficiente anticipación acerca de los materiales que se utilizarán, pues

ello puede afectar el diseño de detalle y sobre todo los costos finales del producto.

Son numerosos los factores que hay que considerar o tener en cuenta a la hora de seleccionar los aceros de ingeniería, y casi todos ellos, se relacionan entre sí. Estos factores para su estudio se pueden agrupar de la forma siguiente.

Factores físicos: Los factores que intervienen en este grupo generalmente son las dimensiones, la forma y el peso del material que se necesita. Todos estos factores se relacionan con el tratamiento del material. Las dimensiones y la forma pueden restringir el tratamiento térmico del material. La forma del material determina si se necesita una pieza fundida o forjada. El peso del material tiene implicaciones no sólo en los costos iniciales, sino también durante el proceso de fabricación. Las dimensiones disponibles también juegan un papel importante, pues determina si se consideran otros materiales. Por ejemplo, los plásticos o el aluminio requieren de dimensiones mayores para alcanzar el mismo rendimiento estructural del acero.

La Norma Cubana en sus especificaciones contempla las formas y dimensiones del surtido así como sus tolerancias, para facilitar la selección correcta de material por el usuario. La norma *Thyssen* contiene toda la información acerca de las formas y dimensiones del surtido, su tolerancia y especifica la presencia de inclusiones e impurezas, es mucho más variada y completa que la Norma Cubana. Ninguna de las dos normas mencionadas proporciona información sobre el peso.

Factores mecánicos: Los factores mecánicos tienen que ver con la capacidad del material para soportar los diferentes tipos de esfuerzos que se les imponen. Las propiedades mecánicas del material que se utilizan como criterios de selección en el diseño son: la resistencia, el módulo de elasticidad, la tenacidad, la resistencia a la fatiga, la termofluencia, etc.

En las normas estudiadas existe información sobre las propiedades mecánicas de los materiales solo en estado de suministro, sin especificar los tratamientos térmicos a que pueden ser sometidos ni las propiedades que se pueden

obtener después de los mismos. También carecen de información sobre la termofluencia. En el caso específico de la *Thyssen* se puede encontrar alguna información sobre los tratamientos térmicos y propiedades posteriores.

Procesamiento y fabricación: Estos factores se relacionan con la capacidad para dar forma al material. Es común la utilización de procesos de fundición y de conformado. Los metales dúctiles y los materiales termoplásticos se les conforman mediante procesos de deformación, porque son rápidos y apropiados para la producción masiva. Los materiales cerámicos frágiles y de alto punto de fusión se les da forma, por lo general, mediante un proceso de sinterizado o de metalurgia de polvos. En los materiales compuestos se utilizan técnicas de formado por aspersión y de almacenamiento. La fabricación abarca los procedimientos de unión (soldadura autógena, TIG, MIG, MAG, etc.), de conformado y de maquinado así como los procedimientos de acabado (pulido, rectificado, etc.).

Excepto la norma *Thyssen* que aporta información sobre los electrodos que se pueden emplear para cada tipo de material con todas sus especificaciones, las otras normas no brindan esta información. En ningún caso aparece información sobre otros procesos de manufactura aplicadas al material en cuestión.

Factores de vida útil de los componentes: Estos factores están relacionados con el tiempo de vida útil de los materiales, para desempeñar las funciones establecidas en el producto. Las propiedades pertenecientes a este grupo son la resistencia a la corrosión, a la oxidación y al desgaste, la termofluencia y las propiedades de fatiga bajo cargas dinámicas. El comportamiento de un material es más difícil de predecir durante la etapa de diseño. Estos aspectos no son tratados en ninguna de las normas estudiadas.

Costos y disponibilidad: Los costos y la disponibilidad de materiales son dos factores inseparables en la actualidad. De la misma forma, la cantidad y estandarización tienen relación con el costo. Aún cuando los materiales están disponibles, es importante si los pedidos se realizan en toneladas, kilogramos o gramos. Las

normas de materiales más conocidas no aportan información sobre el costo y disponibilidad de los mismos.

