

## REDISEÑO DE UN MONTANTE PARA CELDA DE PRUEBAS DE TURBINA DE AVIÓN

Cesar Fernando Olivares García, Joaquín Pérez Meneses  
Departamento de Metal-Mecánica, Instituto Tecnológico de Querétaro  
Av. Tecnológico S/N Esquina Gral. M. Escobedo, Centro Histórico, CP. 76000, Querétaro, Qro.  
Teléfono (442) 227 4400 Ext. 4421. Fax: 216 9931.  
[cefogster@gmail.com](mailto:cefogster@gmail.com), [jperezm@itq.edu.mx](mailto:jperezm@itq.edu.mx)

### RESUMEN

Se presenta el rediseño de un banco de pruebas para dos tipos distintos de serie de una turbina de gas JT8D de Pratt & Whitney; este proyecto se realizó por la necesidad de ITR de contar con otro banco de pruebas que pudiera soportar estos dos tipos de motores. Se propuso un diseño de montante, el cual utilizó CATIA para hacer el dibujo paramétrico y ANSYS para el análisis de elemento finito. Se construyó el montante con base en el diseño presentado y se realizaron las pruebas experimentales colocando las dos diferentes series turbinas sobre el montante, los resultados fueron satisfactorios tanto en la carga estática como en operación. Adicionalmente se efectuó el análisis económico en éste el resultado mostró que el costo del montante propuesto fue inferior al que se ofrece en el mercado. Se concluyó que el rediseño del montante fue adecuado para su funcionamiento, cumpliéndose el objetivo de la empresa de contar con un banco con mayores ventajas.

### ABSTRACT

The Structural Analysis of a mounting system was numerically made by using the Finite Element Method (FEM). This mounting system must support two kinds of turbofan engines; the Pratt & Whitney JT8D-STD series and also P&W JT8D-200 series. The JT8D-200 engine has 23% more thrust, is 30% heavier and its fan is 23% longer than the JT8D-STD engine. The final geometry, the materials to use and the welding was determined by this analysis. The aim of this article is to describe the process followed to make the FEM analysis.

### NOMENCLATURA

- Finite Element Analysis (FEA). Análisis de elemento finito, se refiere al análisis que se realizará al modelo con malla y condiciones de frontera.
- Condiciones de Frontera (BC's). Condiciones externas a las que está sometida la pieza, tales como: temperatura, fuerzas y restricciones de movimiento.
- Caso Último. El peor escenario de fuerzas y BC's aplicadas a la pieza; simula un empuje axial de 25 000 lb y el torque al que estaría sometido si se frenara en un segundo.
- Caso Límite. Escenario que simula las máximas operaciones de trabajo registradas en ITR más 10%, y el torque al que estaría sometida la pieza si el motor se frenara en tres segundos.
- JT8D-STD. Familia de motores de P&W que cubren el rango de empuje de 14,000-17,400 lb; diámetro de fan de 39.9 in; longitud promedio de 120 in.
- JT8D-200. Familia de motores de P&W que cubren el rango de empuje de 18,500-21,700 lb, diámetro de fan de 49.2 in, longitud promedio de 154 in.
- Transient analysis Un análisis transitorio resuelve diferentes pasos de carga (loadstep) de un mismo modulo. Un loadstep es simplemente una configuración de cargas y restricciones cuya solución se obtendrá. En un análisis estático lineal o análisis de estado estático, se pueden utilizar diferentes loadsteps para aplicar diferentes arreglos de cargas.

### INTRODUCCIÓN

El presente rediseño del montante se efectuó en Turborreactores S.A. de C.V. (ITR), empresa que actualmente lleva a cabo la reparación motores JT8D en sus series *Standard* y *200* para la aviación de transporte comercial de pasajeros y de carga (líneas aéreas, líneas chárter, empresas de carga y organismos gubernamentales).

El motor JT8D Standard tiene un empuje máximo de 16560 lb con un peso total de 3500 lb. Una versión más moderna de este motor es la serie 200, el cual tiene un empuje máximo de 20 430 lb con un peso total de 5600 lb.

En la Figura 1 se muestran los dos tipos de motores que cargará el montante propuesto.



Fig. 1 Motores JT8D.

Actualmente ITR repara más motores JT8D-200 que JT8D-Standard (aproximadamente 70% de los motores que llegan al taller son JT8D-200). Todos los motores que ingresan a las instalaciones de ITR después de ser reparados son sometidos a una larga serie de severas pruebas que simulan ciclos de trabajo iguales a los que éstos motores tienen en servicio; se presta especial atención al trabajo del motor en su máxima capacidad. Ambos son probados en la misma celda de pruebas (actualmente sólo se cuenta con un montante para el motor serie 200 y uno para el Standard) provocando un cuello de botella en el proceso de reparación.

Por lo anterior, se propuso el rediseño del banco de pruebas del motor JT8D-STD, de tal manera que también pudiera soportar las pruebas del motor JT8D-200. Este rediseño debía ser manufacturado completamente en ITR, además de tener un precio más barato que un nuevo montante completo (aproximadamente 250 000 dólares).

