

## ANÁLISIS Y DESARROLLO DE UN PROGRAMA DE SELECCIÓN RÁPIDA DE FACTORES DE SEGURIDAD, PARA DISEÑO DE ELEMENTOS MECÁNICOS.

### Analysis and development of a program of fase selection of factors of safety, for design of mechanical elements

#### RESUMEN

En este artículo se presenta el resumen metódico de los principales criterios de autores para la selección de un buen valor de Factor de Seguridad para la etapa de diseño de una parte de máquina, elemento estructural o sistema mecánico, fruto de un trabajo de investigación en el año 2006.

Estos criterios son sistematizados en un programa, el cual se espera sea de mucha ayuda a estudiantes de ingeniería o ingenieros con poca experiencia en la selección adecuada de un buen factor de seguridad.

**PALABRAS CLAVES:** Factor de seguridad, programa computacional, diseño mecánico.

#### ABSTRACT

*This issue presents briefly the summary of a guide manual for correctly selecting the value of safety factors, proposed by some authors in order to use them in machine design, structural elements or mechanical systems, as a result of a research project in 2006.*

*These criteria are organized in a software and which is expected to be helpful for engineering students or engineers without experience in the proper selection of a good safety factor.*

**KEYWORDS:** Safety factors, computer program, machine design.

#### LUIS CARLOS RÍOS Q.

Ingeniero Mecánico, M.Sc.  
Profesor Asistente  
Universidad Tecnológica de Pereira  
lcrios@utp.edu.co

#### EDUARDO RONCANCIO H.

Ingeniero Mecánico, M.Sc.  
Profesor Titular  
Universidad Tecnológica de Pereira  
educ@utp.edu.co

## 1. INTRODUCCIÓN

En el proyecto de construcción de algún elemento de máquina, el ingeniero encargado, luego de establecer la carga preliminar, en la cual no se tienen en cuenta sobrecargas ni incertidumbres, a la que habrá de trabajar dicho elemento, es necesario que proceda a diseñar con cierto valor de carga mayor o carga de diseño, con el fin de contrarrestar al máximo las probabilidades de falla en el elemento (producto de que eventualmente se presente esa carga mayor en vez de la preliminarmente establecida, ya que pueden existir sobrecargas por mal uso, cargas inesperadas, etc) que, a la larga, puede ser causa de calamidades. Ese valor de carga mayor al inicial se puede expresar matemáticamente como la multiplicación de la carga preliminar mencionada por un número mayor que la unidad, y el cual se conoce como **Factor de Seguridad**; ese es apenas el Factor de Seguridad asociado a la magnitud de la carga aplicada. Como se verá más adelante, el Factor de Seguridad de un diseño abarca más parámetros que éste, y es el que normalmente se conoce con el nombre de Factor de Seguridad Global o General.

Se desarrolla un programa computacional, que se espera sea de utilidad para el estudiante o al ingeniero novato con poca experiencia en el diseño, que reúne los principales criterios de los autores más representativos y permite la escogencia adecuada de uno o varios factores de seguridad para su aplicación en el diseño de elementos mecánicos.

## 2. CONTENIDO

### 2.1 FACTOR DE SEGURIDAD

Considérese un diseño basado en el más simple caso de sollicitación de carga, una barra sometida a tracción a lo largo de su eje central (caso de esfuerzo uniaxial), tal y como se aprecia en la figura 1.



Figura 1. Barra sometida a tracción pura por medio de una carga  $P$

El esfuerzo normal promedio  $\sigma$  generado en la barra es:

$$\sigma = P/A, \quad (1)$$

donde  $P$  es el valor de la fuerza aplicada y  $A$  es el área de la sección transversal. Si se hace  $k=1/A$ , definiendo a  $k$  como una constante de proporcionalidad, se tendrá  $\sigma = kP$ , lo cual indica que el esfuerzo es directamente proporcional a la carga aplicada (por ejemplo, si se duplica el valor de carga, se duplicará también el valor de esfuerzo generado).

