

# EVALUACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DEL EJE DE LA CHUMACERA DE LOS POZOS DE EXTRACCIÓN DE PETRÓLEO DEL EPEP-C DE LA PROVINCIA DE MATANZAS

MSc. Kobany Reyes Cruz<sup>1</sup>, Dr. C. Elpidia Caridad Cruz Cabrera<sup>2</sup>, MSc. Yordany Reyes Cruz<sup>3</sup>

1. Universidad de Matanzas – Sede “Camilo Cienfuegos”, Vía Blanca Km.3, Matanzas, Cuba. [pj.garcia@umcc.cu](mailto:pj.garcia@umcc.cu)

2. Universidad de Matanzas – Filial Universitaria Jagüey Grande, Calle 54 #904 e/ 9 y 11 Jagüey Grande, Matanzas.

3. Universidad de Matanzas – Sede “Juan Marinello”, Matanzas, Cuba

## Resumen

Se lleva a cabo la evaluación del eje de la chumacera de los pozos de petróleo de la Empresa de Perforación y Extracción de Petróleo del Centro de la provincia de Matanzas (EPEP-C), los cuales debido al régimen de trabajo que presentan se fatigan aproximadamente cada 9 meses, provocando grandes pérdidas en el proceso de producción con un costo aproximado de 79 389,12 CUP.

Para la solución de esta problemática rediseña el eje de la chumacera empleando técnicas avanzadas de optimización, mediante el uso del software SolidWorks, Working Model y Statgraphic, para obtener los parámetros geométricos del eje que garantice el correcto funcionamiento de los posos y minimizar los gastos antes mencionados.

*Palabras claves:* eje; optimización; diseño mecánico; pozos de extracción.

---

## **Desarrollo**

Para la solución exitosa de un problema, son importantes los medios y métodos utilizados. En el caso del diseño mecánico, juega un papel muy importante el conocimiento y experiencia del diseñador, aunque con esto no es suficiente para obtener un diseño competitivo en función de las necesidades del mundo actual, por tal motivo nos vemos en la necesidad del empleo de métodos de evaluación y optimización [7], con el propósito de darle solución a la problemática en estudio.

### **1.1 Análisis preliminar del equipo en estudio.**

La Empresa de Perforación y Extracción de Petróleo del Centro, creada el 18 de Diciembre de 1976 por la Resolución No. 76-109 del Ministerio de Minería y Geología; se encuentra ubicada en la zona de Guácimas perteneciente al Municipio de Cárdenas. Tiene su zona de operaciones comprendida en las provincias de Villa Clara, Cienfuegos y Matanzas. Cuenta con el mayor Yacimiento de Petróleo del país.

Su misión consiste en satisfacer una parte de las necesidades energéticas del país como resultado de la exploración de yacimientos gaseo-petrolíferos y de los servicios especializados, representando al CUPET.

La Empresa de Perforación y Extracción de Petróleo cuenta con varias unidades de bombeo SK-8 y SK-10; la que se encuentra afectada de forma sistemática por la rotura del eje de la chumacera, afectando la estructura de la unidad de bombeo con gastos de reparación en el orden de los 79389.12 CUP.

Por tal motivo el presente epígrafe tiene como objetivo describir las condiciones que generan la necesidad del diseño del eje de la chumacera; elemento en el que se ha puesto seria atención, por parte de los ingenieros de la Empresa de Perforación y Extracción y la Universidad de Matanzas.

### **1.2 Análisis Cinemático mediante Working Model**

El resultado obtenido del análisis cinemático fue realizado por especialistas de la empresa de perforación y extracción; lo que permitió a este trabajo darle continuidad al rediseño de la pieza en estudio, con el fin de obtener un diseño óptimo que garantice las condiciones de trabajo.

El siguiente estudio fue realizado con el software “Working Model” que es un paquete de simulación de movimiento, que permite construir y analizar rápidamente sistemas mecánicos con la posibilidad de aplicar las leyes de la mecánica sobre un diseño virtual antes de construir prototipos. Es posible importar la geometría de los sistemas de CAD más conocidos o dibujar directamente en Working Model; poner a punto modelos con motores, muelles, actuadores, engranajes, poleas, gravedad variable, campos de fuerza definibles, amortiguadores, cuerdas, separadores, uniones, fricción variable, y ranuras; medir y analizar los datos de la simulación tales como fuerzas, aceleraciones, velocidades, posiciones, energía, y plotear la información como gráficos o exportarla a paquetes numéricos, de análisis o de elementos finitos[10].

En la Figura 1.1 se muestra la modelación de forma simplificada del mecanismo de palanca con los siguientes valores (Tabla 1.2), presente en el equipo en estudio; obteniendo los siguientes resultados [6], (Tabla 1.3).



*Fig. 1.1. Análisis Cinemático*

*Tabla 1.2. Dimensiones de los elementos de la bomba*

Elementos	Largo(mm)	Altura(mm)	Masa(Kg)
1	2440	570	2190,23
2	2555	145	189,61
3	5460	630	9208,9

El estudio realizado con Working Model arrojó un total de 1305 resultados atendiendo a las diferentes posiciones de trabajo. En la siguiente tabla se muestra una simple porción para que el lector tenga una idea. La fuerza máxima calculada con el software nos brinda un valor de 419400 N, conociendo que el 50% de este valor de carga actúa sobre los ejes de la chumacera, o sea que sobre cada pasador actúa una carga de 209700N, valor que se tiene presente y se toma para la simulación con el software SolidWorks.

El software SolidWorks (trabajo con sólidos) permite tras un análisis estático o dinámico, conocer el comportamiento de las tensiones y desplazamientos del eje de la chumacera, aportando información de las causas de la rotura y posibles variantes para su rediseño.

Resultados obtenidos en la simulación

Tabla. 1.3. Resultados del Working Model

Posición	Tiempo		Fx N	Fy N	F N
0.000	0.000	0.000	-4,87E+04	-6,91E+04	8,45E+04
1.000	0.010	0.010	-4,82E+04	-6,86E+04	8,39E+04
2.000	0.020	0.020	-4,81E+04	-6,86E+04	8,37E+04
3.000	0.030	0.030	-4,79E+04	-6,85E+04	8,36E+04
4.000	0.040	0.040	-4,78E+04	-6,85E+04	8,35E+04
5.000	0.050	0.050	-4,76E+04	-6,84E+04	8,33E+04
6.000	0.060	0.060	-4,75E+04	-6,83E+04	8,32E+04
7.000	0.070	0.070	-4,73E+04	-6,83E+04	8,31E+04
8.000	0.080	0.080	-4,72E+04	-6,82E+04	8,29E+04
9.000	0.090	0.090	-4,70E+04	-6,82E+04	8,28E+04
10.000	0.100	0.100	-4,69E+04	-6,81E+04	8,27E+04
11.000	0.110	0.110	-4,68E+04	-6,80E+04	8,26E+04
12.000	0.120	0.120	-4,66E+04	-6,80E+04	8,24E+04
13.000	0.130	0.130	-4,65E+04	-6,79E+04	8,23E+04
14.000	0.140	0.140	-4,63E+04	-6,79E+04	8,22E+04
15.000	0.150	0.150	-4,62E+04	-6,78E+04	8,20E+04
16.000	0.160	0.160	-4,60E+04	-6,78E+04	8,19E+04
17.000	0.170	0.170	-4,59E+04	-6,77E+04	8,18E+04
18.000	0.180	0.180	-4,57E+04	-6,77E+04	8,17E+04
19.000	0.190	0.190	-4,56E+04	-6,76E+04	8,15E+04
20.000	0.200	0.200	-4,54E+04	-6,76E+04	8,14E+04
21.000	0.210	0.210	-4,53E+04	-6,75E+04	8,13E+04
22.000	0.220	0.220	-4,51E+04	-6,75E+04	8,12E+04
23.000	0.230	0.230	-4,49E+04	-6,75E+04	8,11E+04
469.000	4.690	4.690	2,73E+05	-4,06E+05	4,194E+05