Para el rediseño se debían cumplir las siguientes consideraciones: el nuevo montante debía ser capaz de sujetar al motor JT8D en sus series Standard y 200; debía permitir que el cambio de una configuración a otra fuera fácil y rápido, y que utilizará el menor número de partes móviles. Para el funcionamiento máximo (Caso Limite) no debían existir deformaciones permanentes en la pieza ni en sus componentes, tales como tornillos o soldaduras. Para el funcionamiento último (Caso Ultimo) el material y sus componentes o soldaduras no debían fallar, es decir, no podían romperse aunque pudieran tener deformaciones permanentes.

#### DESCRIPCIÓN DEL MONTANTE

El banco de pruebas es la estructura que sujeta al motor (Figura 2), está constituido por perfiles de acero rectangulares; tiene tres montantes, dos delanteros y uno trasero, que sujetan el motor al banco de pruebas.



Fig. 2 Banco de pruebas.

En la Figura 3 se aprecia con más detalle el montante delantero original del banco de pruebas que será reemplazado posteriormente. Éste cuenta con una placa superior sujeta directamente al banco, a esta placa superior se le incorporan dos escuadras o cartabones que tienen el ángulo exacto para que el montante pueda sujetarse al motor; al final de estos cartabones se encuentra la base de la almohadilla cuya función es unirla con el resto del montante; ésta absorbe las vibraciones ya que su interior está diseñado a base de caucho.

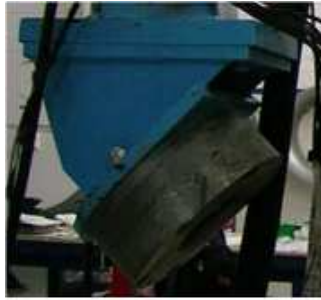


Fig. 3 Montante original del banco de pruebas.

Parámetro importante para el rediseño del nuevo montante fue que ambos motores utilizarán el mismo modelo de almohadilla. Ésta se adquirirá directamente con parte de Pratt & Whitney y, por lo tanto, no entra en el proyecto.

#### ANÁLISIS ESTRUCTURAL

Se aplicaron dos tipos de condiciones de frontera sobre el modelo del banco, las cuales son:

- **Restricciones de desplazamiento.** Se restringe el movimiento de la estructura apeándose así a la forma de sujeción que tiene en el banco de pruebas.
- **Fuerzas.** Las fuerzas aplicadas sobre la estructura se obtuvieron mediante el cálculo de las reacciones originadas por las condiciones de operación del motor en los puntos donde se sujeta el motor al banco de pruebas. Las Figuras 4 y 5 muestran los diagramas de cuerpo libre del motor, el punto de aplicación de las fuerzas y momentos (centro del gravedad del motor), además las reacciones en los montantes (puntos de sujeción del motor).

Los puntos A y B representan los montantes delanteros.

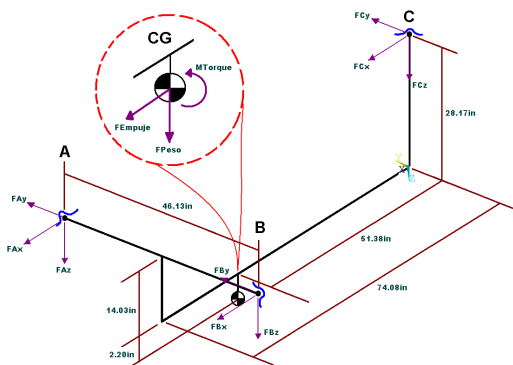


Fig. 4 Diagrama de cuerpo libre para el motor JT8D-219.

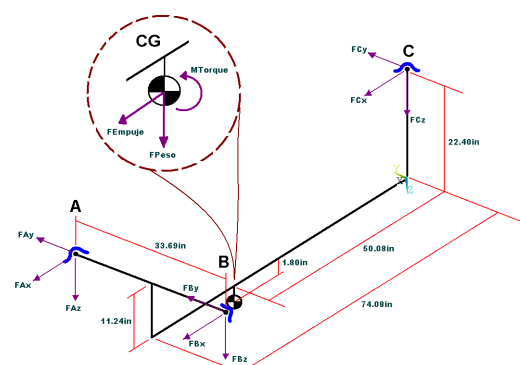


Fig. 5 Diagrama de cuerpo libre para el motor JT8D-STD.

Para el rediseño de las condiciones de frontera de la última:

- La *carga límite* representa el máximo empuje jamás registrado en celdas de prueba para cualquiera de ambos motores más 10%.
- La *carga última* representa un torque provocado por paró en seco con un empuje de 25 000 lb para la serie 200 y de 23 000 lb para la serie STD.