Debido a las incertidumbres en la carga preliminar, se hace necesario implementar una Carga de Diseño (aquella en la cual sí se tengan en cuenta todos los imprevistos, es decir, aquella que abarque cargas inesperadas) igual a cierto múltiplo del valor inicialmente esperado (carga preliminar  $P$ ), es decir, aplicar un Factor de Seguridad  $N_p$  a la carga  $P$  (matemáticamente hablando, nos referimos a efectuar una multiplicación de la carga  $P$  por el mencionado Factor de Seguridad  $N_p$ ), lo cual hará resultar un nuevo valor de esfuerzo en la barra; esto es:

$$P_d = N_p * P \quad (2)$$

Entonces;  $\sigma_d = k(N_p * P)$  (3)

Tal que  $P_d$  es la Carga de Diseño,  $N_p$  es el Factor de Seguridad debido a cargas imprevistas y  $\sigma_d$  es el Esfuerzo de Diseño, el cual es obviamente mayor que el preliminar.

De la misma manera, se deseará que  $\sigma_d$  sea menor que la resistencia  $S$  propia del material del cual se irá a construir el elemento (el cual vendrá respectivamente tabulado en libros, o será un dato entregado por el proveedor), es decir, que  $\sigma_d$  sea un submúltiplo de  $S$ . Esta relación se puede expresar como la aplicación de un Factor de Seguridad  $N_s$  a  $S$ , así:

$$\sigma_d = S/N_s \quad (4)$$

De tal forma que  $S = k(N_p)(N_s)P$  (5)

Tal que  $N_s$  es un Factor de Seguridad debido a esfuerzos, el cual, como se puede apreciar en la ecuación, debe ser mayor que la unidad.

Cada material tiene un propio valor de resistencia, y ésta se presentará como deformación permanente o rotura, según que el material sea dúctil o frágil, respectivamente.

**OBSERVACIÓN:** cuando un literal  $\sigma$  se cambia por uno  $S$ , ya no se estará representando un esfuerzo sino una resistencia, recordando que Esfuerzo es la medida de la intensidad de una fuerza interna, que matemáticamente se define como la fuerza que actúa por unidad de área, y que Resistencia es el valor máximo de carga o esfuerzo que

un material permite antes de producirse la falla.

De las ecuaciones anteriores se obtiene:

$$S = k * N * P \quad (6)$$

Donde  $N = N_p * N_s$  es normalmente llamado Factor Global de Seguridad o Coeficiente Global de Seguridad. Este Factor abarca las incertidumbres concernientes a la aplicación de la carga (con  $N_p$ ) y a la generación de esfuerzos (con  $N_s$ ).

Despejando  $N$  de la ecuación resulta:

$$N = S/(k*P) \quad (7)$$

Donde  $S$  es la resistencia del material escogido  $k*P$  esfuerzo máximo preliminar en el elemento

La última ecuación es la definición usual de Factor de Seguridad. Obsérvese que en el denominador aparece "Esfuerzo máximo preliminar en el elemento =  $k*P$ ", que es el esfuerzo inicial de diseño, es decir, aquel en el que no se toman en cuenta las sobrecargas.

En el término  $S/N_s$  es el Esfuerzo de diseño o Esfuerzo de trabajo, el cual se define como el esfuerzo máximo que sufrirá el elemento, y bajo el cual se garantiza que no se presentará falla en el mismo.

De igual forma, el término  $N_p * P$  se denomina Carga máxima permisible, Carga de diseño o Carga de trabajo, la cual se entiende como aquella en la que ya se encuentran incluidos los imprevistos; o sea, aquella que abarca, en este caso, cargas inesperadas.

Respecto al Factor de Seguridad  $N$ , se puede considerar como una medida de la incertidumbre en el diseño de modelos analíticos, en teorías de fallas y en datos de las propiedades del material manejado. Este factor siempre será mayor a uno, y nos indica qué tanta confianza y exactitud es la que se emplea en los cálculos.

