



Sede “Carlos Rafael Rodríguez”

**Facultad de Ingeniería
Colectivo de Mecánica Aplicada**

Trabajo de Diploma

**Análisis de las averías y rediseño del
semieje superior de los Calentadores de
Aire Regenerativo (CAR) de la C.T.E**

“Carlos Manuel de Céspedes”

Autor: Ariel Cogollos Izaguirre

Tutores: Dr.C. Rafael Goytisoló Espinosa

Dr.C. Juan B. Cogollo Martínez

Ing. Alan Hidalgo Fonseca

**Junio 2015
“Año 57 de la Revolución”**

Dedicatoria



A mi papá por ser mi ejemplo, mi guía y sobre todo por ser mi principal motivación durante toda la carrera.

A mi mamá por su amor infinito y por su dedicación durante toda mi vida.

A mi abuela Nita, que aunque no está presente, siempre va a vivir en mi corazón.

A Ana Margarita por estar siempre a mi lado, por ser incondicional y por llenar mi vida de momentos maravillosos.

Agradecimientos



A la Revolución.

A mis tutores Goytizolo, Alan y por supuesto mi papá por ser mis guías durante la investigación, por su valiosa contribución y por todo el tiempo dedicado.

A mis amigos por los innumerables momentos que hemos compartido juntos y por estar presente siempre en mi vida.

A mis suegros Betty y Rovira por ser haberme apoyado cuando lo he necesitado y por acogerme en su familia como un hijo.

A mis profesores por contribuir día a día en mi crecimiento profesional.

A Ana por regalarme los cinco años más felices de mi vida y por estar siempre pendiente de todos los detalles.

A mis padres por ser los mejores del mundo, a ustedes no tengo palabras para agradecerles todo lo que han hecho de mí, los quiero.

A todos.....

Muchas Gracias

Resumen



Resumen

La presente investigación se desarrolla en la Central Termoeléctrica de Cienfuegos (CTE) “Carlos Manuel de Céspedes”, con el objetivo general de determinar las causas de las averías de los semiejes superiores de los Calentadores de Aire Regenerativo (CAR) y rediseñar dichos semiejes para evitar tales averías.

En el transcurso del estudio se demuestra que la causa es por fatiga debido a la flexión unilateral con concentrador periférico y considerable sobrecarga cíclica. La presencia de un cordón de soldadura en esa zona, la excentricidad que le provoca el desbalance del peso de los cestos debido al deterioro desigual provocado por la corrosión y erosión de estos ocasionado por la acción de los gases de la combustión y el campo no estacionario de temperaturas que se establece en el CAR como consecuencia de su funcionamiento, favorecen a que la falla sea por fatiga. Finalmente se diseña un nuevo semieje superior con una resistencia a la fatiga que garantice un periodo de explotación mayor sin fallar.

Palabras claves: semieje, fatiga, excentricidad, Calentador de Aire Regenerativo, campo de temperatura.

Summary



Summary

Summary

This research takes place in the Thermal Power Plant of Cienfuegos "Carlos Manuel de Cespedes", with the overall aim of determining the causes of the failures of the upper axle shafts of Regenerative Air Heaters and redesign it to prevent such damage.

During the study conclusively it shows that the cause is a unilateral bending fatigue and peripheral hub significant cyclical overload. The presence of a weld in that area, that causes the eccentric weight imbalance due to uneven baskets damage by corrosion and erosion of these caused by the action of combustion gases and the field non - stationary temperature that is set in the CAR as a result of operation, becomes even more likely to fatigue failure. Finally a new upper axle shaft with a much greater resistance to fatigue is design.

Keywords: axle shaft, fatigue, eccentricity, regenerative air heater, temperature field.

Índice



| | |
|---|----|
| Índice | |
| Resumen | 7 |
| Summary | 9 |
| Introducción | 8 |
| Capítulo I: Calentadores de Aire Regenerativos | 10 |
| 1.1 Introducción al Capítulo..... | 10 |
| 1.2 Principio de Funcionamiento de los calentadores de aire regenerativos..... | 10 |
| 1.2.1 Estructura de los calentadores de aire regenerativos rotativos | 10 |
| 1.2.2 Descripción del funcionamiento del calentador de aire Ljungstrom | 13 |
| 1.2.3 Inconvenientes de los calentadores de aire Ljungstrom | 14 |
| 1.3 Caracterización de los Calentadores de Aire Regenerativos empleados en la CTE “Carlos M. de Céspedes”..... | 16 |
| 1.4 Modelación matemática del funcionamiento de los CAR. | 20 |
| 1.4.1 Campo de temperaturas en el CAR | 21 |
| 1.4.2 Ecuaciones para el cálculo del campo de temperaturas..... | 22 |
| 1.4.3 Análisis de resultados | 25 |
| 1.5 Conclusiones parciales..... | 28 |
| Capítulo II: Determinación de las causas del fallo del semieje superior del CAR. | 29 |
| 2.1 Análisis de las roturas | 29 |
| 2.1.1 Análisis químico y mecánico del semieje superior..... | 30 |
| 2.2 Determinación de la fuerza que produce el fallo del semieje del CAR | 31 |
| 2.3 Cálculo de la excentricidad del CAR que provoca la fractura del semieje..... | 35 |
| 2.4 Cálculo de la vida residual del semieje superior del CAR en las condiciones del diseño original, utilizando la Mecánica de la Fractura..... | 37 |
| 2.5 Conclusiones parciales..... | 51 |
| Capítulo III: Rediseño del semieje superior del CAR y pronóstico de la vida por fatiga del semieje rediseñado..... | 52 |

Índice

| | |
|---|----|
| 3.1 Mejoramiento de la resistencia a la fatiga del semieje | 52 |
| 3.2 Cálculo de las cargas que provocarían la fractura por fatiga en las nuevas condiciones y de la excentricidad del CAR para que esto ocurra. | 53 |
| 3.3 Cálculo de la vida residual del semieje superior del CAR a partir de la Mecánica de la fractura. | 54 |
| 3.4 Cálculo del factor de seguridad a la fatiga del árbol con la carga inicial que provocó la fractura en las dos secciones ahora peligrosas. | 56 |
| 3.5 Conclusiones parciales..... | 57 |
| Conclusiones Generales..... | 58 |
| Recomendaciones..... | 59 |
| Bibliografía..... | 60 |
| Anexo 1 Análisis de regresión..... | 63 |
| Anexo 2: Plano del semieje superior del Car de la unidad CMC 3. | 69 |
| Anexo 3: Conjunto de rodamiento y soporte del semieje superior del Car de la unidad CMC 3. | 70 |
| Anexo 4: Partes Calentador del Aire Regenerativo Ljungström..... | 71 |
| Anexo 5: Plano de los cestos del CAR..... | 72 |
| Anexo 6: Vista real del semieje superior del CAR de la unidad CMC 3..... | 73 |
| Anexo 7: Vista real del Car de la unidad CMC 3. | 74 |

Introducción



Introducción

En la industria eléctrica con la finalidad de mantener un rendimiento térmico eficiente se utiliza el aprovechamiento energético y uno de estos es la energía calórica latente contenida en los gases provenientes de la combustión de la caldera, los gases al salir de esta pasan por el Calentador de Aire Regenerativo (CAR) con el objetivo de aumentar la temperatura del aire que se envía al horno y se mezcla con el combustible. Aprovechando así parte del calor contenido en los humos antes que éstos lleguen a la chimenea. Por ello la cantidad de combustible necesaria para producir energía se reduce y la eficiencia de la caldera se mejora entre un 5 y un 10 %. El uso del aire precalentado para la combustión acelera la ignición y fomenta una combustión rápida y completa del combustible.

Cada calentador consta de un rotor que gira dentro del estator, que está soportado por sendas bancadas: superior e inferior, en esta última se aloja el rodamiento axial que soporta el mayor peso del equipo. Al rotor se atornillan los dos semiejes: inferior y superior. El semieje de la sección inferior nunca ha tenido averías, sin embargo el de la sección superior ha tenido varias a lo largo de la vida en operación de estos equipos. Estos se fracturan por motivos desconocidos y se recuperan soldando una espiga nueva en la zona del rodamiento.

Los elementos de intercambio de calor (cestos), se cambian por nuevos fabricados por la Empresa de Mantenimiento de Centrales Eléctricas (EMCE) en los mantenimientos parciales, estos no cuentan con la misma masa y los tabiques quedaban sin balancear, esta pudiera ser la causa de las averías; no obstante no existen estudios anteriores que definan cual debe ser la magnitud del desbalance máximo para garantizar que el semieje superior tenga el mayor tiempo medio entre fallos.

En esto radica la esencia de la situación problemática de la investigación.

Problema científico

¿Cuál es la causa de las averías de los semiejes superiores del CAR?

¿Es posible rediseñar los semiejes y evitar las averías?

Introducción

Hipótesis:

Se plantea como Hipótesis que la causa de la avería es por fatiga, debido a la excentricidad que le provoca el desbalance del peso de los cestos producto del deterioro desigual provocado por la corrosión y erosión de estos, ocasionado por la acción de los gases de la combustión y el campo no estacionario de temperaturas que se establece en el CAR como consecuencia de su funcionamiento. Si el sistema estuviera perfectamente balanceado en el rodamiento del semieje superior no podrían aparecer cargas radiales y por lo tanto la fractura por flexión sería completamente imposible.

Objetivo General:

Determinar las causas de las averías de los semiejes superiores de los CAR de la CTE Carlos Manuel de Céspedes de Cienfuegos y rediseñar dichos semiejes para evitar tales averías.

Objetivos específicos:

1. Caracterizar los Calentadores de Aire Regenerativos, su estructura partes componentes y funcionamiento.
2. Determinar la influencia del campo de temperaturas en la durabilidad de los cestos.
3. Analizar las roturas ocurridas en los semiejes superiores en la CTE, evaluar la posición donde ocurren y el aspecto externo de la fractura.
4. Evaluar, partiendo de las propiedades mecánicas del material, los concentradores de tensiones en la zona de fractura, el estado de la superficie y el momento flector en función de la distancia del centro del cojinete superior de doble hilera autoalineante a la sección de falla: y determinar: ¿Cuál es la excentricidad mínima que provocaría la falla por fatiga?
5. Rediseñar el semieje superior que garantice un mayor tiempo de trabajo sin fallos.

Capítulo I



Capítulo I: Calentadores de Aire Regenerativos

1.1 Introducción al Capítulo

En este capítulo se estudia la bibliografía sobre los Calentadores de Aire Regenerativos, profundizando en su funcionamiento y características constructivas, así como modelos matemáticos que simulan su funcionamiento.

1.2 Principio de Funcionamiento de los calentadores de aire regenerativos.

1.2.1 Estructura de los calentadores de aire regenerativos rotativos

Los calentadores de aire son intercambiadores de calor de tipo regenerativo con movimiento del fluido a contracorriente, se clasifican en dos tipos que son conocidos por el nombre de sus respectivos creadores: Rothemühle y Ljungström. Ambos constan de una cesta que se expone alternativamente al flujo de aire caliente y al flujo de aire frío, en el Rothemühle la cesta es fija y se mueven los conductos de aire y en el Ljungstrom es la cesta quien gira exponiéndose a uno y otro flujo. Es decir, en el Rothemühle, el aire se calienta a medida que fluye a través de la canasta, que ha obtenido la energía térmica de los gases de escape como se muestra en la Figura 1.1 en Ljungstrom, Figura 1.2, la parte de la cesta expuesta a los gases calientes absorbe calor y luego se lo cede al aire frío.

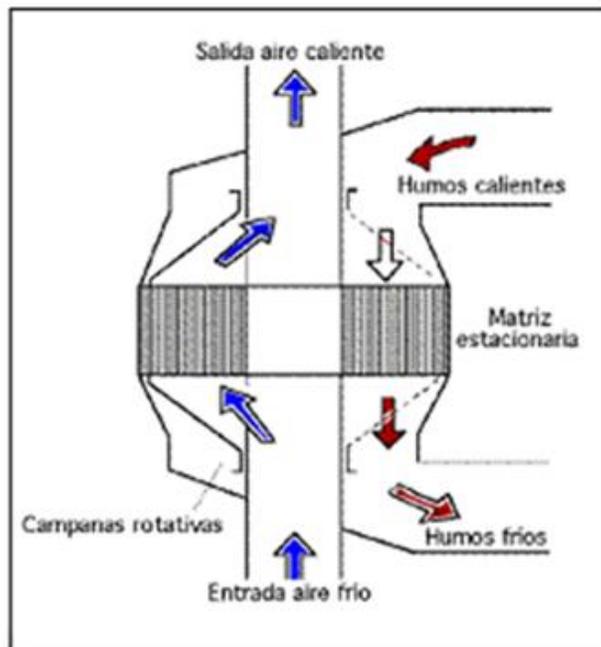


Figura 1.1 Calentador de Aire Regenerativo Rothemühle. Fuente: Fundamentals of heat exchanger design. (2011).

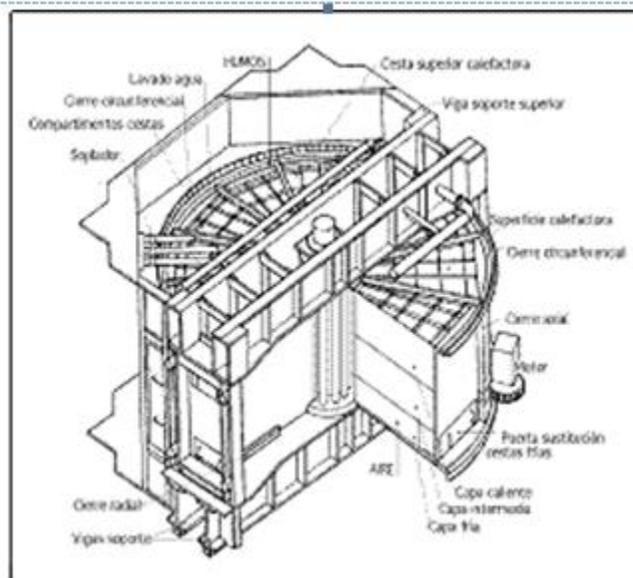


Figura 1.2 Calentador de Aire Regenerativo Ljungström. Fuente: **Fundamentals of heat exchanger design, (2011).**

El Ljungstrom fue inventado en la década de 1920. En contraste con los calentadores de aire recuperativos, el calor no se transfiere a través de una pared o de una placa o de un tubo, sino que es absorbido y cedido por la misma superficie. Muchos avances en calderas de vapor han representado un mejor rendimiento y menor consumo de combustible, pero pocos han sido tan notables o se han adoptado tan rápido como el Calentador de Aire Regenerativo Ljungström, donde la primera instalación garantizó un ahorro de un 25 % del consumo de combustible. El rotor gira de 1 a 3 revoluciones por minuto, dentro de este se encuentra la masa acumuladora, la cual está compuesta por una serie de cestas. Cada una de estas cestas contiene una serie de láminas que conforman la masa acumuladora que está conformada de tres conjuntos armados en forma cilíndrica. Estas se denominan chapas de calefacción, que además establece dos grupos de configuración de perfiles. A continuación se describen dichos grupos:

- Configuraciones abiertas o estándares Figura 1.3, los cuales se pueden utilizar donde se requiere una relación óptima entre la capacidad calorífica y las pérdidas de carga; de este grupo de configuraciones se tienen dos tipos, los mismos se mencionan a continuación:
 - Configuración de perfiles DU.
 - Configuración de perfiles CU.