Las normas surgen como resultado de la necesidad de conocer las producciones mecánicas de los diferentes materiales, así como lograr una clasificación de estos en dependencia de diferentes aspectos técnicos, que pueda brindarle información al usuario de forma tal que facilite la selección de un determinado material en dependencia de las necesidades específicas. Otras de las causas que favorecieron el surgimiento de las normas es el constante crecimiento de las producciones mecánicas a nivel mundial, la especialización en los niveles de producción que provocó la aparición del intercambio de productos, que trajo como consecuencia la necesidad de agruparlos según los parámetros técnicos.

De las normas estudiadas, la Norma Cubana realiza la clasificación en función de: utilización y dimensiones del surtido (lo que hace muy engorroso la búsqueda de un determinado material), su composición química y las propiedades mecánicas las que se dan solo en su estado de suministro. Las otras normas consultadas [3], [4], [5], [6], [7], [8] contemplan los grados de los aceros, su composición química, la conversión en otras normas por cada clasificación.

La norma *Thyssen* informa acerca de la clasificación de los aceros difiriendo de las demás normas en que clasifica a los aceros inoxidable y refractarios como un grupo aparte del grupo que en las otras normas se clasifican como aceros con propiedades especiales, además presenta

diferencias en algunos de los valores de la composición química. Tiene como ventaja que prevé los tratamientos térmicos y las propiedades mecánicas posteriores, así como las dimensiones y forma del surtido.

La elección de un material debe iniciarse desde la etapa de diseño conceptual, en la cual se identifican los posibles materiales. Las restricciones en cuanto a temperatura, corrosión y demás aspectos, permiten identificar fácilmente una clase de material. Los diseños preliminares se pueden elaborar en función de las propiedades que se publican en materiales y normativas (resistencia a la rotura, límite de fluencia, resistencia al impacto, estriación, alargamiento relativo y dureza). En el diseño de detalle, el diseño definitivo se realiza tomando en consideración el material real que se utilizará.

En la actualidad, los diseñadores seleccionan los materiales teniendo en cuenta tres aspectos fundamentales: las propiedades del material, los procesos de fabricación asociados al material y los costos derivados de estos aspectos. La selección en función de las propiedades del material consiste en hacer coincidir, de la forma más cercana posible, los valores numéricos de las propiedades de los materiales con las restricciones y los requisitos del producto. A menudo es necesario utilizar la combinación de propiedades según los esfuerzos y el medio en que trabajará la pieza. Las propiedades a las que se les presta mayor atención son las reflejadas en la Tabla 1 [9].

Tabla No. 1. Propiedades de los materiales de uso más frecuente en el diseño.

| No relacionadas con la microestructura | Relacionadas con la microestructura |
|--|-------------------------------------|
| Densidad | Resistencia |
| Módulo de elasticidad | Ductibilidad |
| Conductividad térmica | Tenacidad a la fractura |
| Coefficiente de expansión térmica | Fatiga |
| Temperatura de transición | Termofluencia |
| Corrosión | Impacto |
| Punto de fusión | Dureza |
| Costo | |

El procedimiento de búsqueda de las propiedades de los materiales en los diversos manuales y normas existentes resulta un proceso muy tedioso y engorroso y puede consumir mucho tiempo [10], [11]. Es por ello que el objetivo principal de este trabajo consiste en el diseño y desarrollo de un software que permita automáticamente la selección de un material adecuado para cualquier tipo de aplicación en los aceros. El mismo nos facilitará la información al hacérsele el pedido, ya sea en dependencia de la composición química, aplicación, propiedades físico mecánicas y surtido. Este software ofrece también la posibilidad de obtener información acerca de los tratamientos térmicos y termoquímicos aplicables al material dado, así como las propiedades a obtener después de efectuados.