## 2.2 RECOMENDACIONES Y CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DE FACTORES DE SEGURIDAD

El diseño de elementos de máquinas con base en Factores de Seguridad es un área bastante limitada, puesto que directamente sólo es aplicable a elementos con geometrías que sean sencillas; así, por ejemplo, partiendo de un Factor de Seguridad sugerido por cualquier fuente o por la experiencia del diseñador, dicho Factor es incluido en una ecuación de la que, mediante un despeje fácil, se obtiene por ejemplo el diámetro de un eje; este diámetro es el más pequeño en el que se garantiza que no se producirá falla, gracias a la aplicación del Factor de Seguridad. Pero, ¿qué sucede cuando la pieza no es de

una geometría tan sencilla como la de un eje, como es el caso de resortes, ruedas dentadas, cadenas de transmisión, etc.? En estos casos, se hace necesario tener en cuenta:

- Si las cargas son dinámicas o estáticas.
- Si el material es dúctil o frágil.
- Chequear los esfuerzos combinados en el punto más crítico.
- Aplicar la respectiva teoría de falla y verificar si bajo las condiciones dadas, los esfuerzos se mantienen dentro del límite permisible dado según el Factor de Seguridad empleado.

Sin embargo, muchas piezas de máquinas están sujetas a un sistema de esfuerzos tan complicado que no es posible aplicar estrictamente el análisis y son inevitables aproximaciones o suposiciones menos satisfactorias [3]. En casos como éste, se hace indispensable tener un capital capaz de sostener la impredecible cantidad de ensayos destructivos a que se sometería la pieza en sus distintas presentaciones, hasta encontrar una que cumpla con los requisitos de funcionamiento bajo parámetros de seguridad, es decir, que no se presente falla alguna. Otra opción es, gracias a los adelantos tecnológicos de la actualidad, simular las piezas en programas computacionales.

La selección de un valor apropiado para un Factor de Seguridad se fundamenta principalmente en las cinco bases siguientes [6]:

- 1 Grado de incertidumbre de la carga. Entre más datos se tengan acerca del valor de la carga que irá a sufrir la pieza, menor podrá ser el valor del Factor de Seguridad a emplear; en caso contrario, si son muy desconocidas las cargas, el diseño deberá ser más conservador al emplear un Factor de Seguridad elevado.
- 2 Grado de incertidumbre en la resistencia del material. Por lo general, los datos de resistencia de la pieza son distintos a los de la probeta del mismo material, además de que los datos obtenidos dependen mucho de las condiciones en que se efectúan las pruebas y las de funcionamiento. Por eso, entre más certeros sean estos datos, menor será la incertidumbre y, con ello, el Factor de Seguridad.
- 3 Incertidumbres en relación con las cargas aplicadas con respecto a la resistencia del material. Este punto se refleja en la inclusión de datos de esfuerzos y resistencias en las ecuaciones correspondientes a las teorías de falla que el diseñador pueda emplear para efectuar el respectivo diseño.
- 4 Consecuencias de la falla, seguridad humana y economía. Si la falla puede ocasionar lesiones o muertes humanas, el Factor de Seguridad a emplear necesariamente tendrá que ser elevado. Lo mismo ha de suceder si la falla de la pieza ocasiona la detención de una línea de ensamble o de producción.

5 Costo por proporcionar un Factor de Seguridad elevado. Un Factor de Seguridad siempre implicará un costo también alto, pero esto se justifica cuando, como se señaló en el punto 4, la falla puede ocasionar lesiones o muertes humanas o una parada en una línea de ensamble o de producción.

### 2.3 BASE DE AUTORES PARA LA SELECCIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD

Existe una gran diversidad de recomendaciones y criterios respecto del manejo de Factores de Seguridad en el diseño de elementos de máquinas; cada criterio depende de los estudios y de la experiencia de algunos investigadores en el área. A continuación se mencionan algunos de esos criterios (los cuales se amplían en el manual [10], disponible en la biblioteca de la Universidad Tecnológica de Pereira).