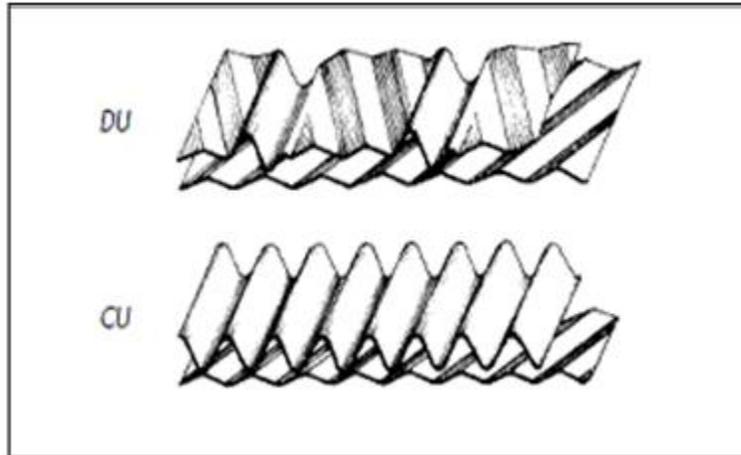


Figura 1.3 Configuraciones de perfiles de los tipos abiertos o estándares. Fuente: Tomado del Manual O &M Borsig (1976).

- Configuraciones cerradas o especiales Figura 1.4, estas configuraciones no tienen puntos de cruce, por lo tanto se pueden utilizar en sistemas donde la limpieza de los residuos de combustibles es problemática, para este grupo de configuraciones se tienen tres tipos, las mismas se mencionan a continuación:
 - Configuración de perfiles NF, esta se emplea sólo en la zona fría del calentador, debido a su deficiente capacidad calorífica.
 - Configuración de perfiles UNF, esta se emplea en las zonas fría y caliente del calentador, su capacidad calorífica no difiere mucho de la configuración CU.
 - Configuración de perfiles CF, esta se emplea en las zonas fría y caliente.

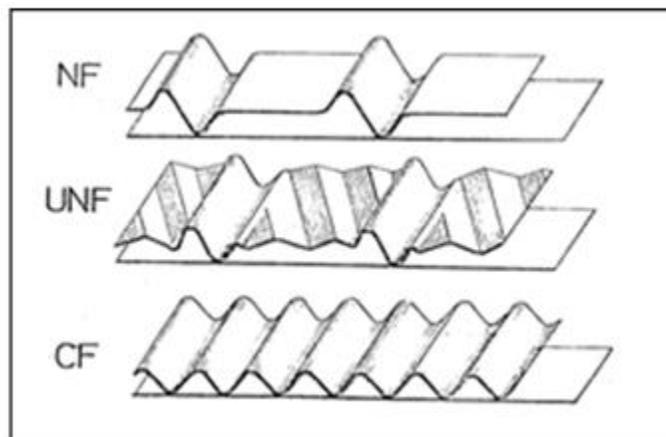


Figura 1.4 Configuraciones de perfiles de los tipos cerrados o especiales. Fuente: Tomado del Manual O&MBorsig (1976).

Otra parte importante del intercambiador de calor Ljungstrom es el sistema de juntas cuya función es evitar la mezcla del aire con los gases de combustión. Este sistema se compone de juntas radiales y de envoltura, las cuales pueden ser ajustadas a la anchura óptima de intersticio desde el exterior durante la marcha.

1.2.2 Descripción del funcionamiento del calentador de aire Ljungstrom

El proceso se inicia cuando el aire del ambiente a una temperatura de 38 °C es introducido al sistema por los Ventiladores de Tiro Forzado (VTF) y es llevado por medio de los ductos a los Calentadores de Aire por Condensado (CAC), los cuales son intercambiadores de calor que utilizan la energía calorífica del condensado del vapor generado por la unidad, lo cual permite que el aire del ambiente adquiera una temperatura aproximada de 80 °C, de allí el aire pasa a los Calentadores de Aire a Vapor (CAV), los cuales son intercambiadores de calor que utilizan la energía calorífica del vapor generado por la caldera, lo cual permite que el aire eleve su temperatura a unos 140 °C y luego sea conducido a los calentadores de aire regenerativo Ljungström, ver Figura 1.5.

El giro del rotor es el que genera ciclos continuos e interrumpidos de intercambio de calor entre los fluidos involucrados y los metales de la masa acumuladora, puesto que los gases de combustión que provienen de la caldera, ingresan al Ljungstrom con una temperatura aproximada de 371°C, estos intercambian calor con las cestas de la masa acumuladora que se encuentran en su trayectoria de salida y fueron enfriadas al entrar en contacto con el aire, mientras que por el otro ducto ingresa aire proveniente del equipo CAV que igualmente intercambia calor con las cestas que se interponen en su trayectoria y fueron calentadas por los gases de combustión. Los ciclos continuos de intercambio de calor disminuyen la temperatura de los gases de combustión a 140°C, mientras que el aire incrementa su temperatura hasta alcanzar 327°C, permitiendo de esta manera el ahorro de combustible del 18%.



Figura 1.6. Canasta del CAR obstruida. Fuente: Departamento de mantenimiento de planta cero.

Este taponamiento en la canasta, que está compuesta por diversos cestos, también genera corrosión en el lado frío de los elementos calefactores. En una caldera, parte del SO_2 producido se convierte en SO_3 y éste se combina con la humedad para formar vapor de SO_4H_2 ; este vapor condensa en las superficies que tengan temperaturas inferiores a la del punto de rocío, entre $120\text{ }^\circ\text{C}$ a $150\text{ }^\circ\text{C}$; la temperatura del metal, en el lado frío del calentador, es de $93\text{ }^\circ\text{C}$, por lo que existe riesgo de corrosión. La erosión de las láminas calefactoras se produce a causa del impacto de las partículas de ceniza en polvo que arrastran los humos a alta velocidad. Esta se presenta en zonas próximas a la entrada de humos, que es donde las velocidades resultan mayores. En la Figura 1.7 se muestra un cesto deteriorado que se desecha, aunque han existido casos que al sacarlos para desecharlos, han perdido toda la rejilla interior.



Figura 1.7: Cesto del CAR deteriorados. Fuente: CTE CMC.

La limpieza del cesto del CAR, ha sido problema importante ya que el proceso de limpieza tarda aproximadamente de 25 a 50 horas y es una causa significativa de tiempo de inactividad de la industria eléctrica lo que incrementa los costos. Los métodos de limpieza incluyen el uso de mangueras de incendio y la presión de aire para eliminar las cenizas volantes de las canastas, pero estos métodos sólo han tenido un éxito parcial. Por otra parte, la sustitución de las canastas ha sido otra solución al problema de la baja eficiencia causada por una canasta de calentador de aire obstruido por su estado de deterioro, sin embargo esto es muy costoso en términos de tiempo de inactividad y los gastos.

1.3 Caracterización de los Calentadores de Aire Regenerativos empleados en la CTE "Carlos M. de Céspedes".

Los CAR se encuentran emplazados en la parte posterior de las calderas de las unidades japonesas de la CTE, ver Figura 1.8. Estos equipos son los encargados de aprovechar la temperatura de los gases de escape para calentar el aire que irá a la cámara de combustión. Este proceso se logra gracias a la distribución ordenada de cestos ubicados dentro de los doce tabiques del rotor, que contienen planchas con agujeros (chapas de calefacción) que permiten el paso de aire y gases entre ellas que circulan a contra flujo por conductos adyacentes, ver Figura 1.9, permitiendo dicho calentamiento producto al giro del rotor sobre su eje central.

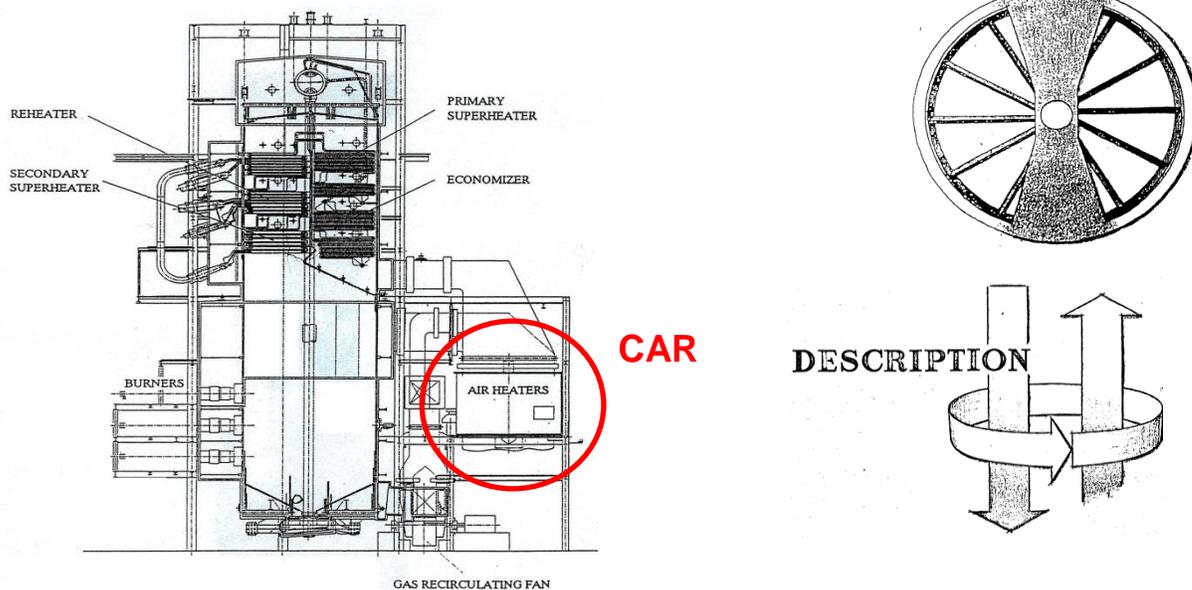


Figura 1.8 Ubicación geográfica de los CAR. Figura 1.9 Circulación de los fluido.

Fuente: CTE.

Las principales partes del calentador se muestran en el plano en explosión de la Figura 1.10, el rotor gira dentro del estator, que está soportado por sendas bancadas: superior e inferior; en la inferior se aloja el rodamiento axial que soporta el mayor peso del equipo.

Al rotor se atornillan los dos semiejes: inferior y superior, ver Figura 1.11 y 1.12, respectivamente. El semieje de la sección inferior nunca ha tenido averías, siendo contradictorio ya que este semieje es el que soporta las 150 toneladas que pesa el CAR, ver Figura 1.13.

A lo largo de la vida en operación de estos equipos, han tenido lugar numerosas averías en el semieje superior que se recuperan soldando una espiga nueva en la zona del rodamiento.

Los elementos de intercambio de calor (cestos), se cambian por nuevos fabricados por la EMCE en los mantenimientos parciales, estos no cuentan con la misma masa y los tabiques quedaban sin balancear, por esta cuestión ocurrían disimiles averías. Un buen día se comenzaron a balancear los cestos situando los de igual peso a 180° desde entonces las averías disminuyeron considerablemente.

Estando supuestamente balanceado el CAR, el día 27 de julio del 2012 falló nuevamente el semieje superior en la misma zona que las anteriores.

Capítulo I: Calentadores de Aire Regenerativos

En el año 2009 se concluyó la modernización de la unidad CMC 4, donde quedaron instalados nuevos CAR que sustituyeron los originales, hasta el momento no se han intervenido, excepto para verificar y revisar los componentes que sufren desgaste como son sellos lubricantes y elementos de intercambio de calor.

No se sabe qué pasará en el momento que se deterioren los cestos de fábrica y exista la necesidad de cambiarlos por otros fabricados en Cuba. No existe un estudio de las cargas que actúan sobre el semieje con un mínimo desbalance.

Algunos parámetros de funcionamiento se pueden observar en la Tabla.1.1.

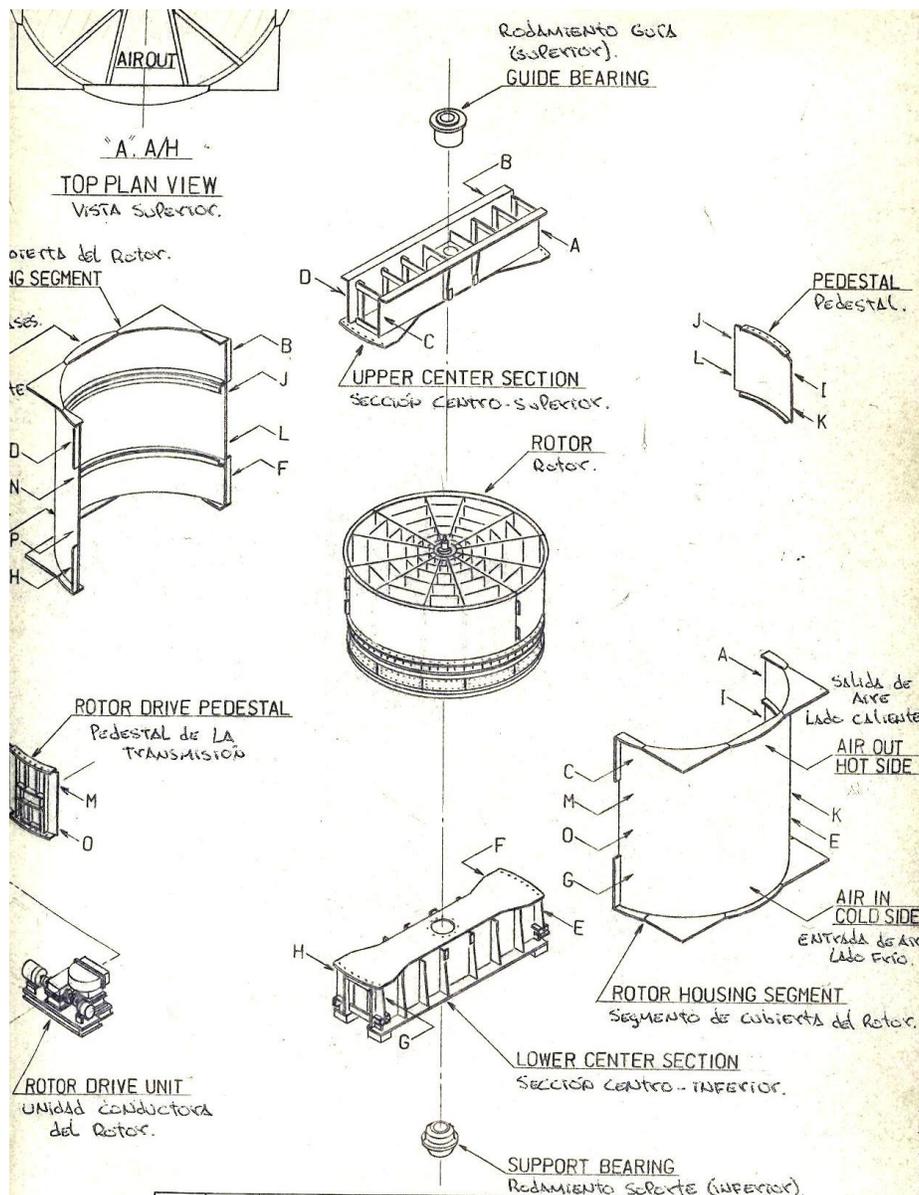


Figura 1.10 Plano en explosión del CAR. Fuente: CTE CMC.