La selección del material en función de los procesos de fabricación, intenta encontrar el proceso adecuado para obtener la forma de la pieza o componente deseado. Esta tarea es compleja debido a la diversidad de métodos existentes y a las diferentes posibilidades de aplicación. Sólo en el caso de la norma *Thyssen* se brinda alguna información sobre el proceso de soldadura y tratamiento térmico [10].

3. Selección automatizada de aceros de Ingeniería.

Cuando se diseña algún elemento de máquina o se elabora la tecnología para la fabricación y recuperación, lo primero que realiza el diseñador o el tecnólogo es seleccionar el material a utilizar en dependencia de las condiciones de trabajo del mismo. La existencia de diferentes normas internacionales sobre materiales [3], [4], [12], [7], [6], [8], la poca información bibliográfica sobre el grado del material, propiedades físico mecánicas, tratamiento térmico, así como de la conversión de una a otra norma, propicia la elaboración de una herramienta informática o gestor de base de datos para los aceros de Ingeniería.

Para facilitar el proceso de identificación, conocimiento y selección de materiales desde la etapa de especificación del proceso de diseño, se desarrolló una aplicación informática basada en un gestor de bases de datos, siguiendo el

procedimiento heurístico que utiliza el diseñador y el constructor de máquinas. En la Figura 2 se puede apreciar la morfología del sistema. La aplicación permite al ingeniero o especialista conocer los aspectos más relevantes respecto a los materiales. Este software proporciona rápidamente la siguiente información:

1. La composición química de los grados contenidos en la base de datos.
2. Los grados con la composición química que especifique el usuario.
3. Los grados equivalentes del grado seleccionado, es decir, aquellos aceros definidos en las normas de otras instituciones o naciones cuya composición química sea aproximadamente igual a la del grado introducido.
4. Las propiedades físico mecánicas de los grados en estado de suministro.
5. Las propiedades físico mecánicas de los grados después de ser tratados térmicamente.
6. Las conversiones entre la resistencia a la tracción y los ensayos de dureza que más se emplean (*Rockwell*, *Brinnell*, *Shore* y *Poldy*) y los grados con la composición química que especifique el usuario, donde la búsqueda apoyado en ciertas recomendaciones.

Para conocer uno de los aspectos esenciales de los materiales a utilizar en un determinado producto, es decir, su composición química, el software posee una representación explícita que contiene la composición química de cada grado de material correspondiente a su norma específica (país de procedencia) y las propiedades mecánicas según el estado de suministro (normalizado, laminado en frío, laminado en caliente, etc.). Como regla, en la composición del acero se encuentran el Carbono, el Manganeso, el Silicio, el Azufre y el Fósforo. Para obtener un acero de propiedades especiales en el metal se introducen las adiciones de aleación de Cromo, de Níquel, de Molibdeno, de Wolframio, de Cobre, de Niobio, de Vanadio, etc. El software permite la búsqueda al diseñador, introduciendo la composición del acero por elementos de aleación.

La tabla de composición química contiene el grado del material con la composición química

correspondiente a la norma en específico y las propiedades físico mecánicas según el estado de suministro (normalizado, laminado en frío, laminado en caliente, etc.). La tabla de composición química posee las propiedades físico mecánicas de los grados en estado de suministro [4], [12], [13]. Las mismas son la resistencia a la rotura por tracción, por flexión, límite elástico,

resiliencia (resistencia al impacto) y dureza; que definen los parámetros del régimen de elaboración, como son: el avance y la profundidad de corte durante el arranque de virutas, la selección del electrodo idóneo para los casos en que sea necesario unir las piezas por soldadura, la fuerza o la potencia consumida en la conformación, etc.