### 1.3 Metodologías y procedimientos aplicados al proceso objeto de estudio

Las metodologías y procedimientos para el estudio del proceso de diseño y optimización se dividen en tres momentos o etapas:

- La primera etapa es la modelación y simulación del eje de la chumacera, vinculado con análisis de fatiga atendiendo las causas de rotura.
- La segunda etapa cuenta con el diseño de experimento, ateniendo el número de variables independiente y dependiente, empleando un diseño factorial completo (nk).
- La tercera etapa es la optimización del eje de la chumacera.

### 1.3.1 Etapa I: Procedimientos correspondientes a la Modelación y Simulación

En esta etapa se realizara un análisis preliminar del eje de la chumacera (Figura 1.2). Modelando la pieza en estudio, con las dimensiones reales y sometido a un análisis estático con la acción de fuerza de 209700N mediante el software SolidWorks.



Fig. 1.2.  
Eje de la  
chumacera

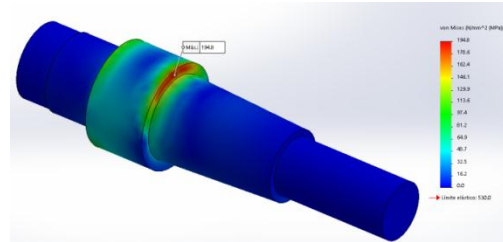


Fig. 1.3. Eje de la chumacera simulado

En la (Fig. 1.3) se obtienen los resultados de la simulación del eje de la chumacera sin radio de redondeo en el concentrador de tensiones, señalamiento que nos hacen los especialistas de la empresa.

Este eje no cuenta de un radio de redondeo en el escalón, donde se provoca la rotura del mismo, generándose valores de tensiones en el orden 194.8 MPa. Dicha geometría y conociendo que el escalón es un concentrador de tensiones donde se pueden triplicar los valores de las mismas [14]; da a pensar la posibilidad de incorporar un radio de redondeo, con el fin de disminuir este valor de 194.8 MPa.

### 1.3.2 Modelación y simulación con radio de redondeo:

Atendiendo la geometría del escalón nos permite incorporar valores de radio mayores que cero y menores que 10 mm. Se toma la decisión de realizar los siguientes estudios con radio de 1mm, 2mm, 3mm y un valor máximo de 10 mm; con el objetivo de aliviar el concentrador de tensiones e incrementar la vida útil de la pieza.

Variante 1 (radio 1 mm)

En esta variante mediante la simulación con radio 1mm se obtuvieron resultados poco favorables, como se puede observar en las Figuras (1.4) y (1.5) el factor de seguridad es de 0.88, y un valor de tensión de 599 MPa, sobrepasando los límites elásticos del material[12;13].

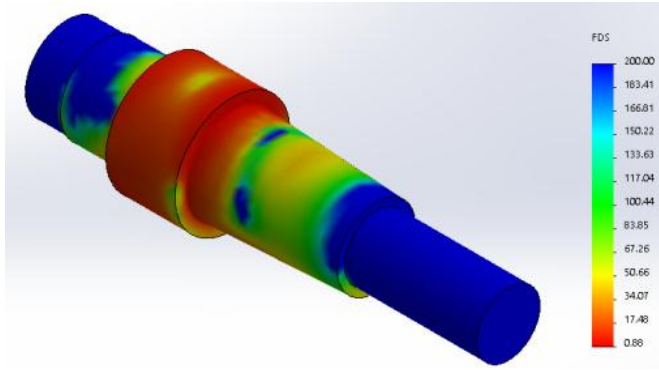


Fig. 1.4. Factor de Seguridad

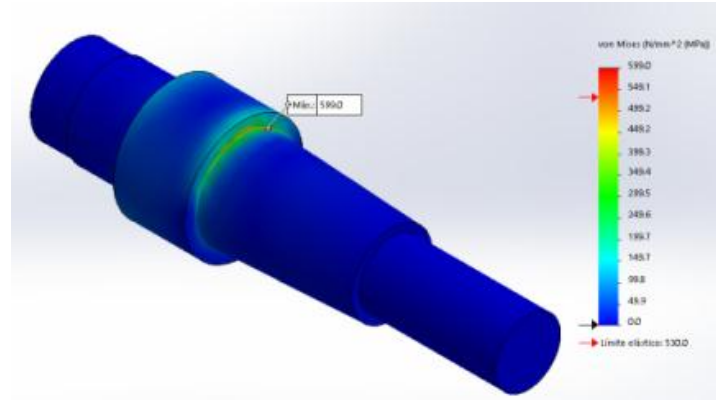


Fig. 1.5. Tensiones de Von Mises

### Variante 2 (radio 2 mm)

Esta variante con radio de redondeo de 2 mm arrojó valores favorables con relación a la variante 1, como se muestran en las (Fig. 1.5) y (Fig. 1.5), cuyo factor de seguridad aumentó a 1.14 y las tensiones de Von Mises disminuyeron considerablemente a 465.6 MPa con relación a la variante 1; estando por debajo del límite de fluencia del material, pero dando valores superiores que la variante sin radio.

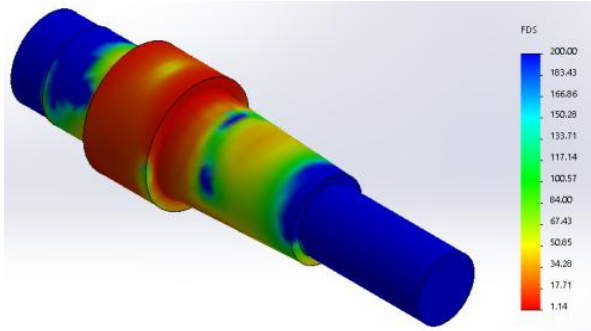


Fig.1.5. Factor de Seguridad

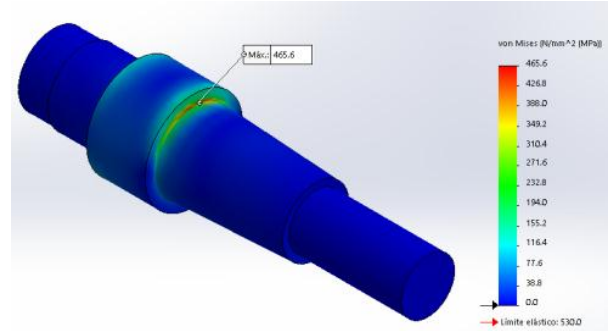


Fig. 1.6. Tensiones de Von Mises

### Variante 3 (radio 3 mm)

Como se puede observar en las (Fig. 1.7) y (Fig. 1.8), los resultados de esta variante son más aceptables que en las variantes 1 y 2, aportando valores de factor de seguridad mayor y menores valores de las Tensiones de Von Mises de 1.28 y 415.4 MPa respectivamente, pero todavía es superior que la variante inicial. (Alonso, 2008)