Capítulo I: Calentadores de Aire Regenerativos

Tabla 1.1 Algunos parámetros de los CAR. Fuente: CTE CMC.

| | | |
|---|----------------------|-----------------|
| 4 | Rotor rotation speed | Approx. 1.1 rpm |
| 5 | Total weight | Approx. 150 ton |

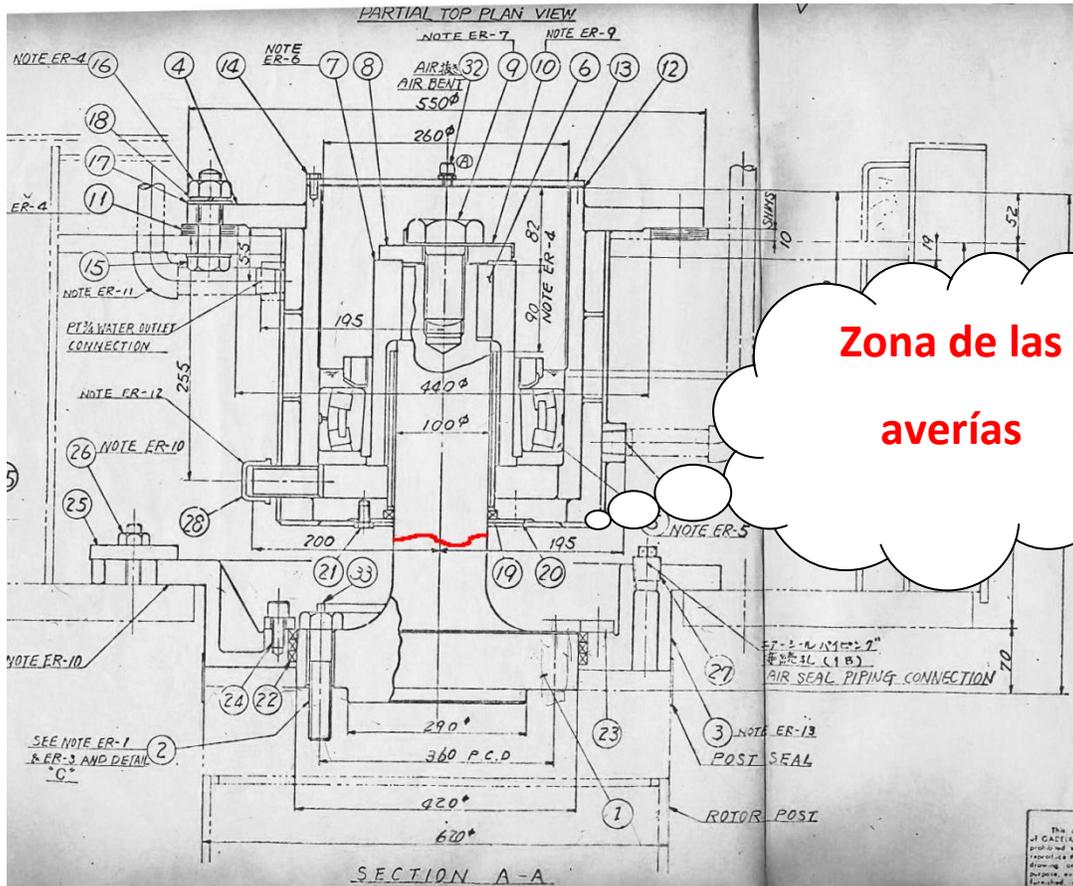


Figura 1.13 Semieje Superior y ubicación de las Averías. Fuente: CTE CMC

1.4 Modelación matemática del funcionamiento de los CAR.

Desde la invención en 1920 de estos tipos de CAR se han realizado estudios con vista a modelar matemáticamente su funcionamiento desde el punto de vista térmico. Dentro de los trabajos clásicos que más citan los investigadores contemporáneos están los siguientes: (Mukanov K., 1968) establece un modelo NUT- efectividad, que considera la incorporación de las correlaciones de la efectividad y el rendimiento óptimo, lo cual permitió cálculos rápidos y con buena aproximación para la efectividad del regenerador; (J. Kern, 1974) elaboró un modelo para el cálculo de la transferencia de calor para estos tipos de intercambiadores de calor; (R. Shah, 1975) desarrolló una correlación empírica

de la efectividad de calentador rotatorio, estudiando los efectos de la conducción del calor longitudinales en ella; (Skiepko,1988) estableció un método para el cálculo del flujo de masa de gas a través de los sellos y analizó la influencia de fugas en el rendimiento de un calentador de aire rotativo; (O. Büyükalaca, 2003) realizó un análisis numérico, analítico y experimental para investigar la influencia de la velocidad de rotación en el campo de temperaturas del CAR, demostrando que se puede estudiar este tipo de equipos utilizando software para simulación de fenómenos multifísicos, como son el ANSYS y el COMSOL, entre otros. La tendencia de los trabajos actuales ha sido mejorar la precisión de los resultados de la modelación respecto al comportamiento real de los equipos.

Como consecuencia de estos estudios se ha definido la influencia de diferentes parámetros de diagnóstico con los parámetros estructurales, pudiéndose definir criterios de diseño y sistemas de diagnósticos que se adecuen a las condiciones de explotación de los CAR. Un ejemplo de esto son los métodos para la limpieza de los calentadores de aire regenerativo rotativo, dentro de ellos se encuentra el método generalizado para establecer un parámetro de diagnóstico a través del análisis de la limpieza con vapor de los CAR de las centrales termoeléctricas. Sin embargo la gran mayoría de los aportes han estado más enfocados hacia la parte comercial, debido a que la información se encuentra en patentes donde han dado un aporte y modificado el sistema de limpieza que tienen los calentadores de aire para hacer más eficiente y disminuir el tiempo de ejecución.

1.4.1 Campo de temperaturas en el CAR

La modelación del campo de temperaturas en el CAR, ha sido abordada por varios autores desde que en 1920 Ljunstrom publicó las características de su invento.

Dentro de los estudios más citados de los últimos años está el realizado por (Kaushik, 2011). Ellos obtuvieron que el gradiente de temperatura en la dirección longitudinal es máximo en las regiones cercanas al rotor y disminuyen en la dirección que aumenta el radio. Por tanto la transferencia de calor máxima del gas al aire, ocurre cerca del rotor y disminuye a medida que se acerca a la periferia. Se observó además que existe un decrecimiento de la temperatura del lado de los gases, al moverse de arriba hacia abajo y un gradual incremento del lado del aire. También que las placas en la cercanía de la periferia del regenerador están sujetas a la mayor fatiga térmica, ya que allí se encuentra el mayor cambio de temperatura. Este comportamiento es congruente a lo que ocurre en la realidad y hay referencias de que la diferencia de los resultados de modelo y los valores experimentales es adecuada para este tipo de análisis. En el trabajo realizado por

(Khairul, 2007), se utiliza este método y aunque no se resuelve el problema con un software especializado, se comparan los resultados del modelo matemático de un intercambiador de calor regenerativo rotatorio con mediciones realizadas en experimentos obteniéndose errores inferiores al 11%.

En la Figura 1.14 se muestran resultados de la modelación por elementos finitos. Puede verse que la diferencia de temperatura entre el lado de los gases y el del aire aumenta a medida que nos alejamos del centro del rotor, por tanto las tensiones térmicas serán mayores en la zona exterior.

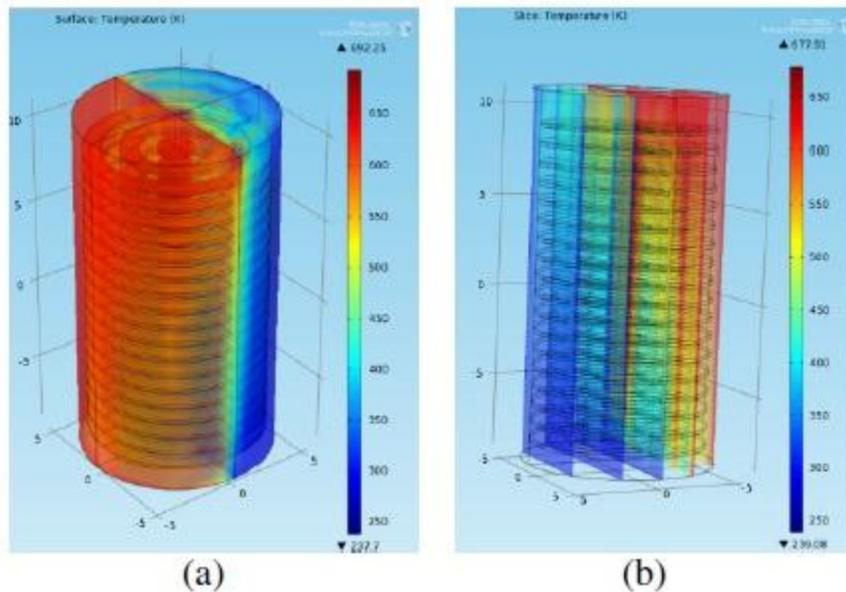


Figura 1.14: (a) Gráfico de superficie de temperatura y (b) Gráfico de temperatura con cortes longitudinales. Fuente: Kaushik, 2011.

1.4.2 Ecuaciones para el cálculo del campo de temperaturas

A partir de los resultados obtenidos por (Kaushik, 2011) se procedió a determinar una ecuación para el campo de temperatura en el generador, con el objetivo de extrapolar el análisis al CAR de la termoeléctrica de Cienfuegos.

Para ello se tomaron los valores obtenidos en el artículo y se pusieron en forma adimensional, utilizando la siguiente expresión:

Capítulo I: Calentadores de Aire Regenerativos

La temperatura de entrada (T_0) es igual a 298 K, ya que es la utilizada para el modelo de Kaushik, 2011.

El campo de temperaturas se determinará en dos dimensiones y se considera que en cada radio las temperaturas son constantes en función de la altura de CAR. Para definir las coordenadas adimensionales se utiliza el siguiente esquema:

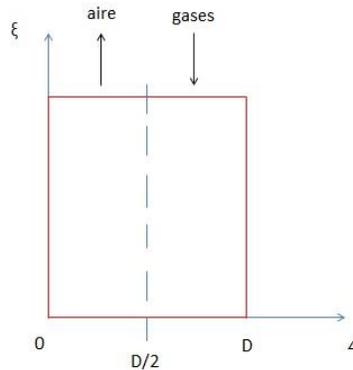


Figura 1.15: Circulación de los flujos en el CAR. Fuente: Elaboración propia

Dónde:

En las Tablas 1.2 y 1.3 se muestran los valores obtenidos del análisis de los resultados del artículo referido. Para el caso de los gases de combustión se tomó $T(L) = 623$ K, en el caso del aire $T(L)$ se toma de acuerdo al valor que alcanza en función de la posición radial (entre 390 y 565 K).

Tabla 1.2: Temperatura adimensional de los gases en función de las coordenadas ξ y Δ en el CAR. Fuente: Elaboración propia

| Tad gas | | |
|-------------|------|------|
| 0,03 | 0,63 | 0,00 |
| 0,18 | 0,63 | 0,03 |
| 0,33 | 0,63 | 0,06 |
| 0,48 | 0,63 | 0,09 |
| 0,63 | 0,63 | 0,14 |

| | | |
|-------------|------|------|
| 0,78 | 0,63 | 0,37 |
| 0,93 | 0,63 | 0,77 |
| 1,01 | 0,63 | 1,00 |
| 0,71 | 0,63 | 0,17 |
| 0,48 | 0,75 | 0,14 |
| 0,63 | 0,75 | 0,49 |
| 0,78 | 0,75 | 0,69 |
| 0,93 | 0,75 | 0,91 |
| 1,01 | 0,75 | 1,00 |
| 0,48 | 0,88 | 0,14 |
| 0,63 | 0,88 | 0,49 |
| 0,78 | 0,88 | 0,71 |
| 0,93 | 0,88 | 0,94 |
| 1,01 | 0,88 | 1,00 |
| 0,78 | 1,00 | 0,17 |
| 0,93 | 1,00 | 0,77 |
| 1,01 | 1,00 | 1,00 |
| 0,75 | 1,00 | 0,09 |
| 0,86 | 1,00 | 0,31 |

Tabla 1.3: Temperatura adimensional del aire en función de las coordenadas y en el CAR. Fuente: Elaboración propia.

| Tad aire | | |
|-------------|------|------|
| 0,02 | 0,13 | 0,01 |
| 0,46 | 0,13 | 0,51 |
| 1,00 | 0,13 | 0,94 |

| | | |
|-------------|------|------|
| 0,01 | 0,25 | 0,01 |
| 0,25 | 0,25 | 0,20 |
| 0,55 | 0,25 | 0,71 |
| 0,85 | 0,25 | 0,91 |
| 0,01 | 0,38 | 0,01 |
| 0,25 | 0,38 | 0,20 |
| 0,55 | 0,38 | 0,71 |
| 0,85 | 0,38 | 0,91 |
| 0,16 | 0,50 | 0,11 |
| 0,34 | 0,50 | 0,31 |
| 0,53 | 0,50 | 0,57 |
| 0,72 | 0,50 | 0,71 |
| 0,91 | 0,50 | 0,86 |
| 1,00 | 0,50 | 0,91 |
| 0,06 | 0,50 | 0,01 |

Se realizó un análisis de regresión utilizando el software SPSS 20.0, el cual puede verse en el Anexo 1, obteniéndose los siguientes modelos matemáticos que correlacionan las temperaturas en las coordenadas definidas.

Los modelos obtenidos son:

1.4.3 Análisis de resultados

Utilizando los valores de temperatura media del CAR de la (CTE) de Cienfuegos, a la entrada de los gases de combustión (644 K) y de salida del aire (600 K) y los modelos de regresión obtenidos, se realizan los cálculos de campo de temperatura para 20, 40, 60 y 80% de la altura real del equipo y para 8 valores de θ . Los resultados se muestran en la tabla 1.4 y en la figura 1.16.

Capítulo I: Calentadores de Aire Regenerativos

Tabla 1.4: Campo de temperatura para 20, 40, 60 y 80% de la altura real del equipo.

Fuente: Elaboración propia

| | Tf(20) | Tf(40) | Tf(60) | Tf(80) |
|-------------|--------|--------|--------|--------|
| 0,20 | 352,82 | 409,53 | 466,25 | 522,97 |
| 0,30 | 347,26 | 403,98 | 460,69 | 517,41 |
| 0,40 | 354,14 | 410,85 | 467,57 | 524,28 |
| 0,50 | 373,44 | 430,16 | 486,87 | 543,59 |
| 0,60 | 455,25 | 509,57 | 563,89 | 618,22 |
| 0,70 | 474,02 | 519,31 | 564,60 | 609,89 |
| 0,80 | 497,06 | 533,32 | 569,58 | 605,84 |
| 0,90 | 524,38 | 551,61 | 578,84 | 606,07 |

En la Figura 1.16, se puede observar el comportamiento del campo de temperaturas del CAR para las condiciones de trabajo de la CTE CMC. Tal como se había previsto, existe una diferencia de temperatura de cerca de 100 grados entre la zona expuesta a los gases producto de la combustión y la del aire. Esta diferencia es cíclica, por tanto las tensiones térmicas que se originan pudieran traer como consecuencia roturas por fatiga de los elementos del CAR.

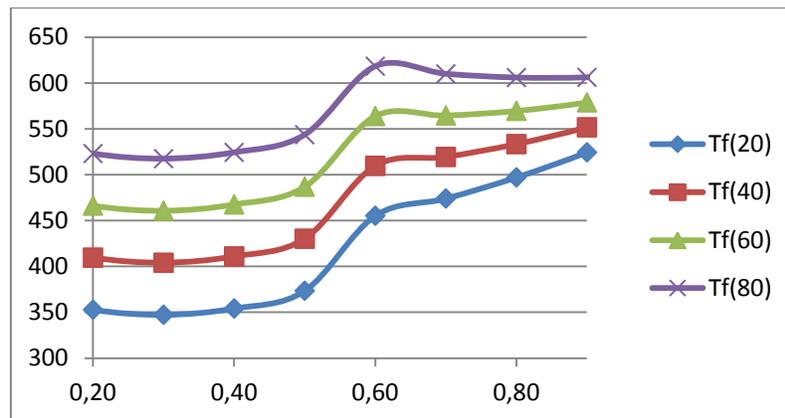


Figura 1.16: Campo de temperaturas del CAR en °C vs. x/d. Fuente: Elaboración Propia.

En el estudio llevado a cabo por Rodríguez, 2010, se realizaron mediciones con una elevada precisión de las temperaturas de los gases y del aire en los CAR de la Termoeléctrica Antonio Guiterras en la provincia de Matanzas (véase Tabla 1.5). Utilizando

Capítulo I: Calentadores de Aire Regenerativos

estas mediciones se procede a determinar si el modelo desarrollado por este trabajo describe adecuadamente el comportamiento real de los equipos instalados en dicha CTE.