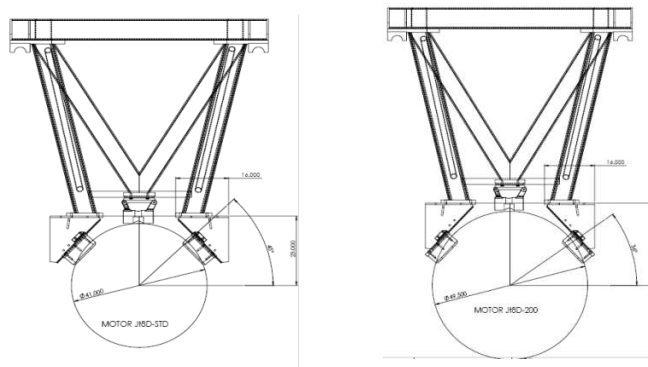
Se evaluaron cuatro casos de carga diferentes. Las reacciones calculadas y las fuerzas de trabajo se presentan en la Tabla 1 (Para los puntos A y B).

**Tabla 1. Reacciones en los montantes del banco de pruebas.**

POSICION	DIRECCION	CARGAS POSICION JT8D-STD		CARGAS POSICION JT8D-200	
		LIMITE (LBS)	ULTIMA (LBS)	LIMITE (LBS)	ULTIMA (LBS)
CG	FX (EMPUJE)	18400	23000	22700	25000
	FZ (PESO)	3500	3500	5070	5600
	MX (TORQUE)	-32461 lb*in	-108230 lb*in	-60070 lb*in	-200233 lb*in
A	FX	8396	10495	10401	11455
	FY	0	0	0	0
	FZ	-1298	-3927	-1875	-5450
B	FX	8396	10495	10401	11455
	FY	0	0	0	0
	FZ	630	2500	729	4200

Se considera que toda la estructura está a temperatura ambiente.

Una vez que se calcularon las reacciones en cada montante, se propuso un nuevo montante que cumpliera con los requerimientos geométricos necesarios para que la estructura pudiera cargar ambos motores, el diagrama del montante propuesto se puede ver en la Figura 6.



**Fig. 6 Diagrama del montante propuesto al cargar los dos tipos de motores.**

El dibujo del montante y el banco de pruebas se hicieron en CATIA, posteriormente se analizaron mediante el método de elemento finito con ANSYS.

Para realizar el análisis estructural del montante y el rediseño del mismo se siguió el siguiente proceso:

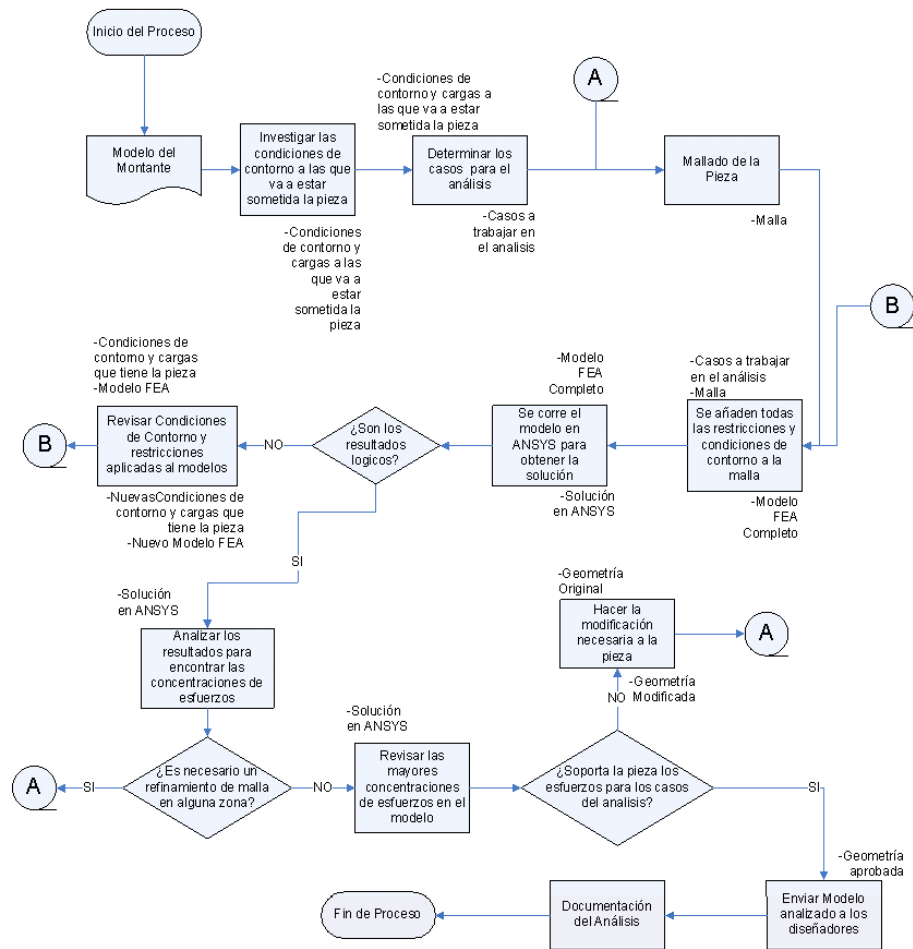
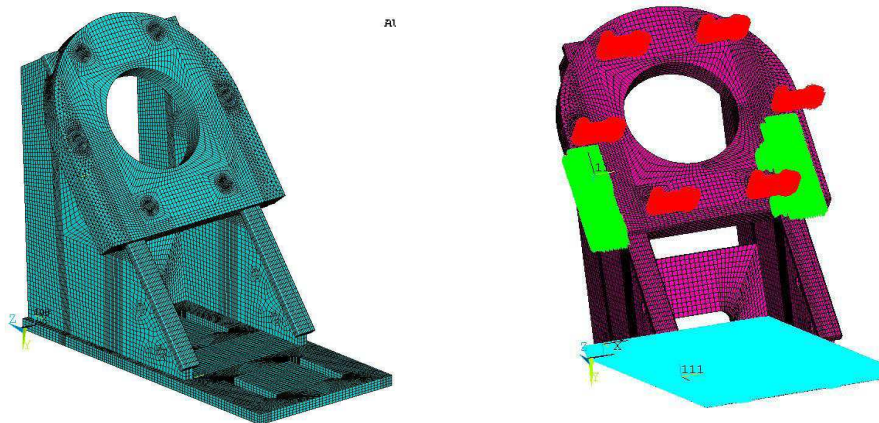