Se tomaron los autores más representativos en el área de los sólidos, quienes tienen gran relevancia en las investigaciones y metodología aplicada en la escogencia de los factores de seguridad.

Se tendrán en cuenta para este trabajo (manual y programa computacional) los siguientes criterios [1]:

- Criterio de Faires
- Criterio de Kimbal
- Criterio de Norton
- Criterio de Vidosic
- Criterio de Pugsley
- Criterio de Oberg y Jones
- Criterios especiales
  - ❖ ASME 1034 recipientes a presión
  - ❖ ASME 1086 recipientes a presión
  - ❖ Shigley para cables metálicos

### 3. ELABORACIÓN DEL PROGRAMA COMPUTACIONAL

El programa computacional fue elaborado específicamente con base en las teorías de falla estáticas y dinámicas, y los criterios propuestos anteriormente; su ventaja radica más que todo en que, al ejecutarlo y escoger cualquiera de los criterios expuestos, se obtiene de manera rápida un rango de valores de Factores de Seguridad sugerido. En adelante, ya es decisión del diseñador qué valor escoge del rango obtenido (como respuesta a los datos insertados), para lo cual ha de basarse en ciertos parámetros tales como la viabilidad económica, el grado de incertidumbre en la carga que fuere a sufrir la pieza mecánica, entre otros.

En todos los criterios que aparecen en el programa se insertan datos y se obtienen valores de Factores de Seguridad, a excepción del último criterio (Criterio de Shigley para cables metálicos), en el cual ya se tienen incluidos los valores de Factores de Seguridad para cada

aplicación, y el resultado obtenido no es más que la carga máxima que puede soportar cada cable, y con la cual se garantiza que no se romperá.

#### 4. EJEMPLO DE SELECCIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD

Para hacer una demostración del modo en que se emplea el programa, se procederá a resolver el siguiente ejemplo:

Un cable metálico se usa en un elevador que transporta gente hasta el vigésimo piso de un edificio. La carga del elevador puede sobrepasar su valor nominal en un 50 % antes de que un interruptor de seguridad apague el motor. ¿Cuál es el Factor de Seguridad? Emplear el criterio de Pugsley. Se podría usar cualquier otro criterio, pero se desea mostrar el manejo de las tabla del criterio escogido.

#### 4.1 SOLUCIÓN NUMÉRICA

##### 4.1.1 Criterio de Pugsley

Este criterio dice que el Factor de Seguridad es el resultado de multiplicar dos coeficientes, los cuales a su vez dependen de ciertas características acerca del diseño. Así, se tiene entonces:

$$N = N_x N_y \tag{7}$$

Donde:  $N_x$ : coeficiente de seguridad que involucra las características A, B y C.

A: calidad de los materiales, destreza, mantenimiento e inspección.

B: control sobre la carga aplicada a la parte.

C: exactitud del análisis del esfuerzo, información experimental o experiencia con dispositivos similares.

$N_y$ : coeficiente de seguridad que involucra las características D y E.

D: peligro para el personal.

E: impacto económico sobre las consecuencias del diseño.

Para manejar el criterio de Pugsley, es importante tener en cuenta que las características A, B y C se identifican con los símbolos: muy bien (mb), bien (b), regular (r) y pobre (p). Por su lado, las características D y E se identifican con los símbolos: muy serio (ms), serio (s) y no serio (ns).

En la tabla 1 se proporcionan los valores de  $N_x$  para varias condiciones de A, B y C. Así mismo, en la tabla 2 se proporcionan valores de  $N_y$  para varias condiciones de D y E.

Conociendo ya el criterio se procede a resolver el problema. Primero se le dan valores a las características A, B, C, D, y E (tabla 1).