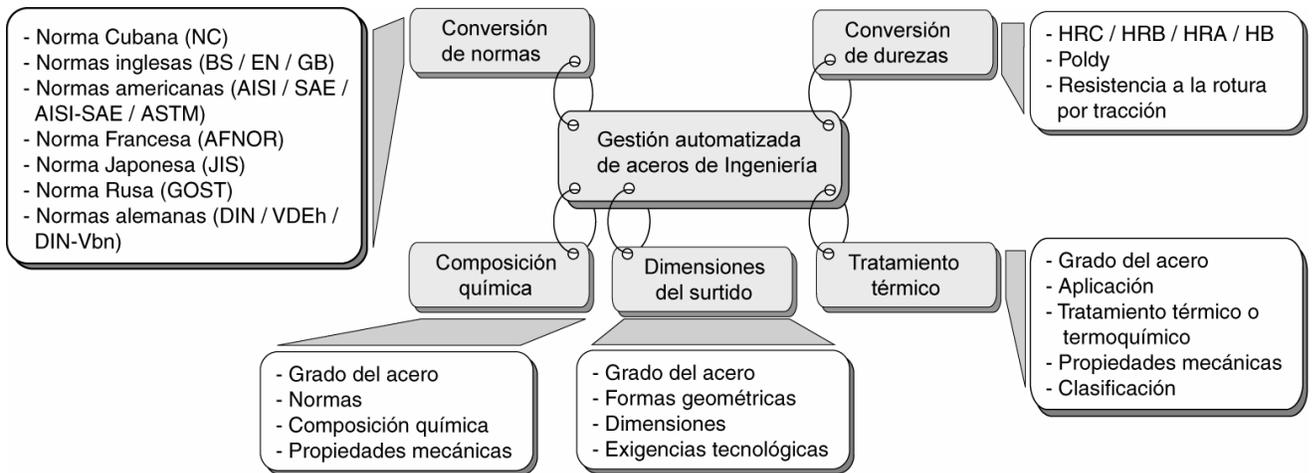


Figura 2. Tablas y elementos fundamentales del gestor de bases de datos de aceros de Ingeniería

La tabla de tratamiento térmico contempla el grado del material, su composición química, los tipos de tratamientos térmicos volumétricos o termoquímicos, así como las propiedades físico mecánicas que definen estos tratamientos de acuerdo al tipo de norma seleccionada, entre ellas se encuentran: la resistencia a la fluencia (σ_{02}); la resistencia a la flexión (σ_f); la resistencia a la rotura (σ_u); la temperatura de fusión (t_f) y la resiliencia (k_{cu}). Además, posee la aplicación y clasificación por cada grado.

La tabla correspondiente a la conversión de normas permite consultar la conversión de grados en cualquiera de las normas con que cuenta el software. La tabla de dimensiones del surtido, contiene el grado del material, las indicaciones de las formas geométricas en que puede suministrarse con las dimensiones de las mismas y las exigencias tecnológicas de estos materiales. La tabla correspondiente a la conversión de dureza posee la correspondencia existente entre varios tipos de durezas, así como la relación que guarda con sus propiedades mecánicas.

La tabla de dimensiones del surtido, contiene el grado del material, las indicaciones de las formas geométricas en que puede suministrarse (hexagonal, barras, planchas, etc.) con las dimensiones de las mismas, las exigencias tecnológicas de estos materiales (rugosidad superficial, cantidad de impurezas, etc.).

3. Método de solución desarrollado.

Cuando se necesita reparar o sustituir una pieza, la mayoría de las veces se desconoce el tipo del material de la pieza a recuperar o sustituir. En estos casos, es necesario determinar en los laboratorios metalográficos algunos elementos de su composición química, con estos datos, que algunas veces no son suficientes, el tecnólogo o usuario debe identificar el grado del material utilizando las normas nacionales e internacionales vigentes que se posean en ese momento (Figura 3).

El sistema desarrollado constituye una herramienta de apoyo a la búsqueda de las soluciones al problema planteado, al proporcionar una fuente de consulta rápida de las diferentes

normas existentes para el marcado de los aceros de Ingeniería, para la restauración y fabricación de piezas.