Tabla 1.5: Mediciones de temperatura de la CTE Antonio Guiteras.

Fuente: Rodríguez, 2010.

| Variables | Intervalo de confiabilidad | Intervalo de confianza. | Valor Obtenido modelo. | Error relativo de la medición (%) |
|----------------|----------------------------|-------------------------|------------------------|-----------------------------------|
| Teg CAR I (°C) | 324.77 | 5.58 | 0,21007411 | 1,72104666 |
| Teg CAR D (°C) | 322.24 | 4.94 | 0,21135085 | 1,53627694 |
| Tsg CAR I (°C) | 144.1 | 3.06 | 0,42821751 | 2,1258786 |
| Tsg CAR D (°C) | 137.56 | 2.57 | 0,44748984 | 1,87095001 |
| Tea CAR I (°C) | 57.50 | 0.39 | 1,04825898 | 1,05301799 |
| Tea CAR D (°C) | 50.14 | 0.49 | 1,20082045 | 0,98236667 |
| Tsa CAR I (°C) | 263.12 | 5.0 | 0,24899593 | 1,90290302 |
| Tsa CAR D (°C) | 248.48 | 5.0 | 0,2613558 | 1,03110018 |

Las Tablas 1.5 y 1.6 muestran los resultados del modelo para los CAR de las centrales de las dos centrales termoeléctricas (Cienfuegos y Matanzas). Al realizar estos cálculos en los CAR de la CTE Antonio Guiteras se observa que el error relativo absoluto respecto a los parámetros medidos está entre un 0,04 y un 15%, mientras que para la CTE de Cienfuegos este error llega a un 58% para el caso de la temperatura del aire. Teniendo en cuenta que no existen diferencias constructivas entre estos CAR, se hace necesario realizar las mediciones de las temperaturas en la CTE de Cienfuegos con mayor precisión.

Tabla 1.6: Resultados del modelo para los CAR de las centrales de las dos centrales termoeléctricas (Cienfuegos y Matanzas). Fuente: Elaboración propia.

| Variables | Valor medido | Valor del modelo. | Error relativo(%) |
|--------------|--------------|-------------------|-------------------|
| TsgCMC (°C) | 141 | 181,56 | -28,8 |
| Tsg GI (°C) | 144,1 | 160,34 | -11,3 |
| Tsg GD (°C) | 137,56 | 159,07 | -15,6 |
| Tea CMC (°C) | 140 | 58,95 | 57,9 |
| Tea GI (°C) | 57,5 | 51,57 | 10,3 |
| Tea GD (°C) | 50,14 | 50,12 | 0,04 |

1.5 Conclusiones parciales

1. La suciedad de las canastas debido al cúmulo de partículas que terminan por obstruirla genera una caída de la transferencia de calor en esta unidad, pérdidas de generación eléctrica e incremento del peso por las incrustaciones y decremento del peso por la corrosión, ambos efectos influyen de manera contraria en la excentricidad.
2. En el calentador de aire Ljungstrom su proceso operacional es donde se realiza el aprovechamiento energético dentro de una planta termoeléctrica, ya que genera una ganancia que eleva la eficiencia de la unidad generadora de vapor y ahorro de combustible.
3. Al mantener una buena efectividad térmica de operación en el calentador de aire Ljungström se disminuye el impacto ambiental, logrando así una conservación del medio ambiente.
4. El gradiente de temperatura en la dirección longitudinal del CAR es máximo en las regiones cercanas al rotor y disminuyen en la dirección que aumenta el radio (Kaushik, 2011).
5. Las placas en la cercanía de la periferia del regenerador están sujetas a la mayor fatiga térmica, ya que allí se encuentra el mayor cambio de temperatura.
6. La excentricidad originada por la pérdida de peso de los cestos producida por los fenómenos de erosión corrosión influyen indudablemente en la causa de las fallas por fatiga y es esta excentricidad la que origina las fuerzas internas de flexión en el semieje.
7. A partir del modelo matemático presentado se puede afirmar que la diferencia de temperatura es cíclica en el CAR y por tanto las tensiones térmicas que se originan pudieran traer como consecuencia roturas por fatiga de sus elementos.
8. Al aplicar el modelo matemático obtenido, a los CAR de la CTE Antonio Guiteras se observa que el error relativo absoluto respecto a los parámetros medidos está entre un 0,04 y un 15%, mientras que para la CTE de Cienfuegos este error llega a un 58% para el caso de la temperatura del aire.

Capítulo II



Capítulo II: Determinación de las causas del fallo del semieje superior del CAR.

2.1 Análisis de las roturas

En la Figura 2.1 se muestra una vista de la sección de fractura ocurrida el 4 de julio del 2013 en el semieje superior del CAR de la CTE CMC.



Figura 2.1 Sección de la Fractura del 4 de Julio del 2013. Fuente CTE CMC.

Se observa claramente la zona derecha de fisuración progresiva, mucho menos rugosa que la de la izquierda, se observa además la línea divisoria. Cuando se compara con el cuadro de avería por fatiga dado por (Dobrovolski, 1991) y mostrado en la Figura 2, se puede identificar que se trata de una Fractura por Fatiga por Flexión Unilateral Cíclica (del lado de la excentricidad), con un concentrador fuerte en la periferia (en esa zona hay un cambio de diámetro) y considerable sobrecarga cíclica. O sea que la excentricidad produce en esa zona grandes tensiones de flexión. Se observa también, en este caso, la zona de la soldadura con considerables defectos que incrementan sensiblemente la concentración de tensiones.

| Tipo de carga | Concentrador débil local | | Concentrador débil por la periferia | | Concentrador fuerte por la periferia | |
|---------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|
| | A moderada sobrecarga cíclica | A considerable sobrecarga cíclica | A moderada sobrecarga cíclica | A considerable sobrecarga cíclica | A moderada sobrecarga cíclica | A considerable sobrecarga cíclica |
| Tracción y compresión cíclica | | | | | | |
| Flexión unilateral cíclica | | | | | | |
| Flexión bilateral cíclica | | | | | | |
| Flexión simétrica a la rotación | | | | | | |

Figura 2.2 Cuadro de aspectos externos de las fallas por fatiga. Fuente: Goitizolo 2000.

2.1.1 Análisis químico y mecánico del semieje superior

El semieje superior según la Norma Japonesa JIS es del material S50C, lo cual es equivalente a un acero 50 según GOST. La composición química se muestra en la Tabla 2.1.

| Tabla 2.1 Composición química del semieje superior. Fuente: Software: Keys to Steel Database. | | |
|--|------|-------|
| C | 0.47 | 0.53 |
| Si | 0.15 | 0.35 |
| Mn | 0.60 | 0.90 |
| P | 0 | 0.030 |
| S | 0 | 0.035 |
| Cr | 0 | 0.2 |
| Ni | 0 | 0.2 |
| Cr + Ni | 0 | 0.35 |
| Cu | 0 | 0.3 |

Capítulo II: Determinación de las causas del fallo del semieje superior del CAR.

El material actual tiene:

Tabla 2.2 Composición química del material actual del semieje superior Gost. Fuente: Software: Keysto Steel Database.

| C | 0.47 | 0.55 |
|----|------|------|
| Si | 0.17 | 0.37 |
| Mn | 0.5 | 0.8 |
| P | 0 | 0.04 |
| S | 0 | 0.04 |
| Cr | 0 | 0.25 |
| Ni | 0 | 0.25 |

El acero 50 según la norma GOST posee las características mostradas en la tabla 2.3.

Tabla 2.3 Propiedades mecánicas del semieje superior.

Fuente: Norma GOST

| <i>Propiedades mecánicas</i> | <i>Acero 50</i> | <i>Unidades</i> |
|--|-----------------|--------------------------|
| Límite de fluencia (σ_f) | 38 | kN/cm² |
| Resistencia máxima (σ_u) | 64 | kN/cm² |
| Resiliencia (a_k) | 4 | kN/cm² |
| % de reducción del área (ψ) | 40 | % |
| % de elongación (δ) | 14 | % |

2.2 Determinación de la fuerza que produce el fallo del semieje del CAR

Se plantea como Hipótesis que la causa de la avería es por fatiga debido a la excentricidad que le provoca el enorme peso del rotor, por el conjunto de cestos desbalanceados. Si el sistema estuviera perfectamente balanceado, en el rodamiento del semieje superior no aparecerían cargas radiales y por lo tanto la fractura por fatiga por flexión sería completamente imposible. El carácter cíclico de las tensiones provocadas por la excentricidad la proporciona precisamente el carácter totalmente aleatorio y acelerado del deterioro de los cestos que pueden provocar que la excentricidad del centro de masa del CAR cambie de magnitud y posición pudiendo desplazarse incluso hasta una posición diagonalmente opuesta, provocando un ciclo simétrico, o muy próximo a este, de

Capítulo II: Determinación de las causas del fallo del semieje superior del CAR.

variación de las tensiones. En este carácter cíclico, que es absolutamente obligatorio para que ocurra la falla por fatiga, puede estar influyendo también decisivamente las oscilaciones propias del campo de temperatura de los CAR que pueden originar tensiones térmicas cíclicas.

Se considerará la situación más crítica, considerando que el semieje se encuentra sometido a un ciclo de tensiones simétrico ya que está rotando y la tensión media se considerará igual a cero donde:

$$\sigma_{max} = \sigma_a \quad (2.1)$$

σ_{max} : Tensión máxima, kN/cm²

σ_a : Tensión de amplitud, kN/cm²

M : Momento flector, kN - cm

W : Módulo de la sección del árbol a flexión, cm³

R: Reacción del cojinete que provoca la fatiga, kN

Z: Distancia que hay entre la reacción en el cojinete y un punto a analizar (brazo del momento resultante) en cm

Se calculará la reacción en el cojinete para cuatro distancias aleatorias (Z) y ver como varía con el incremento de ellas. Para esto tomaremos como datos iniciales:

- (El árbol falla por fatiga)
- Semieje de acero 50
-
-
-
- Semieje torneado fino

Según la expresión de cálculo de fatiga (ecuación 2.2) despejamos σ_a y la igualamos a la ecuación 2.1:

$$\sigma_a = \frac{R \cdot Z}{W} \quad (2.2)$$

_____ (2.3)

: Límite de resistencia a la fatiga en la flexión bajo ciclo simétrico.

ϵ : Factor de tamaño

β : Factor del estado de la superficie

: Factor de seguridad

: Factor de cambio de forma

Para un ciclo simétrico soportando flexión su límite de fatiga es:

Igualando (2.1) y (2.3) y despejando la reacción R se obtiene:

_____ (2.4)

Para el cálculo de la reacción en el rodamiento, se escogen cuatro valores de brazo de momento flector (Z):

-
-
-
-

Para los tres primeros valores de el diámetro del semieje no varía por tanto las constantes son iguales, siendo por ser torneado fino, ya que es un acero aleado con concentrador de tensiones con diámetro y =1 fuera de la zona de cambio cambio de diámetro.

-
-
-

Capítulo II: Determinación de las causas del fallo del semieje superior del CAR.

A partir de que Z llega a 18,3 cm empieza un cambio de diámetro con un radio de redondeo de 95 mm y por tanto el valor de σ cambia, mientras los otros valores siguen constantes.

Para el cálculo de σ producto del cambio de diámetro se toma la siguiente ecuación:

El valor de σ depende de d y de D y se toma de la tabla de (Feodosiev, 1985). Para el cálculo de σ se toman los valores del diámetro inicial (d) el diámetro final (D) y el radio de redondeo (ρ) para establecer las siguientes proporciones y se busca en el (Goytisoló, 2000)

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} = \frac{D}{d} \sqrt{\frac{d}{\rho}}$$

Donde σ_0 y σ dando como resultado final σ . Por tanto la última reacción da σ , pero hay que tener en cuenta que esta superficie es soldada porque es muy grande para forjar y por tanto este factor se ve alterado por la acción de la soldadura. Este cordón de soldadura contiene considerables defectos, por lo que el factor real de concentración de tensiones como mínimo aumenta en un 30 % (Dobrovolski, 1970), (Broek, 1983). En la Tesis de Doctorado de (Hernández, 2005) se demostró que este factor de concentración de tensiones en el caso de cordones transversales como es el analizado, puede crecer hasta $K_t = 1.3$.

Se tomará este factor de concentración de tensiones. De donde se obtiene finalmente:

-

Se construye una curva de reacción (R) contra la distancia o brazo del momento flector (Z) (véase figura 2.3):

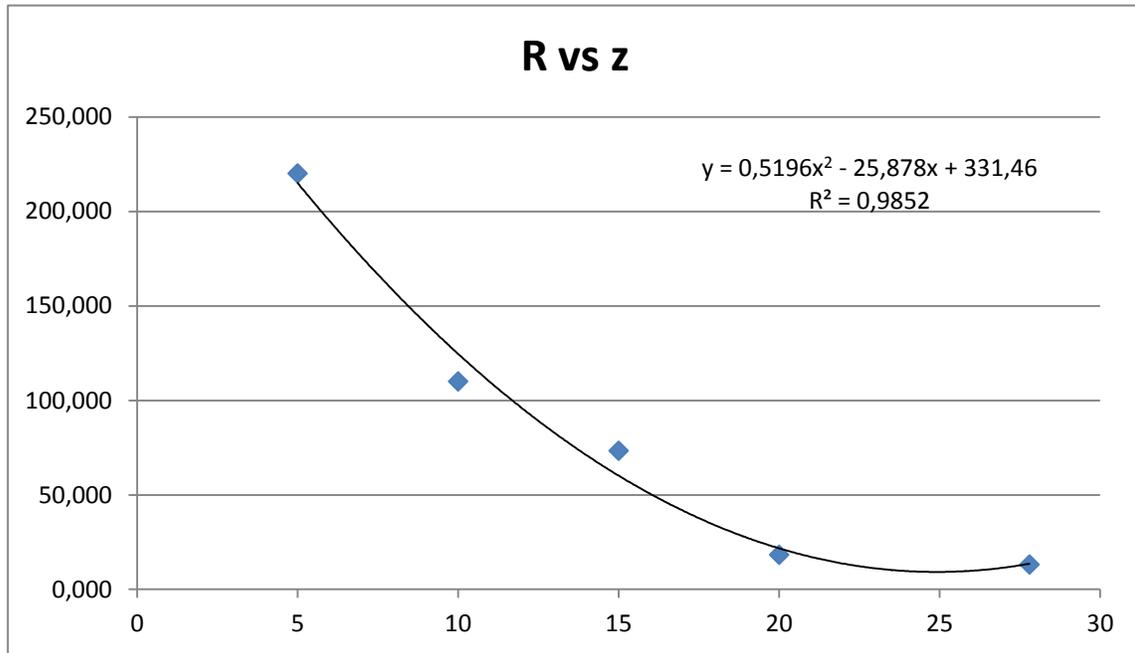


Figura 2.3 Comportamiento de la Reacción de fractura con el brazo del momento flector. Fuente: Elaboración propia.

Se puede observar que a medida que el brazo del momento flector aumenta, disminuye la reacción mínima que fractura el semieje. Siendo así, se necesita menos fuerza para que el semieje se fatigue y posteriormente se fracture en la sección de cambio de diámetro ($18,3 \text{ cm} \leq Z \leq 22,8 \text{ cm}$).

2.3 Cálculo de la excentricidad del CAR que provoca la fractura del semieje.

La mala distribución de los cestos con relación a su peso, los fenómenos de erosión corrosión provocado por el azufre presente en los gases calientes, que constituyen la causa del deterioro de los cestos, las posibles oscilaciones de las tensiones térmicas y las diferentes partículas que se adhieren a estos como cenizas provenientes de los gases de la combustión provocan un desbalance que hace que el semieje superior se someta a flexión provocándose una fatiga cuando rota el CAR que finalmente hace que se fracture. La excentricidad mínima que provoca esta flexión con un factor de seguridad igual a uno se calcula haciendo sumatoria de fuerzas en el apoyo del semieje inferior para eliminar sus reacciones, como se muestra en la Figura 2.4.