A = mb: porque debe haber permanente mantenimiento e inspección del elevador y del cable. B = r: puesto que pueden existir posibles sobrecargas. C = p: debido a que no existe información de análisis de esfuerzos. D = ms:

puede morir gente si el elevador cae desde el vigésimo piso.

E = s: demandas posibles.

De los valores de las características A, B y C y recurriendo a la tabla 1, se tiene que  $N_x=2,1$ .

Así mismo, de los valores de las características D y E, y recurriendo a la tabla 2, se tiene que  $N_y=1,5$ .

Por lo tanto, aplicando la ecuación del criterio se obtiene el Factor de Seguridad.

$$N = N_x N_y = 2,1 * 1,5$$

$$N = 3,15$$

Característica		B =			
		mb	B	r	p
A = mb	C = mb	1,1	1,3	1,5	1,7
	C = b	1,2	1,45		1,95
	C = r	1,3	1,6	1,9	2,2
	C = p	1,4	1,75	2,1	2,45
A = b	C = mb	1,3	1,55	1,8	2,05
	C = b	1,45	1,75	2,05	2,35
	C = r	1,6	1,95	2,3	2,65
	C = p	1,75	2,15	2,55	2,95

A = r	C = mb	1,5	1,8	2,1	2,4
	C = b	1,7	2,05	2,4	2,75
	C = r	1,9	2,3	2,7	3,1
	C = p	2,1	2,55	3,0	3,45
A = p	C = mb	1,7	2,15	2,4	2,75
	C = b	1,95	2,35	2,75	3,15
	C = r	2,2	2,65	3,1	3,55
	C = p	2,45	2,95	3,45	3,95

Tabla 1. Valores de  $N_x$  resultado de combinar las condiciones A, B y C

Característica	D =		
	ns	S	ms
E = ns	1,0	1,2	1,4
E = s	1,0	1,3	1,5
E = ms	1,2	1,4	1,6

Tabla 2. Valores de  $N_y$  resultado de combinar las condiciones D y E

Ahora se procede a encontrar el factor de seguridad, usando el mismo criterio, pero con el programa computacional desarrollado.

Los pasos a seguir para resolver este problema mediante

el uso del programa computacional se enumeran a continuación:

1. Introducir el CD en la unidad respectiva del computador; en la pantalla aparecerá la figura 2, la cual corresponde al pantallazo inicial.

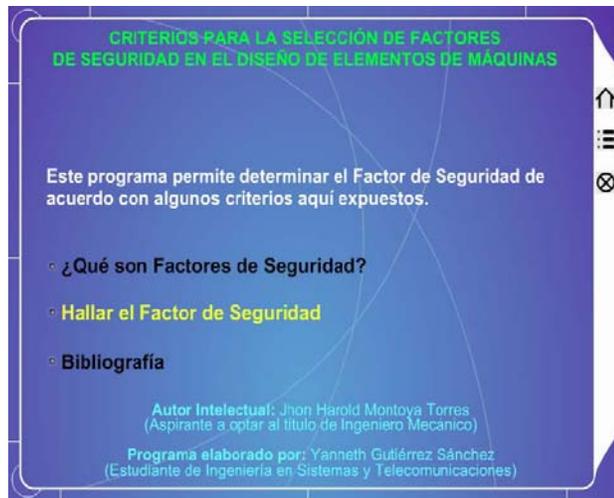


Figura 2. Pantallazo inicial

2. Se hace click donde aparece “Hallar el Factor de Seguridad”, o en el ícono de “Inicio” que aparece en la parte superior derecha. A continuación, se despliega la figura 3, correspondiente al segundo pantallazo. Aquí aparecen todos los criterios y se escoge el de Pugsley.