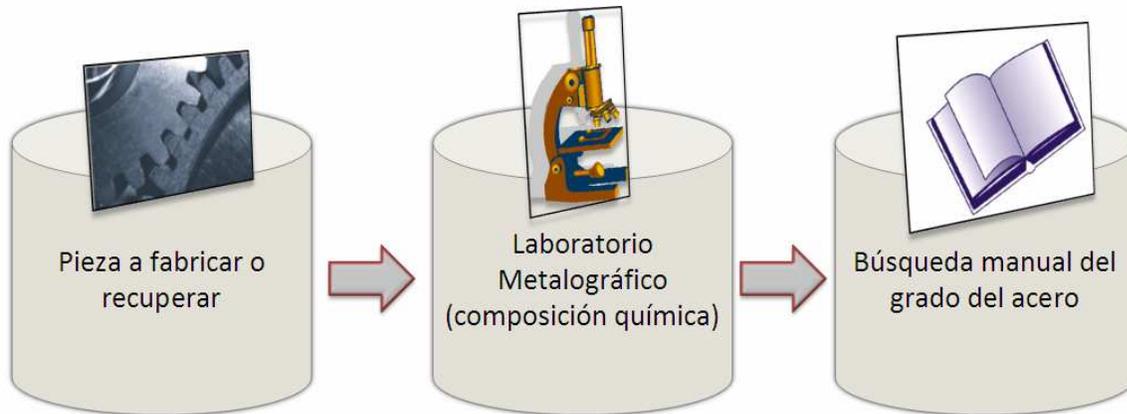


Figura 3. Solución del problema por el método común o tradicional.

El sistema desarrollado permite dar solución al problema planteado, a causa de la gran variedad de normas existentes para el marcado de materiales, y debido a la diversidad de formas presentes en la búsqueda de información respecto a los materiales de ingeniería, para la fabricación o recuperación de piezas. La información inicial que proviene del laboratorio metalográfico, o de cualquier otra fuente de información, sirve como llave de entrada al sistema desarrollado, el mismo procesa esta información y brinda los resultados deseados (Figura 4).



Figura 4. Solución del problema por el método automatizado.

Otra variante que sirve como entrada al sistema, lo constituye el Grado del material en cualquiera de las normas mencionadas, obteniéndose las informaciones antes descritas.

La información inicial del sistema puede ser suministrada por diversas vías, una de ellas puede ser a través de las condiciones de trabajo, introduciendo como datos algunas propiedades mecánicas que debe cumplir el material, como resistencia a la rotura, dureza, temperatura de trabajo, brindándose la información indicada en la Figura 4. También se tiene acceso al sistema utilizando la clasificación de los materiales, así como la utilización de ellos según el campo de aplicación.

A continuación se expone un ejemplo (Tabla 2) de conversión de normas con el uso del sistema desarrollado, en este caso, se tomó como información inicial el Grado del material (20XHM y 38X2H2MA) en norma GOST, y el sistema ofrece entre otras informaciones el marcado de los materiales en otras normas internacionales.

Tabla No. 2. Conversión de normas por el sistema para dos tipos de aceros aleados.

| GOST | NC | DIN | AFNOR | BS | JIS | AISI |
|----------|------------|---------------------|---------------------|--------|---------|------|
| 20XHM | 20CrNiMo | 21NiCrMo22 | 18CD4 | 805A20 | SQVIA | 8720 |
| 38X2H2MA | 38Cr2Ni2Mo | 34CrNiMo6 35NCD6 | 35CrNiMo6 817M40 | 816M40 | SNCM447 | 2337 |

El diálogo principal (Figura 5) proporciona información al usuario sobre algunas características de la aplicación. Del mismo modo vincula los restantes diálogos o ventanas (como expresa la Figura 2), posibilitando el rápido acceso a las mismas, con las seis posibles opciones u órdenes de trabajo:

- Búsqueda por composición química
- Búsqueda por grado
- Búsqueda de equivalentes
- Búsqueda por la clasificación
- Búsqueda por tratamientos térmicos
- Búsqueda por durezas