Fig. 7 Mapa de proceso del análisis.

El modelo se malló con elementos hexaédricos de 20 nodos, los grados de libertad de éste elemento son 3  $U_x$ ,  $U_y$  y  $U_z$ . A continuación se presenta el modelo mallado.



**Fig. 8 Malla del modelo propuesto sin y con BC's.**

Las caras del modelo se mallaron de para obtener elementos cuadrados regulares en las caras de los rieles y parte del cartabón, así como una malla de volúmenes hexaédricos regulares; esto nos permitió tener un mejor control sobre la malla, especialmente en los puntos de concentración de esfuerzos, donde se aseguro que no hubieran sido afectados estos productos por un cambio brusco en el tamaño de malla. El soporte superior, la placa base y las placas laterales fueron malladas libremente, únicamente se cuidó el tamaño de los elementos y la transición de la malla libre con la mapeada o regular, de tal manera que ésta no estuviera en zonas de concentración de estrés y que provocara resultados no confiables.

Para simular los tornillos que sujetan el soporte superior y las placas laterales con los cartabones se utilizaron *couple points* (CP's) y para simular el contacto entre los cartabones y la placa superior se utilizaron *contact pairs*. Para simular cómo se sujetaría el montante al banco de pruebas se utilizaron restricciones de movimiento en la cara superior de la placa base, restricciones en dirección Y en toda la superficie y restricciones también en todos sentidos ( $U_x, U_y, U_z$ ) en donde estarían los tornillos.

Los materiales y especificaciones se muestran en la Tabla 2 se puede ver que el Módulo de Young característico del material utilizado es de 29 700 ksi o 2.97 Mpsi, un coeficiente de Poisson de 0.29 y una densidad de 0.284 lb/in<sup>3</sup>. El cambio más importante en estos materiales es su límite de esfuerzo a la cedencia y el límite último; por ésta razón las propiedades definidas en el modelo serán las mismas. Posteriormente se elegirá el material con base en el esfuerzo al que el modelo se someterá. Esta información se obtuvo de forma experimental en ITR.

Tabla 2. Propiedades de los materiales utilizados en el diseño del montante y análisis estructural.

	SAE 1018		AISI 4140 Recocado		AISI 4140 Templado enfriado en aceite		AISI 8620 Sin tratamiento		ASTM A514	
	Metric	English	Metric	English	Metric	English	Metric	English	Metric	English
<b>Physical Properties</b>										
Density	7.87 g/cc	0.284 lb/in <sup>3</sup>	7.85 g/cc	0.284 lb/in <sup>3</sup>	7.85 g/cc	0.284 lb/in <sup>3</sup>	7.85 g/cc	0.284 lb/in <sup>3</sup>	7.87 g/cc	0.284 lb/in <sup>3</sup>
<b>Mechanical Properties</b>										
Hardness, Brinell	126	126	197	197	341	341	149	149	264	264
Hardness, Knoop	145	145	219	219	369	369	169	169	289	289
Hardness, Rockwell B	71	71	92	92	99	99	80	80	98	98
Hardness, Rockwell C	-	-	13	13	37	37	-	-	26	26
Hardness, Vickers	131	131	207	207	361	361	155	155	278	278
Tensile Strength, Ultimate	440 MPa	63800 psi	655 MPa	95000 psi	1185 MPa	172000 psi	530 MPa	76900 psi	628 MPa	120000 psi
Tensile Strength, Yield	370 MPa	53700 psi	415 MPa	60200 psi	1110 MPa	161000 psi	385 MPa	55800 psi	690 MPa	100000 psi
Elongation at Break	15 %	15 %	25.7 %	25.7 %	15.4 %	15.4 %	31 %	31 %	18 %	18 %
Reduction of Area	40 %	40 %	56.9 %	56.9 %	55.7 %	55.7 %	31 %	31 %	40 %	40 %
Modulus of Elasticity	205 GPa	29700 ksi	205 GPa	29700 ksi	205 GPa	29700 ksi	205 GPa	29700 ksi	205 GPa	29700 ksi
Bulk Modulus	140 GPa	20300 ksi	140 GPa	20300 ksi	140 GPa	20300 ksi	140 GPa	20300 ksi	140 GPa	20300 ksi
Poisson's Ratio	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29
Machinability	70 %	70 %	65 %	65 %	65 %	65 %	65 %	65 %	70 %	70 %
Shear Modulus	80 GPa	11600 ksi	80 GPa	11600 ksi	80 GPa	11600 ksi	80 GPa	11600 ksi	80 GPa	11600 ksi
<b>Thermal Properties</b>										
Specific Heat Capacity	0.486 J/g-°C	0.116 BTU/lb-°F	0.473 J/g-°C	0.113 BTU/lb-°F	0.473 J/g-°C	0.113 BTU/lb-°F	0.475 J/g-°C	0.114 BTU/lb-°F	0.452 J/g-°C	0.108 BTU/lb-°F
Thermal Conductivity	51.9 W/m-K	360 BTU-in/hr-ft <sup>2</sup> -°F	42.6 W/m-K	296 BTU-in/hr-ft <sup>2</sup> -°F	42.6 W/m-K	296 BTU-in/hr-ft <sup>2</sup> -°F	46.6 W/m-K	323 BTU-in/hr-ft <sup>2</sup> -°F	46.6 W/m-K	323 BTU-in/hr-ft <sup>2</sup> -°F