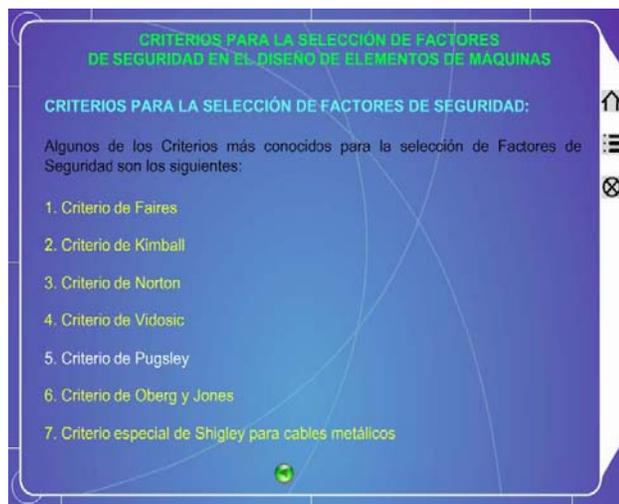


Figura 3. Criterios de selección

3. Ahora se hace clic donde aparece “Criterio de Pugsley”, y entonces habrá de aparecer el tercer pantallazo, propio de la figura 4.

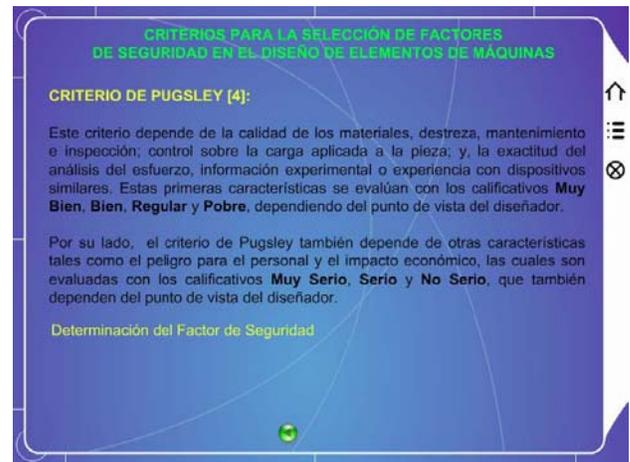


Figura 4. Criterio de Pugsley

4. Luego se hace clic donde aparece “Determinación del Factor de Seguridad”, y se desplegará el cuarto pantallazo, tal y como se muestra en la figura 5.

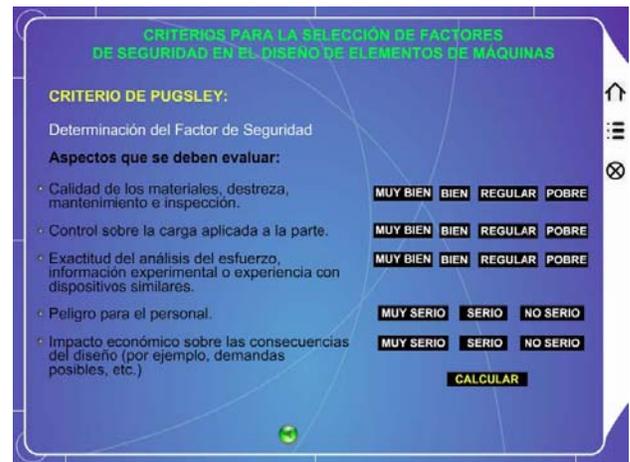


Figura 5. Determinación de los factores

5. Los aspectos que se deben evaluar según las condiciones expresadas en el planteamiento del ejemplo son las siguientes:

Primer ícono = MUY BIEN: porque debe haber permanente mantenimiento e inspección del elevador y del cable.

Segundo ícono = REGULAR: puesto que pueden existir posibles sobrecargas.

Tercer ícono = POBRE: debido a que no existe información de análisis de esfuerzos.

Cuarto ícono = MUY SERIO: puede morir gente si el elevador cae desde el vigésimo piso.

Quinto ícono = SERIO: demandas posibles.

De esta forma se hace clic, teniendo en cuenta el anterior razonamiento, en los respectivos hipervínculos que aparecen en el cuarto pantallazo, correspondiente a la figura 5.