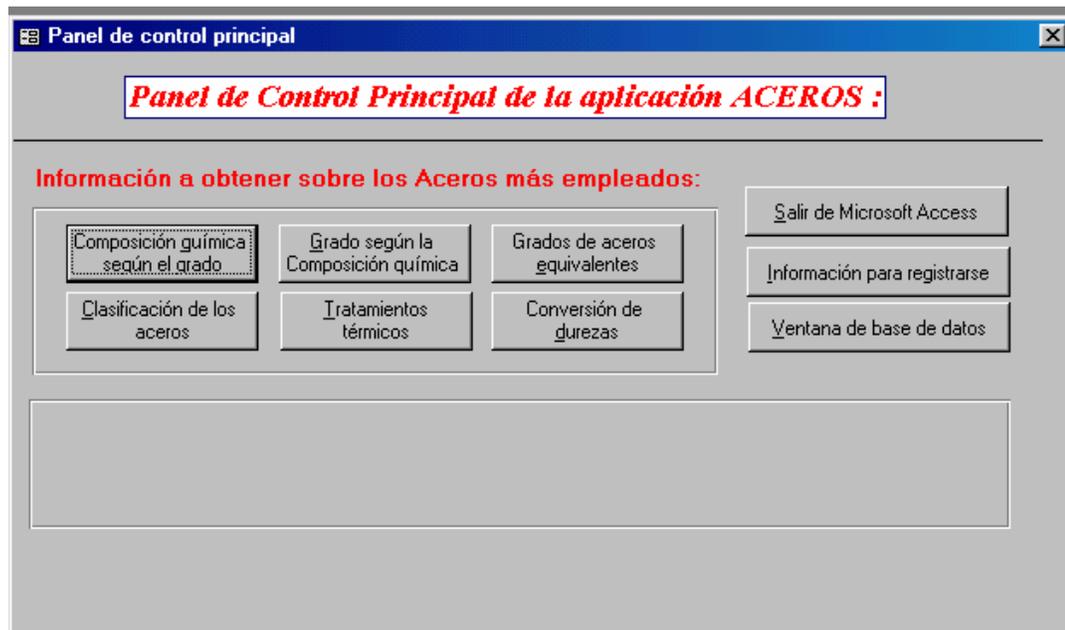


Figura 5. Tablas de consulta del gestor de bases de datos de aceros de Ingeniería.

En la figura 6 aparece una muestra del resultado de una búsqueda de aceros por clasificación.