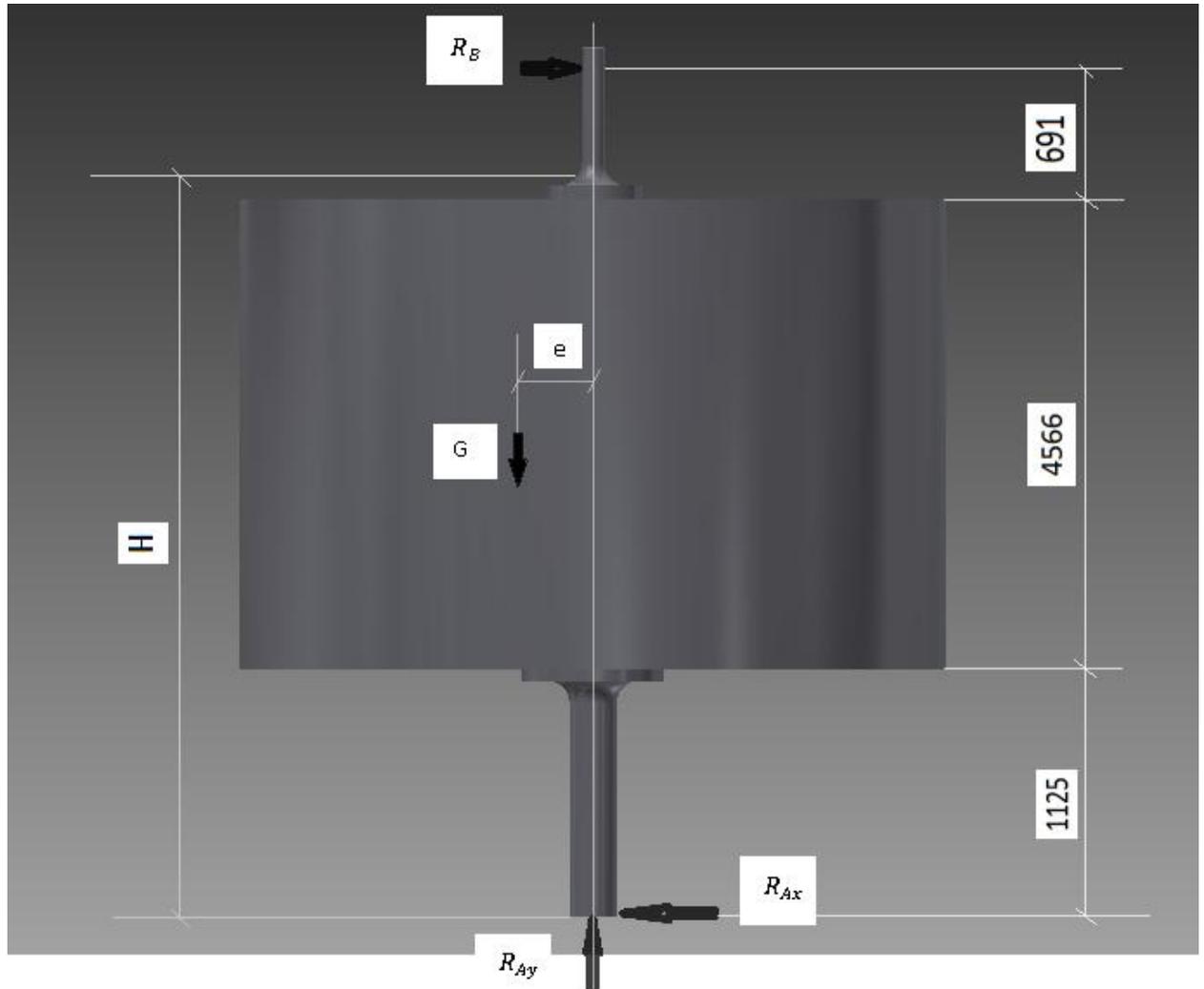


Figura 2.4 Esquema del CAR con las reacciones de los cojinetes en los semiejes.

Fuente: Elaboración propia.

Se tomó la reacción para el brazo de momentos donde se encuentra el cambio de diámetro (), ya que esta zona es la de mayor peligro de fractura ya que hay un cambio de diámetro y un cordón de soldadura de filete transversal siendo un concentrador de tensiones. Aplicando la ecuación de equilibrio queda:

Despejando la excentricidad (e):

—

Capítulo II: Determinación de las causas del fallo del semieje superior del CAR.

microgrieta de muy pequeña profundidad y gran longitud, o sea, $\frac{a}{2b} \rightarrow 0$. En este caso, el coeficiente ϕ toma el valor menor posible $\phi = 1$.

El coeficiente β en aquellos sitios donde la grieta surge en una zona donde hay cordones de soldadura la influencia del cordón se considera incorporando un valor de β igual a:

$$\beta_{\text{sold}} = 1,3.$$

Aplicando entonces el principio de la composición:

$$K_I = \beta_{\text{sold}} \cdot \beta_{\text{grieta}} \cdot \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a}$$

Para $\beta_{\text{sold}} = 1,3$ se tiene que:

$$\beta_{\text{grieta}} = 1,12 \cdot \frac{M_K}{\phi} \cos \phi = 1, \text{ se tiene que, la condición de fractura será:}$$

$$K_I = 1,3 \cdot 1,12 \cdot M_K \cdot \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a} = K_{Ic}$$

De donde se puede despejar la tensión de fractura σ_c o resistencia residual. O sea:

$$\sigma_c = \frac{K_{Ic}}{1,46 \cdot M_K \cdot \sqrt{\pi \cdot a}} \quad (2.7)$$

El Colectivo de Mecánica aplicada de la UCf ha obtenido la siguiente correlación (Goytisolo, 2000)

$$\frac{\sigma_c}{\sigma_{UTS}} = \frac{K_{Ic}}{1,46 \cdot M_K \cdot \sqrt{\pi \cdot a}} \quad (2.8)$$

Con todas estas expresiones se construye la Tabla 2.4 para posteriormente construir el gráfico de Resistencia Residual (Figura 2.5).

Tabla 2.4 Hoja de cálculo de Excel para la obtención de la tensión crítica.

Fuente: Elaboración propia

| ac (cm) | Δa (m) | | Mki | σ_c (MPa) |
|---------|----------------|-------------|------------|------------------|
| 0,1 | 0,0005 | 0,056049912 | 1,05325838 | 957,8708728 |
| 0,2 | 0,0005 | 0,079266546 | 1,05564664 | 675,784654 |
| 0,3 | 0,0005 | 0,097081296 | 1,05817157 | 550,4592545 |
| 0,4 | 0,0005 | 0,112099824 | 1,06084047 | 475,5123675 |
| 0,6 | 0,0005 | 0,137293685 | 1,06664223 | 386,1423997 |
| 0,8 | 0,0005 | 0,158533092 | 1,07312233 | 332,3897832 |
| 1 | 0,0005 | 0,177245385 | 1,08036283 | 295,3059912 |
| 1,2 | 0,0005 | 0,194162591 | 1,08845998 | 267,570853 |
| 1,4 | 0,0005 | 0,209719568 | 1,0975274 | 245,6758695 |
| 1,6 | 0,0005 | 0,224199649 | 1,10770019 | 227,698238 |
| 1,8 | 0,0005 | 0,237799638 | 1,11914023 | 212,481504 |
| 2 | 0,0005 | 0,250662827 | 1,13204317 | 199,280088 |
| 2,2 | 0,0005 | 0,262897391 | 1,1466477 | 187,5860534 |
| 2,4 | 0,0005 | 0,27458737 | 1,1632481 | 177,0369509 |
| 2,6 | 0,0005 | 0,285799596 | 1,18221133 | 167,3632501 |
| 2,8 | 0,0005 | 0,296588257 | 1,20400104 | 158,3565434 |
| 3 | 0,0005 | 0,306998012 | 1,22921157 | 149,8492674 |
| 3,2 | 0,0005 | 0,317066184 | 1,2586175 | 141,7010724 |
| 3,5 | 0,0005 | 0,331595752 | 1,31293933 | 129,8862605 |
| 4 | 0,0005 | 0,35449077 | 1,44548458 | 110,3566308 |
| 4,2 | 0,0005 | 0,363244947 | 1,52216399 | 102,2717771 |
| 4,4 | 0,0005 | 0,371793056 | 1,62081433 | 93,83876566 |
| 4,6 | 0,0005 | 0,380149 | 1,75207218 | 84,9006434 |
| 4,8 | 0,0005 | 0,388325183 | 1,93476723 | 75,26491056 |
| 5 | 0,0005 | 0,39633273 | 2,20569211 | 64,68625383 |
| 5,2 | 0,0005 | 0,404181665 | 2,64773085 | 52,84043515 |
| 5,4 | 0,0005 | 0,411881055 | 3,49494524 | 39,28299906 |

| | | | | |
|-----|--------|-------------|------------|-------------|
| 5,6 | 0,0005 | 0,419439136 | 5,7661651 | 23,38087745 |
| 5,8 | 0,0005 | 0,426863414 | 31,5931623 | 4,193095913 |



Figura 2.5: Gráfico de Resistencia Residual. Fuente: Elaboración propia.

De la curva de resistencia residual se obtiene que para la tensión límite máxima calculada que es $\sigma_{lim} = 36,694$ MPa, una grieta semielíptica superficial de profundidad $a_c=5,43$ cm provocará la fractura del semieje por fatiga.

2.4.2 Crecimiento Subcrítico de la grieta

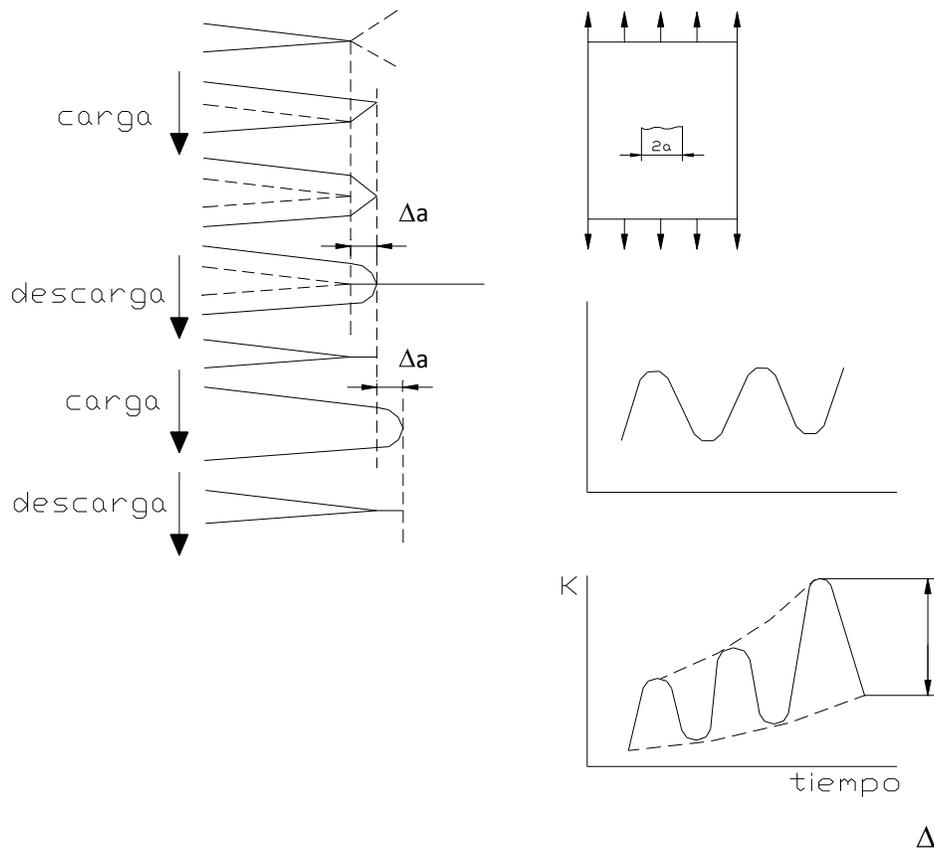
Para que una grieta alcance su tamaño crítico (longitud de grieta que origina la fractura de la pieza), debe crecer a partir de una microgrieta o un pequeño defecto. El crecimiento de una microgrieta o un defecto muy pequeño hasta que este alcance su tamaño crítico es lo que se conoce como Crecimiento Subcrítico de la grieta.

También se vio anteriormente cómo es posible a partir del diagrama de resistencia residual establecer para una tensión dada el tamaño crítico de la grieta a_c . Este tamaño de grieta es el mayor que puede ser tolerado en el elemento en cuestión. Si la grieta existente es menor que el tamaño crítico de la grieta, la tensión de operación no provocará la fractura, sin embargo, podrá ocurrir el crecimiento subcrítico de la grieta. La grieta tiene interés práctico a partir de un determinado tamaño a partir del cual ésta es detectable por los métodos de control, aunque el CAR es imposible de desarmar ya que es cerrado y es vital para el funcionamiento de la Termoeléctrica. Este tamaño mínimo

pequeña en comparación con el tamaño crítico. Cuando la grieta se aproxima al tamaño crítico el parámetro lineal elástico K deja de ser adecuado. Sin embargo, si observamos la forma de la curva de crecimiento se puede apreciar que el período de tiempo en que esto ocurre es muy pequeño con relación al tiempo total t_1 (Figura 2.7). Se puede considerar por lo tanto que existe similitud desde el punto de vista del crecimiento subcrítico si las grietas poseen el mismo K . Una grieta en un elemento crece de la misma forma que una grieta en una probeta de laboratorio cuando K para el elemento es igual a K para la probeta, por supuesto se vio también anteriormente que para que exista similitud total debe existir igual contracción. Si el frente de la grieta es bastante grande (gran espesor) existirá deformación plana. En otras condiciones la restricción a la contracción solo se garantiza cuando el elemento y la probeta poseen igual espesor.

2.4.3 El factor de intensidad de tensiones y razón de crecimiento de la grieta

La propagación de una grieta por fatiga mecánica pura es en gran medida una consecuencia del embotamiento cíclico y reaguzamiento de la punta de la grieta como se muestra en la Figura 2.8 a) Si este proceso ocurre de una forma regular y de una forma similar sobre una distancia cercana al frente de grieta, esto da lugar a líneas de estratificación. Las líneas de estratificación están ausentes cuando el proceso es irregular.



a) Embotamiento cíclico y reaguzamiento.

b) $\Delta\sigma$ y ΔK

Figura 2.8 Embotamiento cíclico y reaguzamiento de la grieta. Fuente: Goytisolo R, 2000.

El embotamiento de la grieta se debe a los deslizamientos (deformación plástica) y no involucra agrietamiento en un sentido real. No obstante, el embotamiento representa una extensión de la grieta en una cantidad Δa . Por lo tanto la cantidad de crecimiento de la grieta depende de la máxima abertura de la punta de la grieta y de la eficiencia del reaguzamiento, lo que está determinado por la máxima y mínima tensión del ciclo o más bien el rango de tensión.

Las tensiones en la punta de la grieta están determinadas por el factor de intensidad de tensiones, así si el crecimiento de la grieta está determinado por el rango de tensión y la tensión máxima en la punta de la grieta también estará determinado por el rango del factor de intensidad de tensiones y el máximo factor de intensidad de tensiones.

Capítulo II: Determinación de las causas del fallo del semieje superior del CAR.