6. Después de ejecutar la anterior instrucción, se hace

clic en el hipervínculo donde aparece “CALCULAR”. Así, aparecerá la respuesta al planteamiento del problema, que no es más que el Factor de Seguridad solicitado. Este argumento se muestra en la figura 6.

**CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DE FACTORES DE SEGURIDAD EN EL DISEÑO DE ELEMENTOS DE MÁQUINAS**

**CRITERIO DE PUGSLEY:**

Determinación del Factor de Seguridad

**Aspectos que se deben evaluar:**

- Calidad de los materiales, destreza, mantenimiento e inspección. **MUY BIEN BIEN REGULAR POBRE**
- Control sobre la carga aplicada a la parte. **MUY BIEN BIEN REGULAR POBRE**
- Exactitud del análisis del esfuerzo, información experimental o experiencia con dispositivos similares. **MUY BIEN BIEN REGULAR POBRE**
- Peligro para el personal. **MUY SERIO SERIO NO SERIO**
- Impacto económico sobre las consecuencias del diseño (por ejemplo, demandas posibles, etc.) **MUY SERIO SERIO NO SERIO**

**CALCULAR**

El Factor de Seguridad sugerido para este caso es  $N = 3,15$

Figura 6. Pantalla de cálculo

## 5. CONCLUSIONES

La selección de un Factor de Seguridad adecuado en el diseño de un elemento mecánico es, como se ha podido apreciar, una tarea bastante limitada. Por esto, la herramienta mostrada en este trabajo, es una solución adecuada para el ingeniero con poca experiencia en el tema y le sirve como guía en la elección de Factores de Seguridad en el momento de estar diseñando alguna pieza mecánica;

Se realizó la mejor selección, a nuestro criterio, de autores y sus respectivos métodos de selección en factores de seguridad para diseño de elementos de maquina.

Se desarrolló una herramienta importante para la selección automatizada de los factores de seguridad.

El programa presentado se puede incluir en un sistema virtual de diseño, donde se pueda evaluar con diferentes criterios los factores de seguridad y así validar la utilidad de esta herramienta.

Este programa queda abierto a posibles modificaciones y mejoras futuras, fruto de investigaciones en el área de los materiales y el diseño de elementos de máquinas, tareas que se pueden desarrollar en los grupos de investigación de la Facultad de Ingeniería mecánica

## 6. BIBLIOGRAFÍA

[1] BEER, Ferdinand P. & JOHNSTON, E. Russell Jr. Mecánica de Materiales. Segunda edición. Editorial Mc Graw Hill. Colombia. 1998.

[2] DEUTSCHMAN, Aaron; MICHELS, Walter; WILSON, Charles. Diseño de Máquinas: Teoría y Falla. Compañía Editorial Continental. México. 1991.

[3] FAIRES, Virgil Moring. Diseño de Elementos de Máquinas. Editorial Limusa. México. 2000.

[4] FAUPEL, Joseph H. & FISHER, Franklin E. Engineering Design. Second edition. Editorial John Wiley & Sons. USA. 1980.

[5] HAMROCK, Bernard; SCHMID, Steven; FACOBSON, Bo. Elementos de Máquinas. Editorial Mc Graw Hill. 1999.

[6] JUVINALL, Robert C. Fundamentos de Diseño para Ingeniería Mecánica. Editorial Limusa. México. 1991.

[7] KENNETH S. Edwards, Jr. Robert b. Mckee. Fundamentals of Mechanical Component Design. Editorial John Wiley & Sons. 1992.

[8] KIMBALL, Dexter. Construcción de Elementos de Máquinas. Editorial Uteha. México. 1969.

[9] NORTON. Robert L. Diseño de Máquinas. Editorial Prentice Hall. México. 1999.

[10] MONTOLLA Torres, J. H. Manual para la determinación y selección de factores de seguridad en el diseño de elementos de máquina. Trabajo de grado, Universidad tecnológica de Pereira. 2006