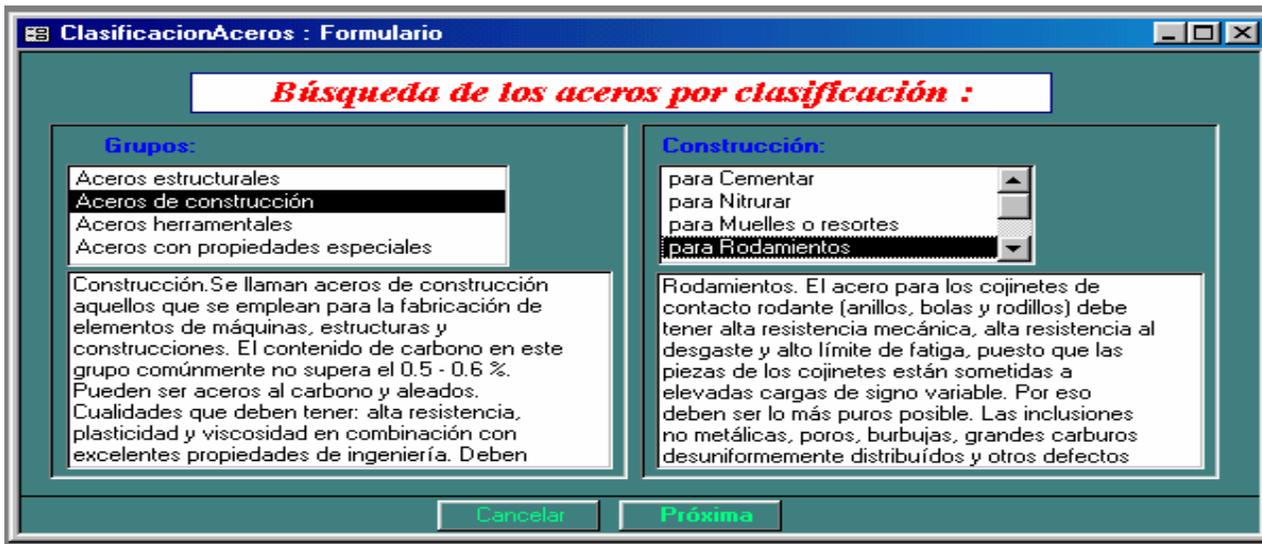


Figura 6. Tabla de consulta de los aceros de Ingeniería por clasificación.

De esta forma, el Ingeniero o tecnólogo puede utilizar el sistema gestor de materiales de Ingeniería como una herramienta de apoyo a la toma de decisiones respecto al material, en las diferentes etapas del ciclo de vida de las piezas. En la Figura 7 se muestra el diálogo de búsqueda de aceros por composición química, a partir de que el diseñador o tecnólogo, disponga de este tipo de datos.