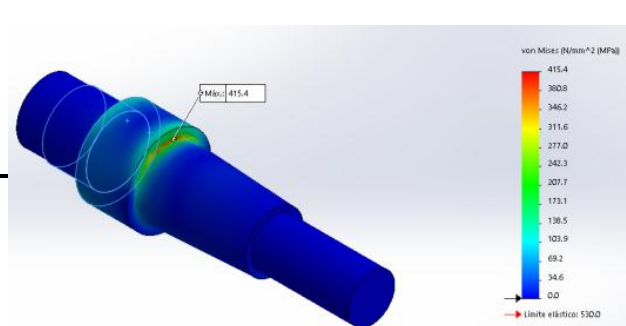
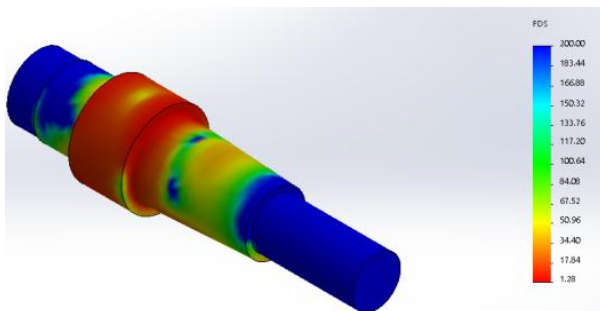


Fig. 1.7. Factor de Seguridad

Fig. 1.8. Tensiones de Von Mises

**Variante 4 (radio 10 mm)**

En esta variante (Fig. 1.9) y (Fig. 1.10) se puede observar algo interesante, en consideración con las variantes 1, 2, y 3, se tienen resultados positivos en cuanto a factor de seguridad y tensiones de Von Mises, siendo estos de 2.93 y 181.1 MPa respectivamente, quedando este muy por debajo del límite de fluencia del material AISI 1045.

Con este radio se logra disminuir las tensiones por debajo del resultado del primer análisis con valores de 194.8 MPa; pero así y todo no es significativo para una reducción de tensiones en el orden de los 13.7 MPa, por lo que se toma la decisión de continuar con la evaluación del eje; en busca de otras alternativas, para su rediseño.

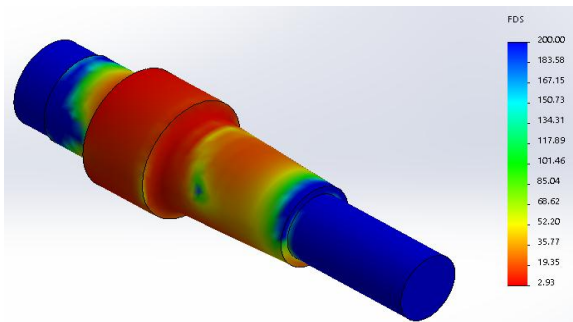


Fig. 1.9. Factor de Seguridad

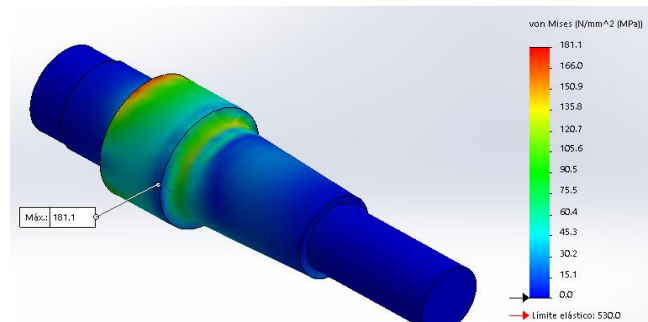


Fig. 1.10. Tensiones de Von Mises

Tabla 1.4. Resultados de la simulación en las diferentes variantes

Variantes	Tensiones equivalentes (MPa)	Desplazamiento (mm)	Factor de Seguridad
Sin radio	195.5	0.046	2.72
Radio 1 mm	599.0	0.049	0.88
Radio 2 mm	465.6	0.050	1.14
Radio 3mm	415.4	0.052	1.28
Radio máximo 10 mm	181.1	0.071	2.93

**1.3.3 Análisis de fatiga de la chumacera**

Las piezas durante su explotación son sometidas a cargas variables en el tiempo. La fatiga ocurre como consecuencia de repetidos ciclos de cargas (periódicas o no periódicas), sobre las piezas, provocando transformaciones mecánicas (plásticas) en el interior del material, apareciendo micro grietas que con su desarrollo paulatino hace que se produzca la rotura.

[1]

Datos:

d= 80 mm (Diámetro menor)

D= 100 mm (Diámetro mayor)

$\gamma_{material} = 530 \text{ Mpa}$ .

Límite de resistencia a la fatiga

$$S_e = K_{carga} * K_{tamaño} * K_{superficie} * K_{temperatura} * K_{confianza} * K_{concentración\ de\ tensiones} * K_{otros} * S_{ut} \quad (2.1)$$

Tabla 1.5 factor de coeficiente de carga

Tipo de Carga	Kcarga
Flexión	1
Carga axial	0,7
Torsión	1

K carga=1 (Se toma valor de uno atendiendo a la flexión)

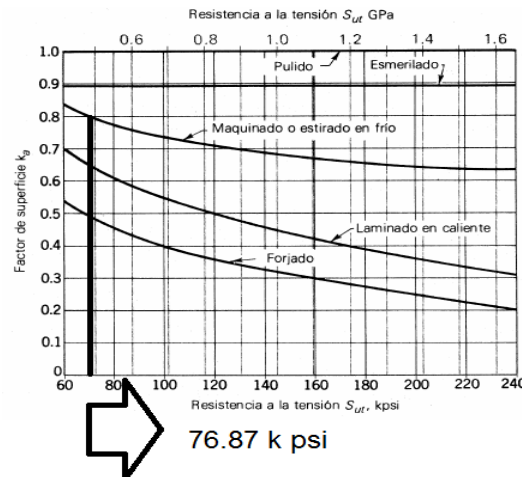
Tabla 1.6 factor de tamaño

Diámetro	K tamaño
$d \leq 8 \text{ mm}$	1
$8 \text{ mm} \leq d \leq 250 \text{ mm}$	$1,189 * d^{-0.097}$
$d \leq 250 \text{ mm}$	0,6

K tamaño=0.777

K superficie= 0.8

Fig. 1.14 Factor de Tabla 1.7. Coeficiente de



superficie  
temperatura

Temperatura (oC)	Kd
20	1,000
50	1,010
100	1,020
150	1,025
200	1,020
250	1,000
300	0,975



350	0,927
400	0,922
450	0,840
500	0,766
550	0,670
600	0,546

K temperatura = 1.0100C.

Tabla 2.8. Coeficientes de confianza o seguridad funcional

Confiabilidad (%)	Kc
90	0,897
95	0,868
99	0,814
99,9	0,753
99,99	0,702

K confianza= 0.897 Para un factor de confianza de 90%.

Coefficiente de concentrador de tensiones.