El análisis en ANSYS fue del tipo *transient*, lo cual facilitó la solución debido a que con un mismo modelo podían solucionarse los cuatro casos diferentes para cada modelo del motor, esto permitió ahorrar tiempo de cómputo.

## RESULTADOS

Se analizan los resultados obtenidos de la primera malla. Los resultados de mayor interés en nuestro estudio son: el esfuerzo principal  $\sigma_1$  o S1 (Figura 9) por nomenclatura de ANSYS; el esfuerzo  $\sigma_3$  o S3, ya que en éste se presentan las compresiones más grandes; y, finalmente, las tres direcciones de los esfuerzos  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  y  $\sigma_z$ .

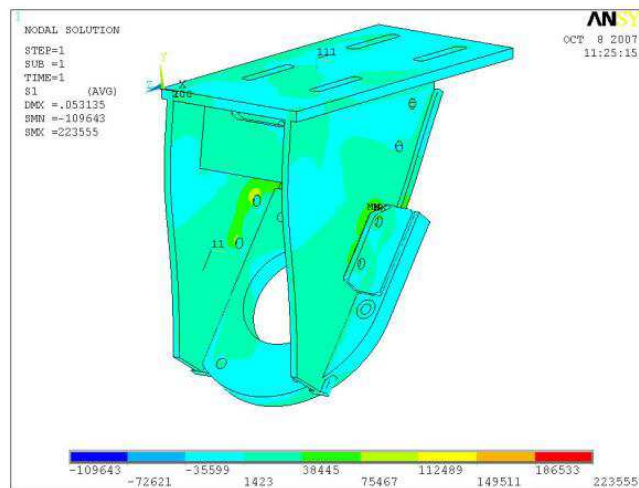


Fig. 9 Esfuerzos principales.

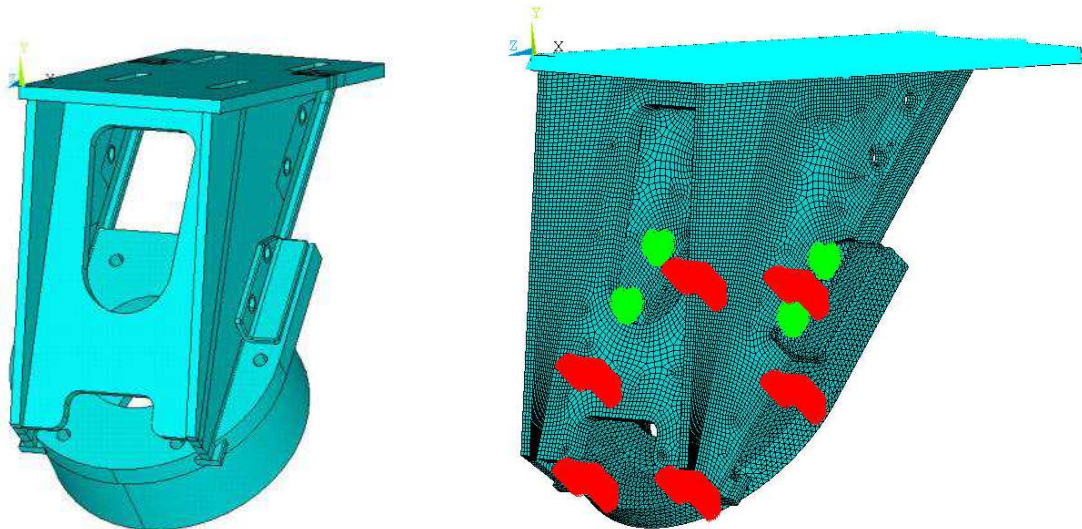
En la figura 9 se presenta el primer esfuerzo principal en el montante rediseñado, en la tabla 3 se observan los esfuerzos máximos que se obtuvieron del análisis de elemento finito en el primer montante propuesto.