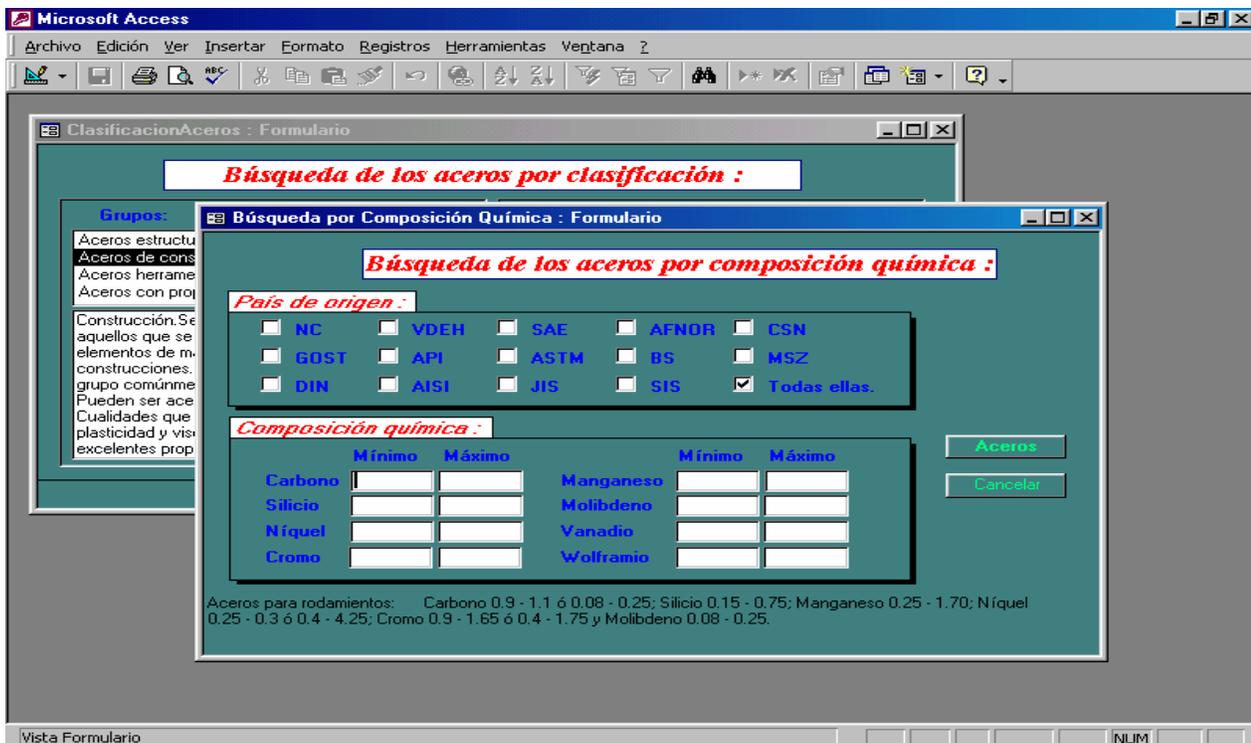


Figura 7. Diálogo de búsqueda de aceros por composición química

La herramienta desarrollada permite al diseñador, tanto en la etapa primaria del proceso de diseño, como en la etapa de diseño de detalle, disponer de una fuente de información que facilita la toma de decisiones relacionadas con el material de las piezas o componentes. A su vez, sirve al tecnólogo como una herramienta de consulta para la proyección tecnológica.

4. Conclusiones.

Este artículo ha presentado el desarrollo de una herramienta automatizada para la selección de los aceros más utilizados en la construcción de maquinarias. La herramienta constituye una ayuda para la selección de los materiales desde la etapa conceptual del proceso de diseño, donde se identifican las diferentes categorías de materiales a utilizar. La herramienta ha demostrado su validez desde el punto de vista docente e industrial.

5. Referencias.

1. **ROMEVA, C.R.** *Diseño Concurrente*. Vol. 1. 2002, Barcelona: Edicions UPC.
2. VDI, *Methodik zum Entwickeln und Konstruieren Technischer Systeme und Produkte: VDI-Verlag*. 1986.
3. GOST, *Gosstandart 5632-80*. 1980. p. 456.
4. *Handbook of comparative World Steel Standards*. The International Technical Information Institute ed. 1980: Japón. 448.
5. **PÉREZ, F.M.** *Guía para la selección y conversión de aceros soviéticos y otras normas internacionales*. 1997, ACINOX. Servicio de Metales: La Habana.
6. *NC 5739:84. Misceláneas Aceros y sus laminados. Aceros resistentes a la corrosión, termo refractarios y termoresistentes*. La Habana ed. Vol. 2. 1984. 260.
7. *NC 5739:84, Misceláneas . Aceros y sus Laminados*. 1984, La Habana.
8. *Norma Thyssen*. 1997. 502.
9. **MANGONON, P.L.** *Ciencia de los Materiales. Selección y Diseño*. Vol. 1. 2001, México: Pearson Educación.
10. **DUMITRESCU, L.** *Gestión Automatizada de Aceros de Ingeniería*, in *Ingeniería Mecánica*. 2003, Universidad de Holguín: Holguín. p. 91.
11. **MARTÍNEZ, F.** *Guía para la selección y conversión de aceros soviéticos y otras normas internacionales*. Vol. 1. 1997, La Habana: ACINOX Servicio de metales.
12. *Handbook of Soviet and Foreign Standards for high-grade and Extrahigh-grade Steel*. Junta Central de Planificación ed. 1998, La Habana. 710.
13. **PÉREZ, F.M.** *Teoría y Tecnología del tratamiento térmico*. 1990, La Habana: Pueblo y Educación. 440.

Agradecimientos.

Esta investigación es parte de los resultados del Grupo de Manufactura y Reacondicionamiento de Materiales, adscrito al Departamento de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Holguín. Los autores desean expresar su agradecimiento por La cooperación del Departamento en la preparación del artículo.

L. Dumitrescu¹, A.M. Quesada-Estrada², R. Pérez-Rodríguez³, L.W. Hernández⁴

1. Profesora Auxiliar, Master en Ciencias

E-mail: dumitrescul@facing.uho.edu.cu

2. Profesora Auxiliar, Doctora en Ciencias Técnicas

E-mail: anamaria@crystal.hlg.sld.cu

3. Profesor Titular, Doctor en Ciencias Técnicas

E-mail: roberto.perez@facing.uho.edu.cu

4. Asistente, Ingeniero Mecánico

E-mail: wilfredo@facing.uho.edu.cu

Departamento de Ingeniería Mecánica.

Facultad de Ingeniería, Universidad de Holguín. Cuba.

Fax: +53 24 48 1843. Teléfono: +53 24 48 2675