Figura 2 libro de problema de Resistencia de Materiales

Relación del radio de redondeo y diámetro menor

$$\frac{r}{d} = \frac{1}{80} = 0.0125$$

Donde corresponde un valor de  $\alpha=2$  atendiendo la relación del diámetro mayor sobre el diámetro menor obtenemos que es igual a 1.25

K concentración de tensiones= 2

Tabla 1.9. Factores que modifican el límite de resistencia a la fatiga

K carga	K tamaño	K superficie	K temperatura	K confianza	K concentración de tensiones
1	0.777	0.8	1.010	0.897	2

Límite de fatiga teórico

$$Set = 0.5 * \Gamma_{Mat}$$

$$Set = 0.5 * 360 \text{ MPa}$$

$$Set = 180 \text{ MPa.}$$

(2.2)

El límite de resistencia a la fatiga es[18],

$S_e = K_{\text{carga}} * K_{\text{tamaño}} * K_{\text{superficie}} * K_{\text{temperatura}} * K_{\text{confianza}} * K_{\text{conc. tens}} * S_{\text{et}}$   
 $S_e = 202 \text{ MPa}$ .

$$a = \frac{(0.9 * \Gamma_{\text{material}})^2}{S_e}$$

$$a = \frac{(0.9 * 360)^2}{202}$$

$$a = 519.68 \tag{2.3}$$

$$b = -\frac{1}{3} * \log \frac{0.9 * \Gamma_{\text{material}}}{S_e}$$

$$b = -\frac{1}{3} * \log \frac{0.9 * 360}{202}$$

$$b = -0.068 \tag{2.4}$$

Número de ciclos

$$N = \left( \frac{\gamma_{\text{Material}}}{a} \right)^{\frac{1}{b}}$$

$$N = \left( \frac{195.5 \text{ MPa}}{519.68 \text{ MPa}} \right)^{\frac{1}{-0.068}}$$

$$N = 1753716 \text{ Ciclos} . \tag{2.5}$$

Análisis cinemático del equipo en estudio

Datos

n1 (revoluciones del motor)	1440 rev/min
d1 (polea del motor)	78.75 mm
d2 (polea del reductor)	820 mm
u (relación de transmisión del reductor)	30

Ecuación

$$n_1 d_1 = n_2 d_2 \tag{2.6}$$

Aplicando la ecuación 2.5 y diámetros de las poleas, se obtiene el número de revoluciones en la entrada del reductor; que permite conocer con la relación de transmisión del reductor, el valor de salida en revoluciones por minuto.

$$n_2 = \frac{n_1 * d_1}{d_2}$$

$$n_2 = \frac{1440 \text{ rev / min} * 78.75 \text{ mm}}{820 \text{ mm}}$$

$$n_2 = 138.3 \text{ rev/min}$$

Ecuación para el cálculo de la salida del reductor

$$n_3 = \frac{138.3 \text{ rev/min}}{30} \quad (2.7)$$

$$n_3 = 4.61 \text{ rev/min}$$

Como forma de comprobación, se realiza mediciones en la bomba de varilla en cuanto al tiempo que demora el mecanismo biela-manivela en realizar un ciclo completo; obteniendo valores de trece segundos por ciclo completo.

Conociendo:

$$1 \text{ vuelta completa} = 13 \text{ s}$$

$$1 \text{ min} = 60 \text{ s}$$

$$\frac{60 \text{ s}}{13 \text{ s}} = 4.61 \text{ Ciclos por min}$$

$$\text{Para 1h} = 4.61 \text{ v} * 60 \text{ s} = 276.6 \text{ Ciclos}$$

$$\text{Para 8h} = 4.61 \text{ v} * 480 \text{ s} = 2212.8 \text{ Ciclos}$$

$$\text{Para 24h} = 4.61 * 1440 \text{ s} = 6638.4 \text{ Ciclos}$$

Estas bombas de varilla por lo general operan las veinticuatro horas del día, por lo que si tenemos un número de ciclos de 834253.54 y lo dividimos por la cantidad de vueltas de la unión biela-manivela para veinticuatro horas nos dará el resultado de la cantidad de días que va a soportar dicho eje, o sea:

$$\left( \frac{1753716.68}{6638.4 \text{ Ciclos}} \right) = 264 \text{ días}$$

$$125.67 \text{ días} / 30 = 8.8 \text{ meses.}$$

Teniendo en cuenta el análisis del comportamiento de las tensiones máximas que se generan en la chumacera de los pozos de extracción de la EPEP-C de la provincia de Matanzas y el análisis de fatiga realizado atendiendo el número de ciclos de trabajo se toma la decisión de proceder a un rediseño del elemento en estudio

#### 1.3.4 Etapa II: Procedimientos correspondiente al estudio experimental

En la práctica moderna se desarrollan los principios que gobiernan la experimentación eficiente y objetiva, así como las técnicas para la interpretación de los resultados que de ella se obtienen. Sólo son confiables aquellas informaciones que se obtienen bajo estas condiciones y se someten a la interpretación estadística. [15],

El presente epígrafe tiene como objetivo aplicar las herramientas estadísticas a un conjunto de datos correspondientes a un elemento mecánicos, que conforma el objeto de estudio de los pozos de extracción de EPEP-C de la Provincia de Matanzas

Para el diseño experimental y el procesamiento estadístico de los resultados, se hace uso del paquete estadístico Statgraphics [10], . En el cual se realiza según un diseño factorial completo (nk), mediante un análisis de superficie de respuesta.

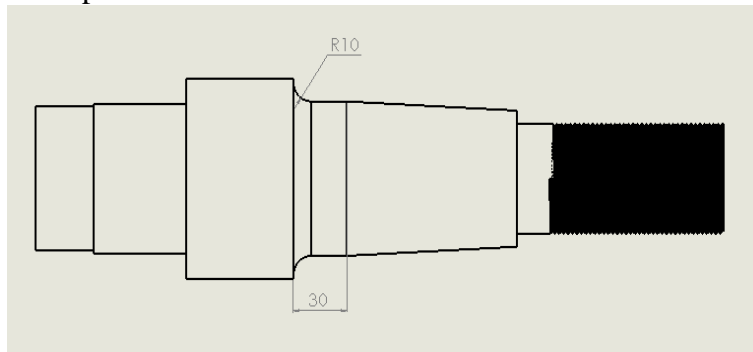
#### 1.3.5 Eje de la Chumacera

Para este sistema se realiza un diseño de experimento, donde interviene dos variables independientes y dos dependientes. Desarrollando un diseño factorial completo (nk), de

tres factores a dos niveles (32). Este tipo de diseño se preocupa por la curvatura en la función de respuesta; analizando valores máximo, mínimos e intermedios.

El empleo de un tercer nivel permite modelar con una relación cuadrática; la relación entre la respuesta y cada factor, que se analiza con el método de superficie de respuestas, considerando la mejor alternativas para estos tipos de diseño. [9], Se toma la decisión de realizar un corte en la zona de concentración de tensiones con el objetivo de disminuir los valores de tensiones o desplazarla a otra zona, que no represente peligro para el elemento.

Para realizar el diseño factorial completo se toman como variables independientes, la Longitud del corte y Radio de redondeo (Figura 1.15); con valores mínimo y máximo de (0-30) y (0-10) respectivamente. Y como variables dependientes, las tensiones en el escalón y las tensiones de la pieza en su conjunto. Esta alternativa, es con el propósito de monitorear las tensiones que se generan en la zona de rotura; sin desatender las tensiones de la pieza en su conjunto, donde se pueden obtener resultados satisfactorios en el diseño.