**Tabla 3. Esfuerzos máximos en el montante modelado en ANSYS.**

Esfuerzo	S1	Sx	Sy	Sz	S3
Valor	223 555 psi	116 463 psi	136 035 psi	111781 psi	-205855 psi

Se puede observar que los valores de dichos esfuerzos son muy altos, el primer esfuerzo principal es de 223 555 psi, este valor sobrepasa por mucho el esfuerzo último de los materiales propuestos. Por ésta razón se decidió hacer cambios a la geometría con el propósito de reducir concentraciones de esfuerzos.

En la figura 10 se muestran los cambios realizados a la geometría del modelo: la placa trasera se alargó con el fin de darle mayor rigidez estructural, esta placa recorre toda la longitud de los cartabones. Aunado a esto no se dejó ningún vértice recto para evitar concentraciones de esfuerzos por cambios de sección. Con el fin de dar más rigidez estructural, los rieles sobre los cuales corre la placa de la almohadilla también fueron alargados para que se unieran con la placa superior. El resto del modelo se dejó igual.



**Fig. 10 Modelo final del montante rediseñado y su respectivo MEF.**

Los resultados para este último modelo son los siguientes:



**Resultados JT8D-STD**

Tabla Motor JT8D-Estándar				
Fuerza	Ultimate Loads		Limit Loads	
	Caso 1 (lb)	Caso 2 (lb)	Caso 1 (lb)	Caso 2 (lb)
Fx	-11,455.30	-11,455.30	-8,396.10	-8,396.10
Fy	5,450.10	-4,199.70	1,297.00	-629.00

Tabla STD-Ult Loads Caso 1					
Nodo	S1 (ksi)	Sx (ksi)	Sy (ksi)	Sz (ksi)	Factor de Seguridad
596458	74.635	-9.022	-35.07	50	1.61

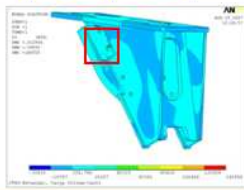


Tabla STD- Ult Loads Caso 2					
Nodo	S1 (ksi)	Sx (ksi)	Sy (ksi)	Sz (ksi)	Factor de Seguridad
599154	84.4	18.5	70	-42	1.42

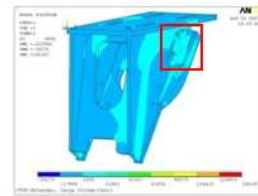


Tabla STD-Lim Loads Caso 1					
Nodo	S1 (ksi)	Sx (ksi)	Sy (ksi)	Sz (ksi)	Factor de Seguridad
56948	50.137	15.24	-16.374	42.448	1.99

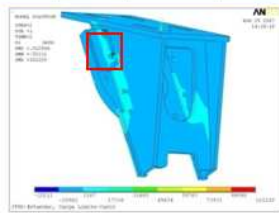


Tabla STD-Lim Loads Caso 2					
Nodo	S1 (ksi)	Sx (ksi)	Sy (ksi)	Sz (ksi)	Factor de Seguridad
599154	60.1	-8.21	47	-54.4	1.66

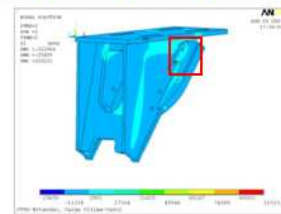


Fig. 11 Esfuerzos para el montante soportando al motor JT&D-STD.

En las Figuras 11 y 12 se muestran los resultados del análisis estructural efectuado con la ayuda del paquete comercial ANSYS. Se puede observar que los esfuerzos obtenidos son inferiores a los esfuerzos del material seleccionado (acero ASTM A514) cuyo esfuerzo último (*Ultimate stress*) es de 120 000 psi y un punto de cedencia (*Yield point*) de 100 000 psi.

En la Figura 13 se muestra el primer esfuerzo principal del modelo para la configuración STD, la cual presenta los mayores esfuerzos, se pueden observar esfuerzos de 81 370 psi en una zona donde existe una soldadura (esos esfuerzos son provocados por las mismas restricciones en ANSYS, se conocen como esfuerzos virtuales o inducidos y no son tomados en cuenta para el rediseño). Se hizo un corte en esta zona (Figura 14) para ver cuánto penetraba el esfuerzo y se pudo determinar que el esfuerzo se encontraba en la superficie; por lo tanto se busco elegir una soldadura que pudiera soportar un esfuerzo tan grande. La soldadura seleccionada para el modelo fue la UTP 6020 con un punto de cedencia de 96 450 psi y un esfuerzo último de 110 953 psi.