La Figura 2.8 b) muestra un posible ciclo de variación de la tensión remota. Cuando esta alcanza su valor máximo σ_{\max} , el factor de intensidad de tensiones tendrá su valor máximo, K_{\max} . Cuando la tensión cíclica alcanza su valor mínimo σ_{\min} , el factor de intensidad de tensiones tendrá su valor mínimo $K = \beta \cdot \sigma_{\min} \cdot \sqrt{\pi \cdot a}$. El rango de variación del factor de intensidad de tensiones es $\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$, lo cual es igual a $\Delta K = \beta \cdot \Delta \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a}$.

Si el ciclo es simétrico, durante la compresión la grieta no crece y se toma $\Delta \sigma = \sigma_{\max}$. La condición de similitud entonces nos dice que dos grietas tendrán la misma cantidad de crecimiento cuando están sometidas al mismo ΔK y el mismo K_{\max} . Si la razón de crecimiento se denota como $\Delta a / \Delta N$, donde Δa es la cantidad de crecimiento durante ΔN ciclos de carga, la condición anterior puede ser escrita como:

$$\frac{da}{dN} = \frac{a}{N} = f(K, K_{\max}) \quad (2.9)$$

La ecuación 2.9 simplemente establece que la razón varía como una función de ΔK y K_{\max} y que la razón es siempre la misma para la misma combinación de ΔK y K_{\max} .

Si la razón de asimetría del ciclo de tensiones es $r = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$, también podemos decir $r = \frac{K_{\min}}{K_{\max}}$. Como $K_{\min} = K_{\max} - \Delta K$, se desprende que: $K_{\max} = \frac{\Delta K}{1-r}$. Entonces la ecuación 2.9 puede escribirse como:

$$\frac{da}{dN} = f(K, r) \quad (2.10)$$

Esta ecuación establece que la razón de crecimiento será siempre la misma para una combinación dada de ΔK y r .

Actualmente en la investigación del tiempo requerido para el crecimiento de la grieta se utiliza exclusivamente la Ecuación de Paris:

$$\frac{da}{dN} = f(\Delta K) \quad (2.11)$$

2.4.4 Construcción de la curva de razón de crecimiento de la grieta

La razón de crecimiento de un material dado debe ser determinada en un ensayo del material, ya que esta depende de la respuesta del material para una combinación dada de ΔK y r .

La forma más simple de ilustrar el procedimiento es a través del ejemplo de un panel muy ancho agrietado en el centro, de modo que $\beta \cong 1$ y $\Delta K = \beta \cdot \Delta\sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a}$. Primero consideraremos el caso en que $r = 0$, lo que implica que $da/dN = f(\Delta K)$. La probeta, (Figura 2.9 a) está sometida a una amplitud de ciclo constante $\Delta\sigma$ y el crecimiento de la grieta se registra como una función del número de ciclos, lo cual nos suministra la curva de propagación de la grieta que se muestra en la Figura 2.9 b).

Podemos determinar ahora como el material responde a un ΔK dado. Se puede notar que ΔK se incrementa durante el ensayo a medida que aumenta el tamaño de la grieta para $\Delta\sigma$ constante. La razón de crecimiento de la grieta es entonces

$\frac{\Delta a}{\Delta N} = \frac{a_2 - a_1}{N_2 - N_1}$. El rango del factor de intensidad de tensiones que produce

este crecimiento es: $\Delta K = \Delta\sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a_3}$

Donde $a_3 = \frac{a_1 + a_2}{2}$, el tamaño de grieta promedio sobre el intervalo.

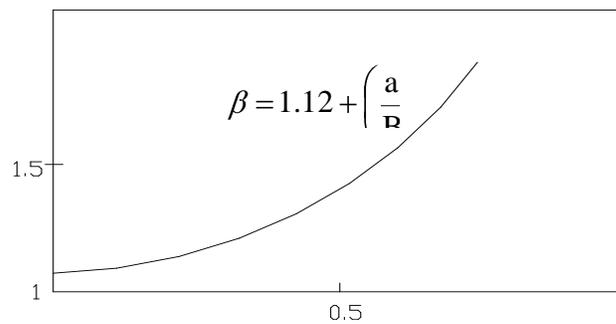
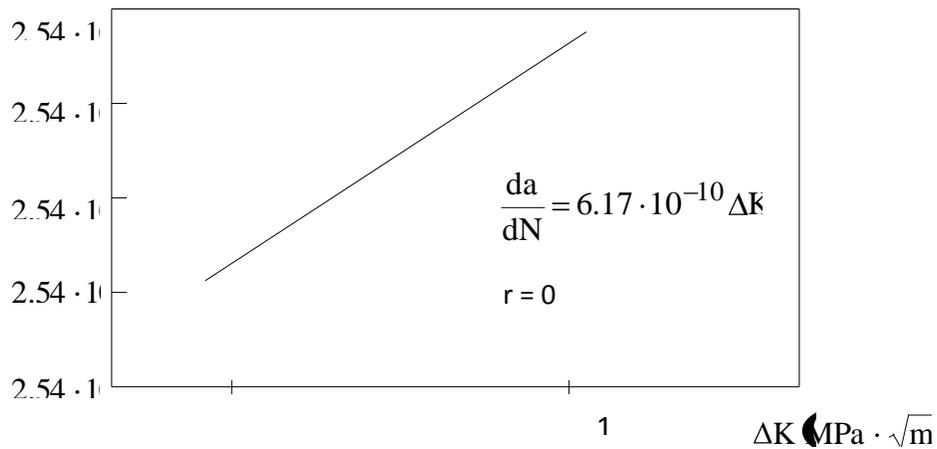
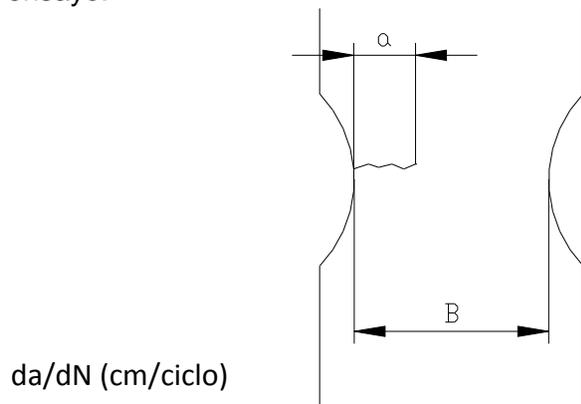
Determinando la razón de crecimiento de la grieta y ΔK para una serie de puntos de la curva de crecimiento de la grieta y ploteando ésta en función de ΔK se obtiene la curva de razón completa que se muestra en la Figura 2.9 c).

Esta curva es la respuesta del material a una carga cíclica para cualquier ΔK . El criterio de similitud plantea que la respuesta de un material a un ΔK dado será siempre la misma. Por lo tanto, la curva de razón completa nos da toda la información necesaria para analizar el comportamiento de grietas en estructuras.

En principio los datos de razón de la grieta pueden ser obtenidos de una probeta para la cual el factor de intensidad de tensiones sea conocido. Sin embargo, la estandarización del procedimiento del ensayo es aconsejable. La Norma (ASTM estándar E 647-78T) nos da un método tentativo para ensayo de crecimiento de la grieta. Las normas recomiendan el uso de la probeta de tensión compacta o una probeta agrietada centralmente. El

Capítulo II: Determinación de las causas del fallo del semieje superior del CAR.

crecimiento de la grieta se mide visualmente (generalmente mediante el uso de un microscopio de 30 a 50 X) o por una o varias técnicas que permitan la automatización del ensayo. En las modernas máquinas de fatiga controladas por computadora la información del crecimiento de la grieta puede ser introducida en la computadora la cual controla automáticamente el ensayo, que se recomienda la consulta de las normas antes de llevar a cabo dicho ensayo.



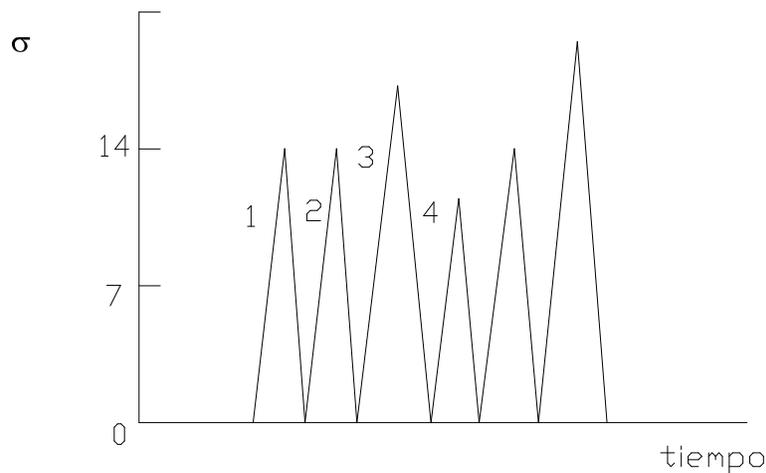


Figura 2.6 Análisis de crecimiento de la grieta. Fuente: Goytisoló R., 2000.

2.4.5 La ecuación de razón de Paris

En el epígrafe anterior se discutió el procedimiento de construcción de la curva de razón para un r fijo, $r = 0$. Debido a que la razón de crecimiento de la grieta depende de r y ΔK , las propiedades de razón de crecimiento del material tienen que ser determinadas para varios valores de r . Las curvas de razón para diferentes valores de r son más o menos paralelas y representan el cuadro completo de los datos de crecimiento de grietas en el material en términos de:

$$\frac{da}{dN} = f(\Delta K, r) \quad (2.10)$$

Claramente, $f(\Delta K, r)$ es una propiedad del material y es diferente para diferentes materiales, aunque las curvas de razón para muchos materiales tienen la misma forma.

De hecho la curva de razón para un r fijo puede ser aproximada a veces por una línea recta en un trazado doble logarítmico. En este caso, la función de razón puede ser representada por una simple ecuación matemática:

$$\frac{da}{dN} = C \cdot \Delta K^n, \quad r = \text{cte.} \quad (2.12)$$

Esta ecuación en la cual n es la pendiente de la línea recta es conocida como la Ecuación de razón de crecimiento de Paris. Como C y n caracterizan la línea recta, las propiedades

Capítulo II: Determinación de las causas del fallo del semieje superior del CAR.

de crecimiento de la grieta para un material pueden ser completamente descritas por los valores dados de C y n .

La ecuación 2.12 no tiene base teóricas. Esta es una fórmula empírica que cubre los datos razonablemente bien y los valores de sus constantes son mostrados en el siguiente esquema:

| CONSTANTES DE LA ECUACION DE RAZÓN DE CRECIMIENTO DE PARIS SEGÚN EL LIBRO DE: | | |
|---|----------------------------|------------|
| SHIGLEY J.E. – MISCHKE Ch. R. DISEÑO EN INGENIERÍA MECÁNICA, 6TA EDICIÓN, Mc GRAW - HILL, 2001, 1248 P. ⁻¹² | | |
| Aceros ferrítico – perlíticos | $C = 6,9 \times 10^{-10}$ | $n = 3$ |
| Aceros martensíticos | $C = 1,35 \times 10^{-12}$ | $n = 2,25$ |
| Aceros austeníticos inoxidables | $C = 5,6 \times 10^{-12}$ | $n = 3,25$ |

Nuestro semieje es un acero ferrítico – perlítico.

Finalmente se construye la tabla 2.2 para posteriormente graficar la curva del Crecimiento Subcrítico de la grieta:

Tabla 2.5 Hoja de cálculo de Excel para la obtención de la vida residual del semieje superior. Fuente: Elaboración propia

| ac (cm) | ΔK_i (MPa* \sqrt{m}) | Δa_i (ciclos) | $N_i = N_{i-1} + \Delta a_i$ | $H_i = N_i/f$ (Horas) | H_i (en años) |
|---------|---------------------------------|-----------------------|------------------------------|-----------------------|-----------------|
| 0,1 | 5,34740824 | 1,05506E-09 | 473904,563 | 7180,372174 | 0,81967719 |
| 0,2 | 7,562377257 | 2,98417E-09 | 167550,565 | 13627,51665 | 1,55565259 |
| 0,4 | 10,69481648 | 8,44052E-09 | 59238,0704 | 18820,02442 | 2,14840461 |
| 0,6 | 13,09842163 | 1,55062E-08 | 32245,1213 | 21259,68651 | 2,42690485 |
| 0,8 | 15,12475451 | 2,38734E-08 | 20943,8207 | 22747,59587 | 2,59675752 |
| 1 | 16,90998962 | 3,33641E-08 | 14986,1781 | 23775,56882 | 2,71410603 |
| 1,2 | 18,52396552 | 4,38582E-08 | 11400,372 | 24540,27542 | 2,8014013 |
| 1,4 | 20,00816954 | 5,52677E-08 | 9046,88016 | 25137,77241 | 2,86960872 |
| 1,6 | 21,38963296 | 6,75241E-08 | 7404,7588 | 25621,2743 | 2,924803 |
| 1,8 | 22,68713177 | 8,05727E-08 | 6205,57649 | 26022,95371 | 2,97065682 |

Capítulo II: Determinación de las causas del fallo del semieje superior del CAR.

| | | | | | | |
|-----|-------------|-------------|------------|-------------|-------------|------------|
| 2 | 23,91433666 | 9,43679E-08 | 5298,41409 | 1739994,732 | 26363,55654 | 3,00953842 |
| 2,5 | 26,7370412 | 1,31883E-07 | 3791,23651 | 1783997,698 | 27030,26816 | 3,08564705 |
| 3 | 29,28896117 | 1,73365E-07 | 2884,09133 | 1816580,286 | 27523,94373 | 3,14200271 |
| 3,5 | 31,63569378 | 2,18465E-07 | 2288,69976 | 1841957,505 | 27908,44704 | 3,18589578 |
| 4 | 33,81997923 | 2,66913E-07 | 1873,27227 | 1862445,355 | 28218,86901 | 3,22133208 |
| 4,2 | 34,65516621 | 2,87179E-07 | 1741,0729 | 1869602,907 | 28327,31677 | 3,23371196 |
| 4,4 | 35,47069347 | 3,07934E-07 | 1623,72275 | 1876269,559 | 28428,32665 | 3,24524277 |
| 4,6 | 36,26788724 | 3,29167E-07 | 1518,9873 | 1882498,975 | 28522,71174 | 3,25601732 |
| 4,8 | 37,04793104 | 3,50866E-07 | 1425,0465 | 1888336,949 | 28611,16589 | 3,26611483 |
| 5 | 37,81188628 | 3,73022E-07 | 1340,40452 | 1893822,831 | 28694,28531 | 3,27560335 |
| 5,2 | 38,5607092 | 3,95625E-07 | 1263,8219 | 1898990,646 | 28772,58554 | 3,28454173 |
| 5,4 | 39,2952649 | 4,18668E-07 | 1194,26375 | 1903869,987 | 28846,51496 | 3,29298116 |
| 5,6 | 40,01633908 | 4,42141E-07 | 1130,86002 | 1908486,732 | 28916,46563 | 3,3009664 |
| 5,8 | 40,72464786 | 4,66038E-07 | 1072,87444 | 1912863,618 | 28982,7821 | 3,30853677 |

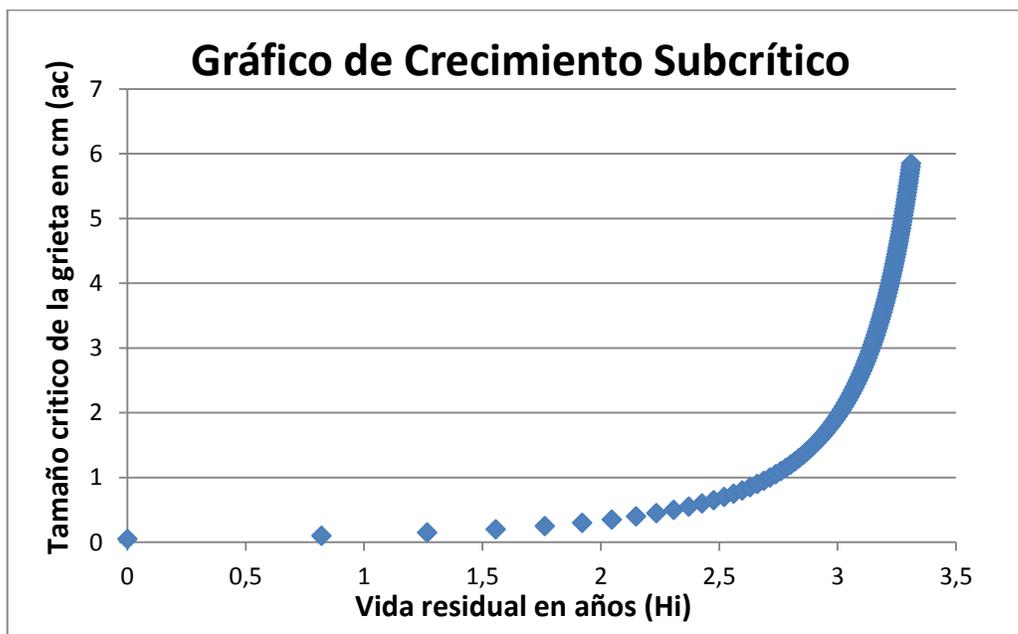


Figura 2.7 Curva del Crecimiento Subcrítico de la grieta. Fuente: Elaboración propia.