*Fig. 1.15. Eje de la Chumacera*

Establecido el máximo y el mínimo de las variables independientes hacemos uso del software Statgraphics, para obtener el diseño de experimento (Tabla 1.3). El análisis de cuatro variables independiente nos arroja 81 diseños de experimentos, donde se procede a obtener los valores correspondiente de esfuerzo y peso, mediante la simulación e incorporado al estudio de diseño.

*Tabla 1.10. Diseño de experimento del eje de la chumacera*

Número de Experimento	Longitud del Corte (mm)	Radio de redondeo (mm)	Esfuerzo de Escalón (MPa)	Esfuerzo en la Pieza (MPa)
1	-1	-1		
2	0	-1		
3	1	-1		
4	-1	0		
5	0	0		
6	1	0		
7	-1	1		
8	0	1		
9	1	1		

### 1.3.6 Análisis con Statgraphics

Una vez conocido los mínimos y máximo de las variables independientes, se introducen estos valores en el software estadístico, obteniendo las posibles variantes (Tabla 1.11), con nueve diseño de experimentos atendiendo a un diseño factorial completo 3<sup>2</sup>. [4],

Tabla 1.11. Valores mínimo y máximo de las variables independientes

	Longitud del Corte (mm)	Radio (mm)	Tensiones en la Pieza (MPa)	Tensiones en el escalón (MPa)
1	0,0	0,0		
2	15,0	0,0		
3	30,0	0,0		
4	0,0	5,0		
5	15,0	5,0		
6	30,0	5,0		
7	0,0	10,0		
8	15,0	10,0		
9	30,0	10,0		

Una vez obtenidos dichos valores, se procede a realizar la modelación y simulación del objeto de estudio, con el propósito de obtener los valores de las variables dependientes como, el esfuerzo en el escalón y en la pieza. Este análisis permite conocer las posibles variantes, que nos ofrece las variables independientes para realizar la futura modelación y simulación del elemento mecánico en estudio. [5;11].

Realizada la modelación y simulación de las diferentes alternativas de diseño, se obtienen valores favorables en cuanto al esfuerzo en la zona crítica (Tabla 2.12), los esfuerzos máximos de la pieza presentan un comportamiento curioso, de las tensiones máximas se ven desplazadas al otro escalón (Fig. 1.16) ocasionada por el aplastamiento, siendo este de menor peligro para la fatiga. Y la zona crítica se ve liberada de las tensiones máximas con un orden de los 103.7 MPa (Fig. 1.17). Estos resultados permiten conocer que es posible optimizar el Eje de la Chumacera modificando su geometría con el fin de prolongar su vida útil.

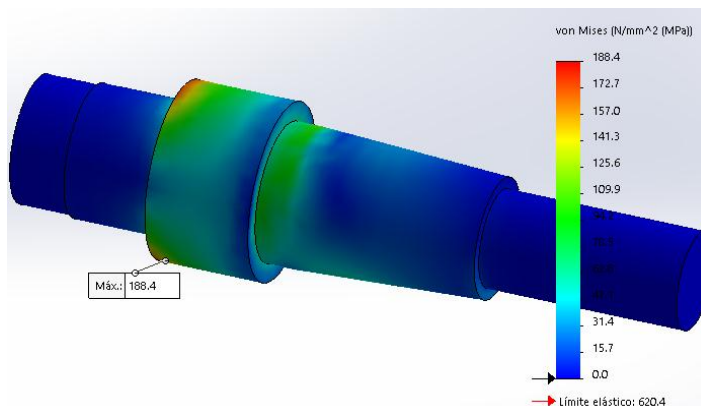


Fig. 1.16. Simulación con longitud 15 mm y radio cero

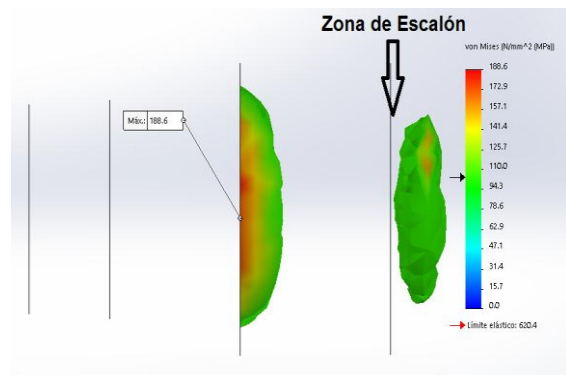


Fig. 1.17. Zona del Escalón

*Tabla 1.12. Diseño de experimento del eje de la chumacera valores obtenidos*

	Longitud del Corte (mm)	Radio (mm)	Tensiones en la Pieza (MPa)	Tensiones en el escalón (MPa)
1	0,0	0,0	195.5	195.5
2	15,0	0,0	188.4	103.7
3	30,0	0,0	210.5	110.0
4	0,0	5,0	330.8	330.8
5	15,0	5,0	189.9	121.3
6	30,0	5,0	208.6	187.0
7	0,0	10,0	182	130.0
8	15,0	10,0	197.5	197.5
9	30,0	10,0	211.2	110.0

### **1.3.7 Etapa III: Optimización del Eje de la Chumacera empleando SolidWorks**

Después de completar un análisis de tensión, se puede realizar un análisis de optimización para encontrar el valor óptimo para la cota de un modelo mientras cumple un criterio específico. Por ejemplo, puede encontrar la longitud óptima de una pieza de manera que las tensiones de Von Mises no excedan un valor especificado. El análisis de optimización es parte del estudio de diseño en SOLIDWORKS Simulación.

Especificamos valores para cada variable, como valores discretos o como un intervalo, utilizamos sensores como restricciones y objetivos. El software ejecuta iteraciones de los valores e informa la combinación óptima de valores para cumplir con su objetivo especificado.

Si bien el análisis lo ayuda a simular el ciclo de desarrollo del producto en la computadora de manera rápida y económica, es necesario crear varios estudios y simular muchos escenarios. Cada vez que se realice un cambio, se debe ejecutar el análisis y examinar los resultados.

Aún en un diseño relativamente simple, se pueden cambiar varias cotas. La decisión sobre qué combinaciones utilizar, la contabilidad asociada y la visualización de resultados puede resultar engorrosa.

El estudio de diseño saca provecho de los modelos basados en operaciones paramétricas, y de las capacidades de regeneración automáticas del software para automatizar el proceso de optimización. El software está equipado con una tecnología que permite detectar rápidamente tendencias e identifica la solución óptima en un número mínimo de ejecuciones. El programa utiliza un método basado en el Diseño de Experimentos. [3],

El programa ofrece dos cualidades diferentes en las propiedades del estudio de diseño. El software realiza un cierto número de pruebas en base al nivel de calidad y el número de variables. Para cada prueba, el programa ejecuta todos los estudios de simulación asociados con un conjunto de valores de variable determinados estratégicamente. La siguiente tabla

enumera una cantidad de iteraciones para los métodos de calidad alta y resultados rápidos para variables continuas (opción Intervalo). El programa utiliza el plan cuadrático Box-Behnken para la configuración calidad alta y el plan cuadrático Rechtschafner para la configuración resultados rápidos. A pesar de que el plan Rechtschafner realiza determinados cálculos previos que el diseño Box-Behnken no requiere, necesita menos experimentos para formar la función de respuesta y optimizar. [2],

Caso en estudio

Para el siguiente caso, que tiene como objetivo minimizar las tensiones de la zona de rotura (escalón) se tienen en cuenta dos variables independientes, radio de redondeo y longitud de corte (Tabla 2.13), y atendiendo al objetivo de optimizar (minimizar) la variable dependiente (tensiones en el escalón) (Tabla 2.14).