**Resultados JT8D-200**

Tabla Motor JT8D-200				
Fuerza	Ultimate Loads (lb)		Limit Loads (lb)	
	Caso 1	Caso 2	Caso 1	Caso 2
Fx	-11,455.30	-11,455.30	-10,401.50	-10,401.50
Fy	5,450.10	-4,199.70	1,875.00	-729.40

Tabla 200-UR Loads Caso 1					
Nodo	S1 (ksi)	Sx (ksi)	Sy (ksi)	Sz (ksi)	Factor de Seguridad
35211	74.427	30.178	16.331	49.814	1.61

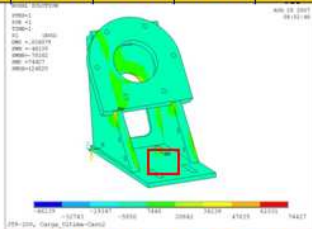


Tabla 200-UR Loads Caso 2					
Nodo	S1 (ksi)	Sx (ksi)	Sy (ksi)	Sz (ksi)	Factor de Seguridad
35211	74.408	30.255	16.35	49.784	1.34

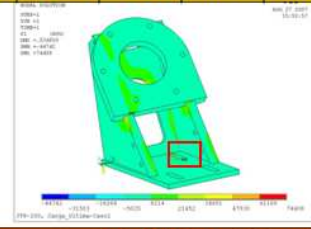


Tabla 200-Lim Loads Caso 1					
Nodo	S1 (ksi)	Sx (ksi)	Sy (ksi)	Sz (ksi)	Factor de Seguridad
355211	67.707	27.471	14.861	45.314	1.48

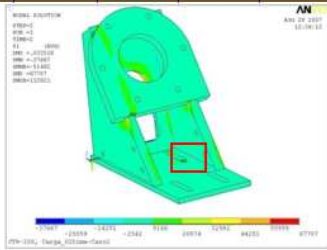


Tabla 200-Lim Loads Caso 2					
Nodo	S1 (ksi)	Sx (ksi)	Sy (ksi)	Sz (ksi)	Factor de Seguridad
355211	67.74	27.509	14.876	45.332	1.48

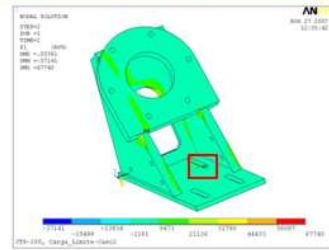


Fig. 12 Esfuerzos para el montante soportando al motor JT&D-200.

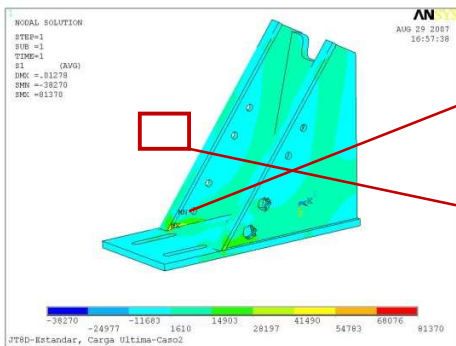


Fig. 13 Primer esfuerzo principal del modelo en configuración STD.

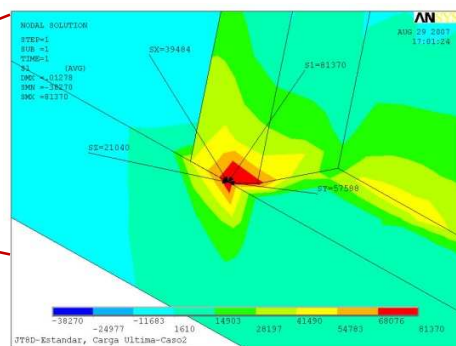
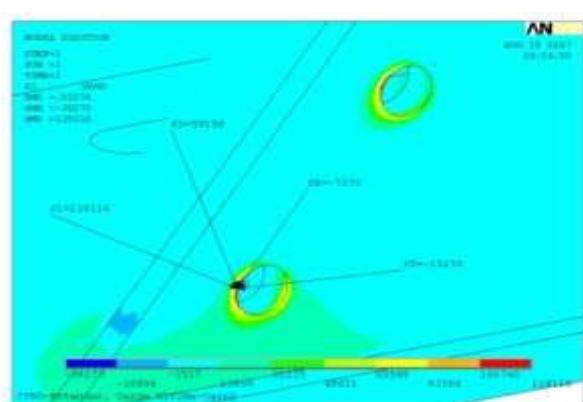


Fig. 14 Corte del modelo en concentración del primer esfuerzo principal del modelo en configuración STD.

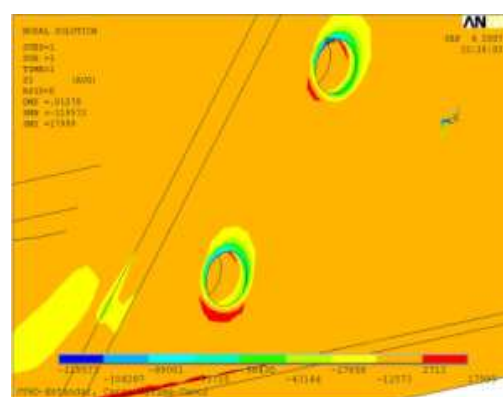
Se hicieron probetas para realizar pruebas al acero y a la soldadura en los laboratorios de CIDESI y se encontró que el esfuerzo último de la probeta soldada fue de 111 680 psi, lo cual demostró las propiedades mecánicas de los materiales seleccionados.