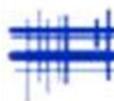
Capítulo II: Determinación de las causas del fallo del semieje superior del CAR.

Con la ayuda de la curva de la Figura 2.7 se pudo determinar que con una grieta semiéptica superficial de profundidad $a_c = 5,44$ cm el semieje superior promediará una vida de 3 años y tres meses.

2.5 Conclusiones parciales

1. Las fracturas de los semiejes superiores es evidentemente por fatiga y la hipótesis es que ocurren debido a la aparición de grandes fuerzas radiales en el cojinete superior
2. La excentricidad necesaria del peso del CAR para provocar la fractura del semieje superior por fractura por fatiga por flexión es sólo de 7,1 cm. En un equipo de tan grandes dimensiones esta excentricidad es perfectamente posible, incluso aun cuando se intente balancear los cestos.
3. La presencia de un cordón de soldadura introduce un elemento de riesgo tan grande que hace que la falla por fatiga sea mucho más probable.
4. Los cálculos de la Mecánica de la Fractura pronostican un tiempo de vida residual de 3 años y tres meses, con la propagación de una grieta semiéptica superficial hasta la profundidad $a_c = 5,44$ cm en el semieje superior.

Capítulo III





Capítulo III: Rediseño del semieje superior del CAR y pronóstico de la vida por fatiga del semieje rediseñado.

3.1 Mejoramiento de la resistencia a la fatiga del semieje

Si se analiza el plano de taller del semieje se puede observar que hay una longitud de 100 mm después del manguito donde se puede trabajar cambiando las dimensiones de diámetro para mejorar la resistencia sin que roce con nada. Las transiciones ideales reportadas en la literatura (Dobrovolski, 1970), (Roylance 1966), no resultan posible emplearlas en este caso pues ocuparían una longitud en el semieje mayor de 45 cm y abarcarían la zona de colocación del manguito y del cojinete. Se recomienda entonces emplear una transición cónica tal como se muestra en la Fig. 3.1 para la cual el factor de concentración de tensiones es mayor que 1 pero pequeño. Este tipo de transición ofrece la ventaja de que ahora en la zona de la falla, el diámetro es $d = 19,1$ cm y en la zona de empalme del cono con el cilindro, el diámetro es $d = 10$ cm.

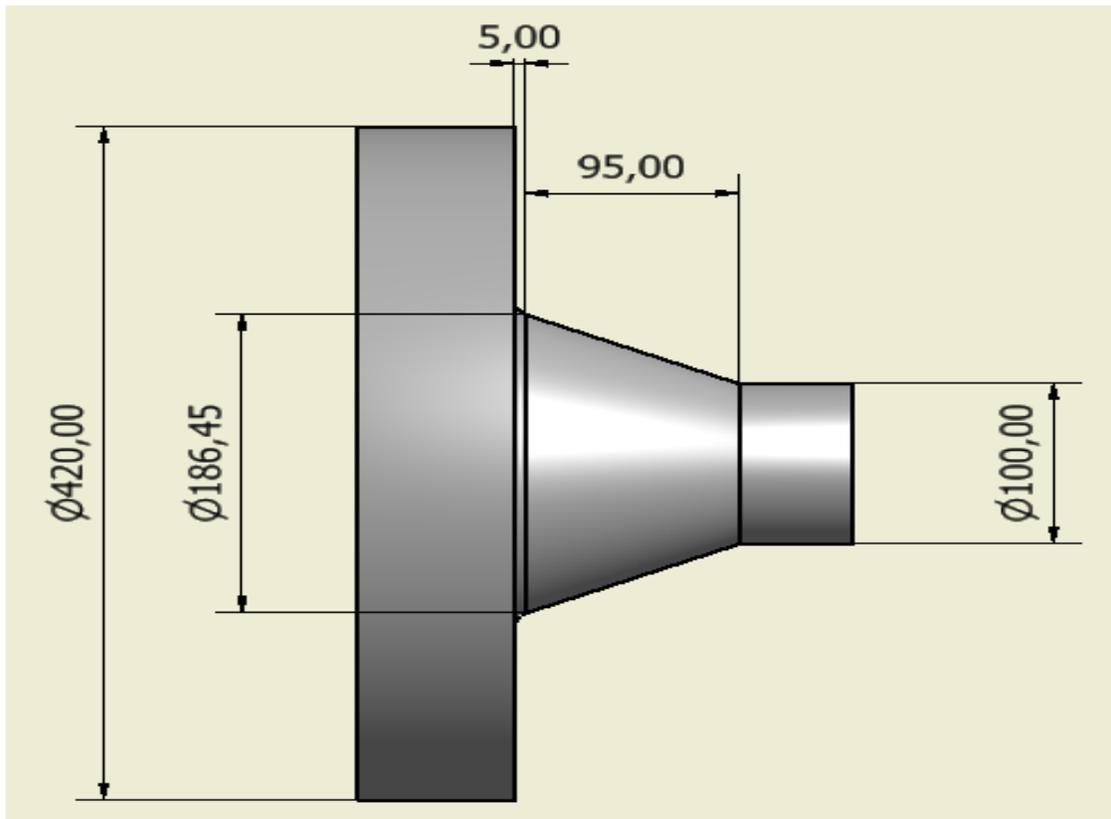


Figura 3.1 Modificación de la sección más peligrosa del semieje superior del CAR. Fuente: Elaboración propia.

3.2 Cálculo de las cargas que provocarían la fractura por fatiga en las nuevas condiciones y de la excentricidad del CAR para que esto ocurra.

Para demostrar que hubo una mejora de resistencia se calcula nuevamente la reacción mínima que puede provocarse en el cojinete para que el semieje falle por fatiga, para lo cual se utiliza la ecuación 2.4. Esta vez se evalúa la reacción en la transición de cilindro – cono y cono – brida. Para los dos casos se utilizan los mismos datos, solamente cambian el diámetro y el factor de concentración de tensiones ().

Para la transición de cilindro – cono se tiene que , , , , y ; dando finalmente por la ecuación 2.4.

Para la segunda transición cambia el diámetro a 19,1 centímetros y para el cálculo de se toma la siguiente ecuación:

El valor de depende de y de y se toma de la tabla de (Feodosiev, 1985). Para el cálculo de se toman los valores del diámetro inicial (d) el diámetro final (D) y el radio de redondeo (ρ) que se le hace al cordón de soldadura para establecer las siguientes proporciones y se busca en el (Goytisolo, 2000)

Donde y dando como resultado final . Por tanto la última reacción da , pero hay que tener en cuenta que esta superficie es soldada y por tanto este factor se ve alterado por la acción de la soldadura. Este cordón de soldadura contiene considerables defectos, por lo que el factor real de concentración de tensiones como mínimo aumenta en un 30 % (Broek, 1983), (Dobrovolski, 1970). En la Tesis de Doctorado de (Hernández, 2005) se demostró que este factor de concentración de tensiones en el caso de cordones transversales como es el analizado, puede crecer hasta .

Se tomará este factor de concentración de tensiones. De donde se obtiene finalmente:

-

Capítulo III: Rediseño del semieje superior del CAR y pronóstico de la vida por fatiga del semieje rediseñado.

Posteriormente se procede con el cálculo de la excentricidad mínima que puede experimentar el CAR por la ecuación 2.5, para que se someta a flexión y lleve al semieje superior a la fractura por fatiga. Las nuevas excentricidades son y para las transiciones cilindro – cono y cono – brida respectivamente, siendo estas casi imposible de llevarse a cabo ya que el radio del rotor es de 3,255 m.

3.3 Cálculo de la vida residual del semieje superior del CAR a partir de la Mecánica de la fractura.

El procedimiento de cálculo es el mismo del capítulo anterior y como nada más hemos alterado el diseño del semieje, algunos valores son iguales. La Tenacidad a la Fractura es igual al diseño anterior (), ya que no depende de la aspectos geométricos sino del material, que en este caso es el mismo.

La tensión límite máxima se calcula por la ecuación 2.6:

Con el mismo procedimiento se construye el gráfico de Resistencia Residual, ahora con un diámetro de 19,1 cm.

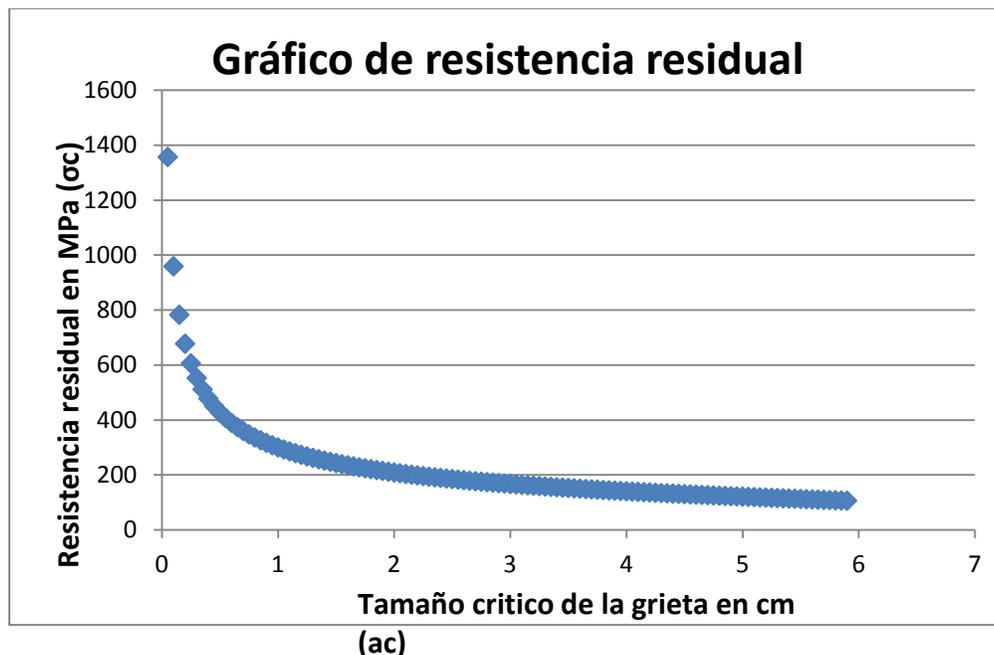


Figura 3.2 Gráfico de Resistencia Residual del nuevo diseño del semieje. Fuente: Elaboración propia.

Capítulo III: Rediseño del semieje superior del CAR y pronóstico de la vida por fatiga del semieje rediseñado.

De la curva de resistencia residual se obtiene que para esta nueva tensión límite máxima ($\sigma_{lim} = 26,398\text{MPa}$), la grieta semielíptica superficial tiene que llegar a una profundidad de $a_c=10,38\text{ cm}$ para provocar la fractura del semieje por fatiga.

Posteriormente se construye la Curva del Crecimiento Subcrítico de la grieta, siguiendo el mismo procedimiento y ajustando los nuevos valores geométricos (Ver Figura 3.3).

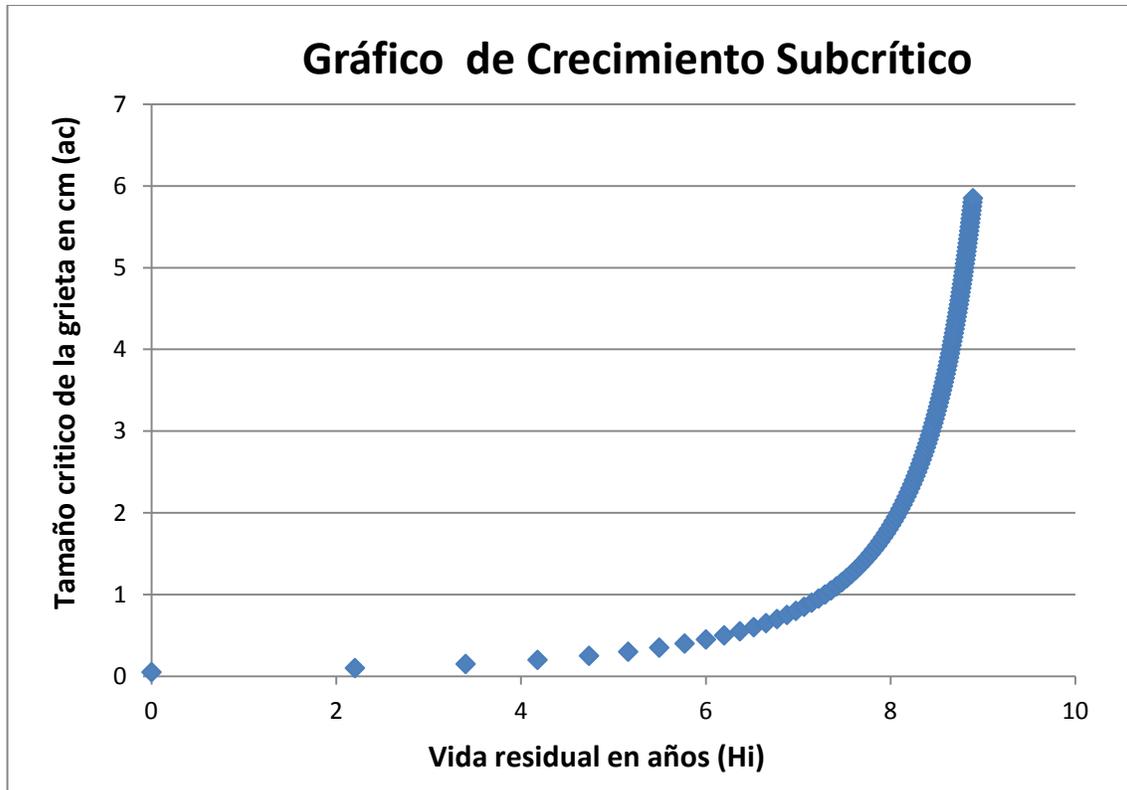


Figura 3.3 Curva del Crecimiento Subcrítico de la grieta. Fuente: Elaboración propia.

Con la ayuda de la curva de la figura 3.3 se pudo determinar que con una grieta semielíptica superficial de profundidad $a_c= 10,38\text{ cm}$ el semieje superior promediará una vida de 9 años y 2 meses.

El aumento significativo de la reacción y del tiempo de vida residual comprueba que con el nuevo diseño del semieje, ver Figura 3.4, es muy difícil que falle por fatiga y por tanto resistirá.