*Tabla 1.13. Variables de diseño*

Nombre	Tipo	Valor	Unidades
Radio de Redondeo	Intervalo con paso	Mín:0.1 Máx:10 Paso:5	mm
Longitud de Corte	Intervalo con paso	Mín:0.1 Máx:30 Paso:10	mm

*Tabla 1.14. Variable dependiente*

Nombre	Objetivo	Propiedades	Paso	Nombre del estudio
Tensión2	Minimizar	Tensión	10	Variante 1

Establecidos los parámetros de optimización y analizados por el software, se obtienen doce escenarios, atendiendo el paso fijado de las variables de diseño (Tabla 1.14). Donde se logra optimizar el eje de la chumacera con resultados positivos de las tensiones de Von Mises, con valor de 98MPa y factor de seguridad de 5.4, respectivamente alto para este tipo de elemento (Fig. 1.18 y 1.19).

*Tabla 1.15. Resultados del estudio*

Nombre del componente	Unidades	Actual	Inicial	Óptimo	Escenario1	Escenario2
Radio de Redondeo	mm	10	10	5.1	0.1	5.1
Longitud de corte	mm	30	30	20.1	0.1	0.1
Tensión de la pieza	N/mm <sup>2</sup>	181.92	181.92	98.0	-	160.14
Nombre del componente	Unidades	Escenario 3	Escenario 4	Escenario5	Escenario6	Escenario7
Radio de Redondeo	mm	10	0.1	5.1	10	0.1

Longitud de corte	mm	0.1	10.1	10.1	10.1	20.1
Tensión2	N/mm <sup>2</sup>	-	176.68	208.8	161.47	172.87
Nombre del componente	Unidades	Escenario 8	Escenario 9	Escenario10	Escenario11	Escenario12
Radio de Redondeo	mm	5.1	10	0.1	5.1	10
Longitud de corte	mm	20.1	20.1	30	30	30
Tensión2	N/mm <sup>2</sup>	98.0	172.16	173.94	170.7	181.92

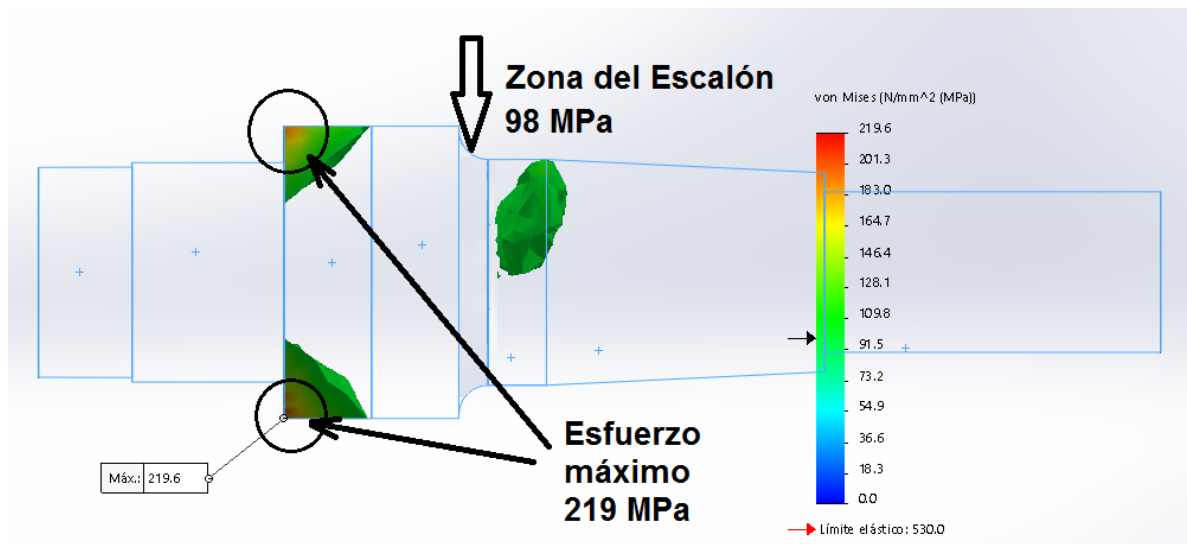


Fig. 1.18. Simulación con el óptimo

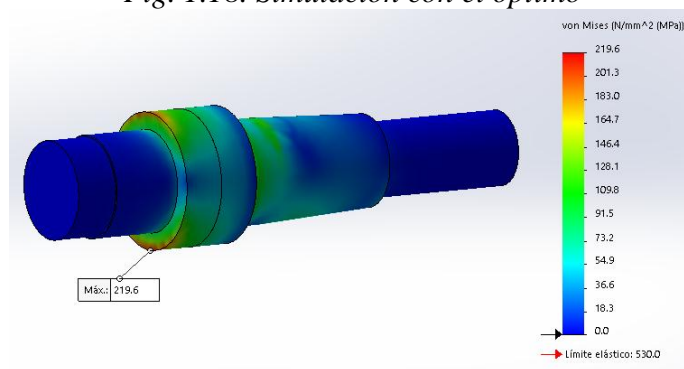


Fig. 1.19. Simulación con el óptimo3D

### 1.3.8 Análisis de fatiga de la chumacera atendiendo al Óptimo

Datos:



d= 80 mm (Diámetro menor)

D= 100 mm (Diámetro mayor)

R= 5.1 mm (Radio de redondeo)

$\gamma_{\text{material}} = 530 \text{ Mpa}$ .

Límite de resistencia a la fatiga

$Se = K_{\text{carga}} * K_{\text{tamaño}} * K_{\text{superficie}} * K_{\text{temperatura}} * K_{\text{confianza}} * K_{\text{concentración de tensiones}} * K_{\text{otros}} * Set$

$K_{\text{carga}} = 1$  (tabla 1.5)

$K_{\text{tamaño}} = 0.777$  (tabla 1.6)

$K_{\text{superficie}} = 0.8$  (Figura 2.13)

$K_{\text{temperatura}} = 1.0100$  (tabla 2.7)

$K_{\text{confianza}} = 0.897$  (tabla 2.8)

Coefficiente de concentrador de tensiones.