Los cambios de sección son concentradores importantes de esfuerzos, en el montante hay cuatro barrenos a lo largo de cada uno de los cartabones, en estos barrenos irán tornillos que sujetarán el soporte superior de la almohadilla. En las Figuras 15 y 16 se presentan el primer y el tercer esfuerzo principal respectivamente, los valores de éstos son altos y aunque en parte aumentaron por las restricciones que definieron al modelo, se deben elegir tornillos con gran resistencia, por ésta razón se decidieron utilizar tornillos J429 grado 8 con un punto de cedencia de 130 000 psi y una resistencia última de 150 000 psi.

En la Figura 16 se puede ver el montante rediseñado.



**Fig. 15** Primer esfuerzo principal del modelo en configuración STD en barrenos.



**Fig. 16** Tercer esfuerzo principal del modelo en configuración STD en barrenos.



**Fig. 17** Montante rediseñado final.

En la Figura 18 se presenta el motor de la turbina en operación en el banco de pruebas y los montantes rediseñados en uso.

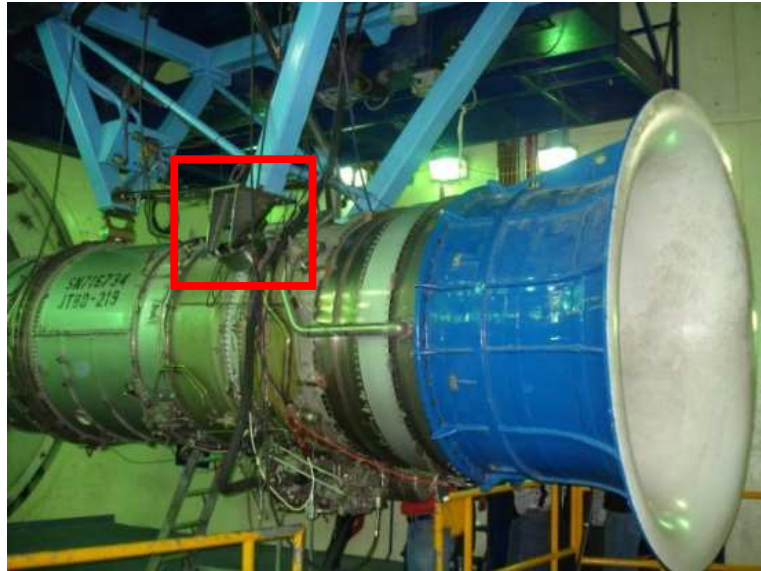


Fig. 18 Montante rediseñado cargando motor JT8D-200.

## CONCLUSIONES

Los resultados de los análisis realizados al montante muestran que nuestra pieza soporta sin problemas los objetivos de diseño propuestos, siendo el factor de seguridad más bajo de 1.34 para el Caso Último 2 para el motor JT8D-200. Para los casos límites, el factor de seguridad más bajo es de 1.48 para el Caso Límite 2 para el motor JT8D-200. Por lo tanto, se puede determinar que esta estructura es segura para sujetar al motor JT8D, en sus series estándar y 200.

Para el funcionamiento máximo (Caso Límite), no existen deformaciones permanentes en la pieza ni en sus componentes, tales como tornillos o soldaduras. Para el funcionamiento último (Caso Ultimo) teóricamente ni el material ni sus componentes o soldaduras fallan. Por lo tanto cumple con el objetivo propuesto para el diseño.

Este montante se manufacturó dentro de las instalaciones de ITR, se probó en operación soportando los dos tipos de motores y su funcionamiento fue exitoso. Esto permitió ahorrar a la compañía más de 200 000 dólares al evitar la compra de un montante nuevo. Por ésta razón el proyecto fue galardonado con el “Premio al Proyecto del Año 2007” por parte de ITR.

## REFERENCIAS

- [1] Beer F., Johnston R., “Mecánica vectorial para ingenieros: Estática”, McGraw-Hill, México, 1997.
- [2] Chandrupatla T., Belegundu A., “Introducción al estudio del elemento finito en ingeniería”, Prentice Hall, México, 1999.
- [3] Hibbeler R.C., “Mecánica de Materiales”, CECSA, México, 1995.
- [4] Mori M., “The Finite element method and its applications”, Macmillan Publishing Company, Nueva York, 1983.
- [5] Oñate E., “Cálculo del Estructuras por Método de Elementos Finitos”, Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, Barcelona, 1992.
- [6] Popov E., Nagarajan S., “Mecánica de Materiales”, Limusa, México, 1982.
- [7] Robinson J., “Integrated Theory of Finite Element Methods”, John Wiley & Sons, Bristol, 1973.
- [8] Segerlind L., “Applied Finite Element Analysis”, John Wiley & Sons, San Francisco, 1976.
- [9] Young W., Budynas R., “Roark’s Formulas for Stress and Strain”, McGraw-Hill, s/l, 2002.
- [10] Ansys Release 9.0 Documentation, ANSYS Inc., 2004.