Figura 2 libro de problema de Resistencia de Materiales

Relación del radio de redondeo y diámetro menor

$$\frac{r}{d} = \frac{5.1}{80} = 0.063$$

Donde corresponde un valor de  $\alpha = 1.5$  atendiendo la relación del diámetro mayor sobre el diámetro menor obtenemos que es igual a 1.25

$K_{\text{concentración de tensiones}} = 1.5$

Tabla 1.16. Factores que modifican el límite de resistencia a la fatiga (caso óptimo)

K carga	K tamaño	K superficie	K temperatura	K confianza	K concentración de tensiones
1	0.777	0.8	1.010	0.897	1.5

Límite de fatiga teórico (Ecuación 2.2)

$$Set = 0.5 * \Gamma_{\text{Mat}}$$

$$Set = 0.5 * 360 \text{ MPa}$$

$$Set = 180 \text{ MPa}$$

Ecuación 2.1

$$Se = K_{\text{carga}} * K_{\text{tamaño}} * K_{\text{superficie}} * K_{\text{temperatura}} * K_{\text{confianza}} * K_{\text{conc.}} * tens * Set$$

$$Se = 1 * 0.777 * 0.8 * 1.010 * 0.897 * 1.7 * 180$$

$$Se = 152.05$$

Ecuación 2.3

$$a = \frac{(0.9 * \Gamma_{material})^2}{Se}$$

$$a = \frac{(0.9 * 360)^2}{152.05}$$

$$a = 690.4$$

Ecuación 2.4

$$b = -\frac{1}{3} * \log \frac{0.9 * \Gamma_{material}}{Se}$$

$$b = -\frac{1}{3} * \log \frac{0.9 * 360}{162.18}$$

$$b = -0.109$$

Número de ciclos (Ecuación 2.5)

$$N = \left( \frac{\gamma_{Material}}{a} \right)^{\frac{1}{b}}$$

$$N = \left( \frac{98MPa}{690.4MPa} \right)^{\frac{1}{-0.109}}$$

$$N = 60071300 \text{ Ciclos.}$$

Estas bombas de varilla por lo general operan las veinticuatro horas del día, por lo que si tenemos un número de ciclos de 60071300 y lo dividimos por la cantidad de vueltas de la unión biela-manivela para veinticuatro horas nos dará el resultado de la cantidad de días que va a soportar dicho eje, o sea:

$$\left( \frac{60071300 \text{ Ciclos}}{6638.4 \text{ Ciclos}} \right) = 9049.06 \text{ días}$$

$$9049.06 \text{ días} / 30 = 301.63 \text{ meses.}$$

El nuevo diseño garantiza una vida útil del eje de la chumacera de 25.13 años, sin que ocurra la rotura por fatiga en la zona del escalón.

## 2. Análisis de los resultados

El presente epigrafe tiene como objetivo el análisis de los resultados, atendiendo el seguimiento de las etapas propuesta en el capítulo 2, según la concepción desarrollada para los procedimientos de cada etapa.

### 2.1 Etapa I: Resultados correspondientes a la Modelación y Simulación

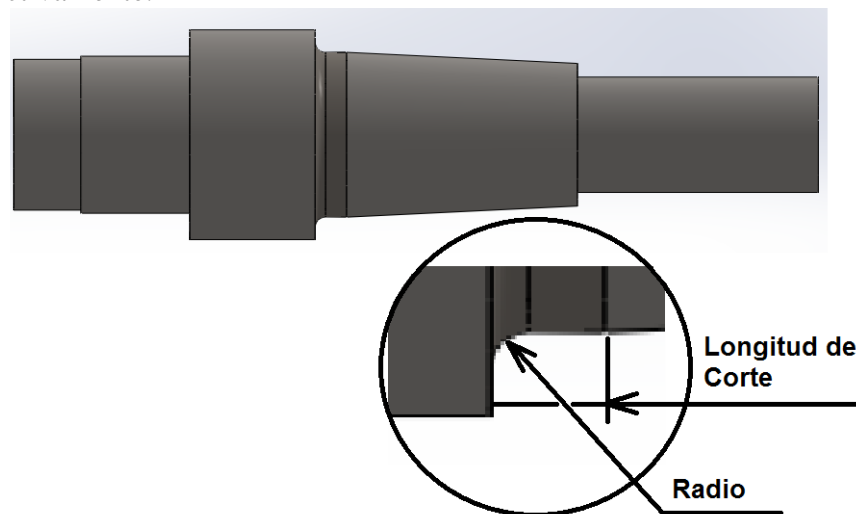
Para la evaluación de un diseño es importante el proceso de modelación, que permite visualizar la idea conceptual en un elemento tridimensional. El software SolidWorks está

equipado de las herramientas necesarias para elaborar piezas y ensamblajes; permitiendo realizar la simulación del sistema en estudio.

En el proceso de simulación del pasador se obtuvieron resultados de tensiones equivalentes en el orden de los 194.8 MPa en la zona del escalón, provocando la rotura de la pieza por fatiga. Tras este análisis se realizó tres variantes de simulaciones incorporando radio de redondeo en la zona de rotura (Tabla. 2.4) donde los resultados no fueron favorables con el incremento de las tensiones, superando el valor admisible del material.

Tras este análisis se despreció la posible incorporación de un radio de redondeo en la zona crítica, del objeto en estudio. Y despreciando la posibilidad de dar solución de forma simple al problema de rotura del eje de la chumacera. Esta situación problemática requiere de soluciones más complejas, sobre el enfoque de un proceso de optimización, evaluando variables de diseño.

Atendiendo la zona crítica (Escalón) se tomó la tarea de obtener variables independientes o de diseño, que tras su modificación logre disminuir las tensiones en dicha zona, logrando un diseño que cumpla con las perspectivas de funcionamiento de los pozos de extracción de petróleo. Para este análisis se realizó diferente variantes de comprobación; arrojando dos variables posibles de optimizar como son la longitud de corte y el radio de redondeo de la zona del escalón (Fig. 3.1) estableciendo valores mínimo y máximo en el orden de (0-30) y (0-10) respectivamente.



*Fig. 2.1. Escalón del eje, variable de diseño.*

Establecidas las variables independientes, mínimas y máximas, se procedió al empleo de Statgraphics, software estadístico que permite conocer las posibles variantes que nos puede arrojar dichas variables de diseño.

## 2.2. Etapa II: Procedimientos correspondientes al estudio experimental

Se hizo uso del software Statgraphics con el objetivo de obtener las posibles combinaciones de las variables independiente, para modelar y simular dichas variantes con el propósito de poder evaluar los resultados correspondiente de las tensiones de la pieza y en la zona del escalón (Tabla 2.1).

*Tabla 2.1. Variantes de diseños de experimentos*

Número de diseños de experimentos	Tensiones en la Pieza (MPa)	Tensiones en el escalón (MPa)
1	195.5	195.5
2	188.4	103.7
3	210.5	110.0
4	330.8	330.8
5	189.9	121.3
6	208.6	187.0
7	182	130.0
8	197.5	197.5
9	211.2	110.0

Esta evaluación de las tensiones en las diferentes zonas de la pieza en estudio, ratifico la posibilidad de obtener un diseño que garantice un funcionamiento óptimo del equipo en cuestión. Donde las tensiones máximas de la pieza se desplazan a otra zona, liberando las tensiones máximas del punto de rotura del eje de la chumacera. Se obtienen mediante la modelación y simulación de los diferentes experimentos en el orden de los 103.7 MPa en la zona del escalón y 188.4 MPa máximo en la pieza en su conjunto; logrando desplazar estas tensiones máximas a otra zona que no presenta problema con la rotura del elemento en estudio. Estos resultados se obtienen en el diseño de experimento número dos.

### **2.3. Etapa III: Optimización del Eje de la Chumacera empleando SolidWorks**

El proceso de optimización se realiza mediante un estudio de diseño, que permite realizar el proceso de optimización. El software realiza un cierto número de pruebas en base al nivel de calidad y el número de variables. Para cada prueba, el programa ejecuta todos los estudios de Simulación asociados a un conjunto de valores de variable determinados estratégicamente, utilizando para su desarrollo el plan cuadrático Box-Behnken para la configuración Calidad alta, donde se obtienen resultados confiables.

En el estudio de diseño, para la obtención de los valores óptimos de las variables independientes se realizó el análisis atendiendo a doce escenario, en función al paso otorgado para dada una de las variables en estudio; conteniendo los siguientes resultados (tabla 2.2)

*Tabla 2.2. Valores óptimos*

Nombre del componente	Unidades	Óptimo
Radio de Redondeo	mm	5.1
Longitud de corte	mm	20.1
Tensión2	MPa	98.0

## 2.4. Modelación del óptimo

Una vez obtenido el óptimo de la pieza lo que trae consigo es realizar la modelación y simulación correspondiente. Para este caso el software está equipado con herramientas que permiten una vez identificado el diseño óptimo el solo lo modifica en los parámetros correspondiente y lo simula nuevamente, ofreciendo los siguientes resultados.

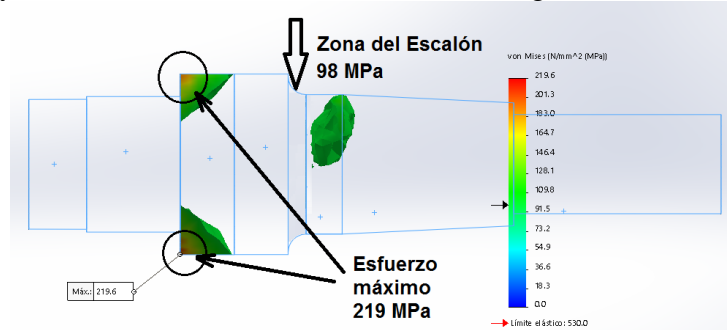


Fig. 2.2. Simulación con el óptimo

98 MPa para la zona del escalón y 219 MPa máximo en la pieza; logrando disminuir los valores de la zona crítica de la pieza, donde ocurría la rotura de forma sistemática.

El proceso de optimización logró obtener los siguientes resultados, en cuanto a su diseño inicial (tabla 2.3)

Tabla 2.3. Análisis comparativo de los resultados obtenidos

Variantes	Pieza inicial Tensión (MPa)	Pieza optimizada Tensión (MPa)	Diferencia
Zona del Escalón	194.8	98	96.8
Pieza total	194.8	219.6	-24.8
Número de Ciclos	1753716	60071300	-58317584
Duración en años	0.73	25.13	-24.4

## 2.5 Análisis de los resultados de fatiga

En el desarrollo del presente trabajo se realizó un análisis de fatiga atendiendo la pieza inicial y la optimizada, donde se logra identificar el tiempo de duración para el eje de la chumacera en una jornada continua de 24 horas.

Para la pieza inicial se obtienen resultados de 8.8 meses, tiempo que coincide con el real comunicado por los trabajadores de la empresa del petróleo. Y en el segundo análisis realizado a fatiga de la pieza optimizada se logra obtener valores satisfactorios con resultados de 24.4 años sin que ocurra la rotura del eje por la acción de la fatiga (Tabla 2.3)

## 2.6 Análisis económico

Atendiendo el criterio de especialistas de la EPEP-C de la provincia de Matanzas de los resultados entregados de gastos de reparación y gastos de rotura del eje de la chumacera adquirimos el resultado de cada una de estas reparaciones, teniendo un monto de 79 389.12 CUP, estas roturas suceden anualmente en un porcentaje elevado de estos equipos de extracción de petróleo. Gracias a la realización de este trabajo de diploma se pudo obtener el resultado de que dicho eje tenga una vida máxima de 24.4 años, atendiendo al número de ciclos soportados por el material AISI 1045, con respecto al número de ciclos realizados en

un período de 24 horas, donde se logra minimizar los gastos por concepto de rotura con un valor de 1825949.76 CUP.

*Tabla 2.4. Análisis de los precios en un período de 24 años*

Piezas	Gastos de Reparación (CUP)	
	Período de 1 año	Período de 24 años
Pieza Inicial	79389.12	1905338.88
Pieza Optimizada	_____	79389.12
Ahorro en cuanto a gasto de reparación		-1825949.76

## Conclusiones

Se logró minimizar las tensiones en el escalón de 194.5 MPa a 98 MPa; incrementando su vida útil con un valor de 24.4 años , disminuyendo los gastos de reparación por conceptos de rotura.

## Recomendaciones

Se recomienda implementar el nuevo diseño en los pozos de petróleo de la EPEP-C de la provincia de Matanzas con el objetivo de aumentar su vida de uso y minimizar las paradas no deseadas y gastos por concepto de reparación.

## Bibliografía



---

*CD Monografías 2018*  
(c) 2018, Universidad de Matanzas  
ISBN: 978-959-16-4235-6

1. ALONSO, H. R. Diseño de Máquina Universidad Carlos III de Madrid, 2008. ---. Diseño Mecánico - Proceso de Diseño MADRID, U. C. I. D., 2011. 28.
2. CASTELLANO, A. A. C. Aplicación de algoritmos de optimización multiobjetivo en el diseño Wankel para modelismos.: Facultad de Ingeniería Físico Mecánica., Universidad Industrial de Santander 2008. p.
3. DEKKER, P. V. R. D. A. B. R. I. E. Empirical evaluation methods for multiobjective reinforcement learning algorithms, 2010: 80.
4. DEVEAUX, D. y W. COLLEGE Elements of Experimental Design 2001: 222.
5. FERDINAND P. BEER, E. R. J., JR. JOHN T. DEWOLF, DAVID F. MAXUREK Mechanics of Materials Avenue of the Americas, New York, NY 10020., 2012, (ISBN 978-0-07-338028-5): 839.
6. GAS., I. A. D. P. Y. E. REQUISITOS BÁSICOS PARA EL MONTAJE Y MANTENIMIENTO DE APARATOS INDIVIDUALES DE BOMBEO (AIB), 2011: 15.
7. GOLENKO, A. Fundamentals of Machine Design. 2010. 175 p.
8. LOCK, R. STATGRAPHICS XVI Manual de usuario, StatPoint Technologies, Inc., 2010. [Disponible en: MONTGOMERY, D. C. Design and Analysis of Experiments 2001a. 699 p.
9. Diseño y Análisis de Experimentos Edición original, en inglés publicada por John Wiley & Sons, Im. 2001b. 591 p.
10. MYSZKA, D. H. Machines and Mechanisms. New Jersey, 2012. p.
11. R. SUNDMACHER, A. K., WILEY. Design of Experiments in Chemical Engineering. 2004. 522 p.
12. REY, D. G. G. Apuntes sobre nociones de diseño de transmisiones mecánicas, 2007,
13. RICO, J. E. F. GESTIÓN DEL DISEÑO MECÁNICO, 2013.
14. RICHAR G. BUDYNAS , J. K. N. "Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley". Octava Edición. 2008. p. ISBN-13: 978-970-10-6404-7.
15. SAMPIERI, C. R. H.; D. C. F. COLLADO, et al. Metodología de la Investigación McGRAW - HILL INTERAMERICANA DE MÉXICO, S.A. de C.V., 1997. 107 p.
16. SKAKOON, J. G. The elements of Mechanical Design. 2008. 13 p.