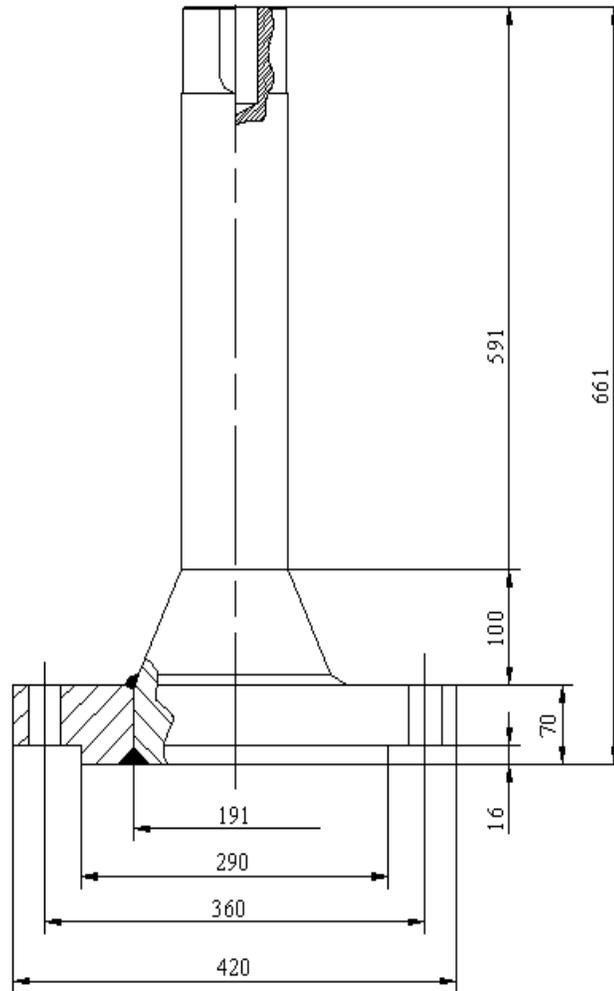


Figura 3.4 Semieje superior con mejora de resistencia. Fuente: Elaboración propia.

3.4 Cálculo del factor de seguridad a la fatiga del árbol con la carga inicial que provocó la fractura en las dos secciones ahora peligrosas.

Para calcular el factor de seguridad en las transiciones antes explicadas se toma la reacción más pequeña en el cojinete que provoca la fractura por fatiga y se utiliza la siguiente ecuación:

Capítulo III: Rediseño del semieje superior del CAR y pronóstico de la vida por fatiga del semieje rediseñado.



Teniendo como datos para la transición cilindro – cono , , , , y , se obtiene como resultado final .

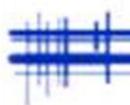
Para la transición cono – brida sólo cambian los valores de , , y quedando como factor de seguridad .

3.5 Conclusiones parciales

1. Se rediseñó el semieje superior de los CAR de la CTE "Carlos M. de Céspedes" modificando la transición desde la zona de ubicación del manguito cónico del cojinete de doble hilera autoalineante superior hasta la zona de la brida donde ocurrió la fractura empleando un cono de transición desde el diámetro de 10 cm hasta un diámetro de 19,1 cm, que es el diámetro máximo posible a emplear que no estorba con la llave para apretar los tornillos de unión de dicha brida con el cuerpo del CAR.
2. La transición cónica no es la ideal para un árbol, sin embargo la transición con radio de redondeo ideal mencionado en la literatura de Diseño de Máquinas es de una longitud de 45 cm y no es posible realizarse por falta de espacio.
3. La vida residual del nuevo diseño del semieje superior se incrementó de 3 a 9 años según los resultados de los cálculos realizados utilizando los métodos de la Mecánica de la Fractura.
4. El cálculo de la resistencia a la fatiga en las dos posibles secciones críticas: En la transición cilindro – cono se obtuvo un factor de seguridad: $n_{\sigma} = 2.81$ y en la transición cono – brida se obtuvo un factor de seguridad $n_{\sigma} = 5.01$

Conclusiones

Generales



Conclusiones Generales

Conclusiones Generales

1. Como resultado de la revisión bibliográfica se logró caracterizar a los Calentadores de Aire Regenerativos empleados en las Centrales Termoeléctricas: su estructura, funcionamiento, distintos tipos empleados, etc.
2. La fractura de los semiejes superiores es por fatiga y la hipótesis es que ocurren debido a la aparición de grandes fuerzas radiales en el cojinete superior por el desbalanceo del CAR.
3. Se realiza un nuevo diseño del semieje superior del CAR con la utilización de una transición cónica desde de la brida al cilindro para mejorar la resistencia a la fatiga.
4. El cálculo de la resistencia a la fatiga del semieje superior diseñado en las dos posibles secciones críticas: transición cilindro – cono y transición cilindro – brida, se obtuvo un factor de seguridad: $n_{\sigma} = 2.81$ y $n_{\sigma} = 5.01$ respectivamente, demostrando así que el nuevo semieje resistirá a la fractura a menos que el CAR sufra una excentricidad mayor que 0,18 m producto del desbalance que provoquen la distribución de los cestos.
5. Según la Mecánica de la Fractura el nuevo diseño del semieje superior del CAR durará aproximadamente 9 años y 2 meses hasta que se fatigue por el desarrollo de una grieta semielíptica superficial ya con un tamaño $a_c=10,38$ cm.
6. El semieje superior del CAR se fabricó con el nuevo diseño y está montada en el CAR de la CTE "Carlos M. de Céspedes" desde octubre de 2013 sin averías, la CTE avaló la introducción con un impacto económico de 166 459, 84 CUC. La investigación fue reconocida como Premio Provincial de Innovación Tecnológica Destacada del CITMA en el año 2014, obtuvo en la UCf el Premio al Trabajo Científico ya Aplicado de Mayor impacto Económico del año 2014 y fue premiado de Destacado en el XXII Fórum Nacional de Estudiantes Universitarios de Ciencias Técnicas, además de poseer varias publicaciones científicas.

Recomendaciones

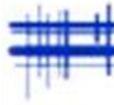


Recomendaciones

Recomendaciones

- Aplicar un análisis ultrasónico al semieje superior diseñado para comprobar si no quedó ningún defecto en la construcción y soldadura. En caso de quedar algún defecto utilizar líquidos penetrantes para dar solución al problema.
- A partir del análisis de la bibliografía modelar utilizando el software COMSOL el CAR de la CTE de Cienfuegos.
- Utilizar el procedimiento diseñado en este proyecto para futuras investigaciones relacionadas con los CAR.

Bibliografía



Bibliografía

- Borsig. (1976). Manual operación y mantenimiento de precalentadores de aire Ljungstrom.
- Broek, D. (1983). Fracture Mechanics. USA: Institute of the Chemical Process Industries. Inc. 571 p.
- Büyükalaca O. & Yilmaz, T. (2003). Design of Regenerative Heat Exchangers. 24: 32-38.
- Central Termoeléctrica Cienfuegos. (1980). Normas de operaciones de calderetas unidades japonesas.
- Dobrovolski, V. (1970). Elemento de máquinas. Moscú: Editorial MIR. 693p.
- Feodosiev, V.I. (1985). Resistencia de Materiales. Moscú: Editorial MIR.
- Fitzgerald F. (1996). Mecánica de Materiales. México: Editorial Alfa Omega S.A. de C.V. 560 p.
- Foreman, R. G., Kearney, V. E. & Engle, R. M. (1987). Numerical Analysis of Crack Propagation in Cyclic-Loaded Structures", Journal of Basic Engineering, 89: 459-464.
- Ghodsipour, N. & Sadrameli, M.. (2003). Experimental and sensitivity analysis of a rotary air preheater for the flue gas heat recovery," Applied Thermal Engineering. 23: 571-580.
- Goytisoló Betancourt, E. R. (1998). Teoría y aplicaciones de la Mecánica de la Fractura al análisis de fallas en piezas de máquinas. Trabajo de Diploma. Cienfuegos: Universidad de Cienfuegos. 133h.
- Goytisoló R. (2000). Utilización de la Mecánica de la Fractura en el análisis de fallas industriales. Folleto Curso de la Maestría en Mecánica Aplicada de la UCF.
- Hernández, H. (2005). Desarrollo y perfeccionamiento de las expresiones para el cálculo de las tensiones máximas en las uniones soldadas con costuras de filete. Tesis de Doctorado. UCF.117 h.
- Kaushik Krishna, R., Rahul Ramachandran, P. (2011). Srinivasan Heat Transfer Modeling and Analysis of a Rotary Regenerative Air Pre-heater, Conference in Bangalore.

Bibliografía

- Kern, J. (1974). Heat transfer in a rotary heat exchanger," International Journal of Heat and Mass Transfer,. 17: 981-990.
- Khairul, Alam. (2007). Heat Transfer Analysis and Experiments with Energy Recovery Ventilator , Proceedings of the World Congress on Engineering 2007 Vol II, London.
- Mondt, J. R. (1964). Vehicular Gas Turbine Periodic Flow Heat Exchanger Solid and Fluid Temperature Distributions. J. Eng. Power,86: 121-126.
- Mukanov K. (1968). Design of Metal Structures. Moscú: Editorial MIR. 517 p.
- Ortega, F., Menéndez, C., Ordieres, J., & Monteguín, V. (2000). Analysis of Heat Transference in Regenerative Exchanger of Thermal Power Plant**" Neutral Computing & Applications, Springer-Verlag, London.
- Pisarenko, G.S., Yakovlev, A.P. & Matveev, V.K. (1989). Manual de Resistencia de Materiales. Moscú: Editorial MIR. 693 p.
- Prieto, I. (2010). Centrales Termoeléctricas, Circuitos de Aire – Humos.
- Rodriguez, T. (2010). Metodologías a considerar para la aplicación del mantenimiento por diagnóstico de los Calentadores de Aire Regenerativos de Centrales Termoeléctricas.
- Roylance, T.F. (1966). Engineering Design. Great Britain: Pergamon Press. 345 p.
- Shah, R. (1975). A Correlation for Longitudinal Heat Conduction Effects in Periodic-Flow Heat Exchangers," International Journal of Engineering for Power. 453-454.
- Shah, Ramesh K. (2003). Termal Design Theory for Regenerators Fundamentals of heat energy design. New Jersey: John Wiley & Sons. Hoboken.
- Skiepko, T. (1988). Method of monitoring and measuring seal clearances in a rotary heat exchanger. Heat Recovery Systems and CHP. 8: 469-473.
- Wang H. (2009). Analysis on thermal stress deformation of rotary air-preheater in a thermal power plant. Korean J. Chem. Eng, 26: 833-839.

Anexos



Anexos

Anexo 1 Análisis de regresión. Fuente: Elaboración Propia. Temperatura adimensional del aire en función de las coordenadas altura y radio

ModelSummary^b

| Model | R | R Square | Adjusted R Square | Std. Error of the Estimate |
|-------|-------------------|----------|-------------------|----------------------------|
| 1 | ,986 ^a | ,972 | ,966 | ,06477648 |

a. Predictors: (Constant), ra2, za, ra

b. Dependent Variable: tadaire

ANOVA^a

| Model | | Sum of Squares | df | Mean Square | F | Sig. |
|-------|------------|----------------|----|-------------|---------|-------------------|
| 1 | Regression | 2,056 | 3 | ,685 | 163,347 | ,000 ^b |
| | Residual | ,059 | 14 | ,004 | | |
| | Total | 2,115 | 17 | | | |

a. Dependent Variable: tadaire

b. Predictors: (Constant), ra2, za, ra

Coefficients^a

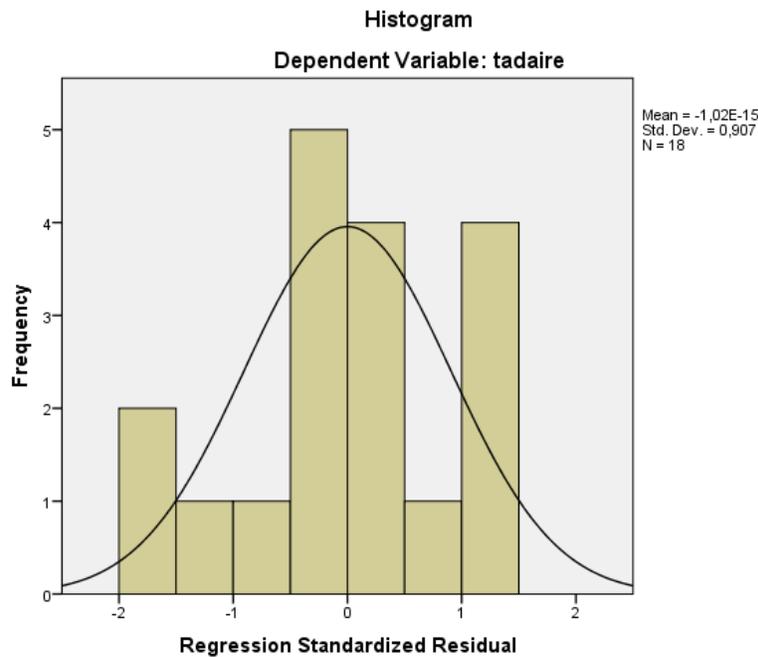
| Model | | Unstandardized Coefficients | | Standardized Coefficients | t | Sig. |
|-------|------------|-----------------------------|------------|---------------------------|--------|------|
| | | B | Std. Error | Beta | | |
| 1 | (Constant) | ,154 | ,101 | | 1,527 | ,149 |
| | Ra | -1,213 | ,677 | -,495 | -1,791 | ,095 |
| | Za | ,939 | ,043 | ,975 | 21,861 | ,000 |
| | ra2 | 2,058 | 1,021 | ,556 | 2,015 | ,064 |

a. Dependent Variable: tadaire

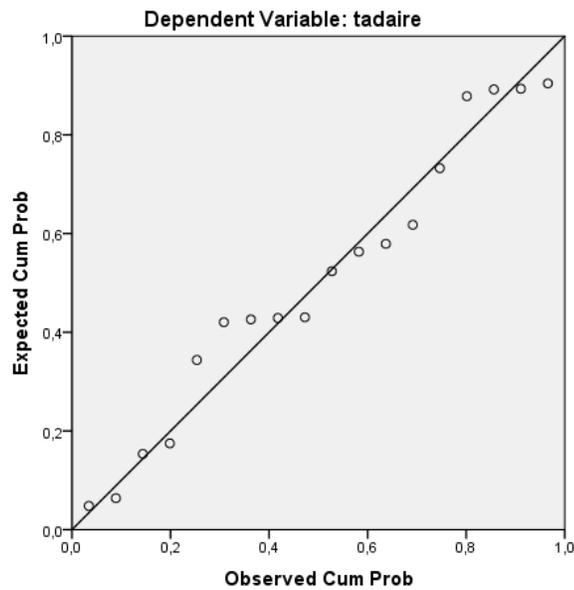
| ResidualsStatistics ^a | | | | | |
|-----------------------------------|------------|-----------|-----------|----------------|----|
| | Minimum | Maximum | Mean | Std. Deviation | N |
| PredictedValue | -,0074171 | ,9198407 | ,4739138 | ,34778375 | 18 |
| Std. PredictedValue | -1,384 | 1,282 | ,000 | 1,000 | 18 |
| Standard Error of Predicted Value | ,024 | ,042 | ,030 | ,005 | 18 |
| AdjustedPredictedValue | -,0130140 | ,8979816 | ,4726651 | ,34398510 | 18 |
| Residual | -,10782815 | ,08459270 | 0E-8 | ,05878370 | 18 |
| Std. Residual | -1,665 | 1,306 | ,000 | ,907 | 18 |
| Stud. Residual | -1,822 | 1,607 | ,008 | 1,027 | 18 |
| Deleted Residual | -,12911908 | ,13448022 | ,00124868 | ,07583591 | 18 |
| Stud. Deleted Residual | -2,010 | 1,715 | ,004 | 1,081 | 18 |
| Mahal. Distance | 1,453 | 6,041 | 2,833 | 1,335 | 18 |
| Cook'sDistance | ,000 | ,432 | ,075 | ,107 | 18 |
| CenteredLeverageValue | ,085 | ,355 | ,167 | ,079 | 18 |

a. Dependent Variable: tadaire

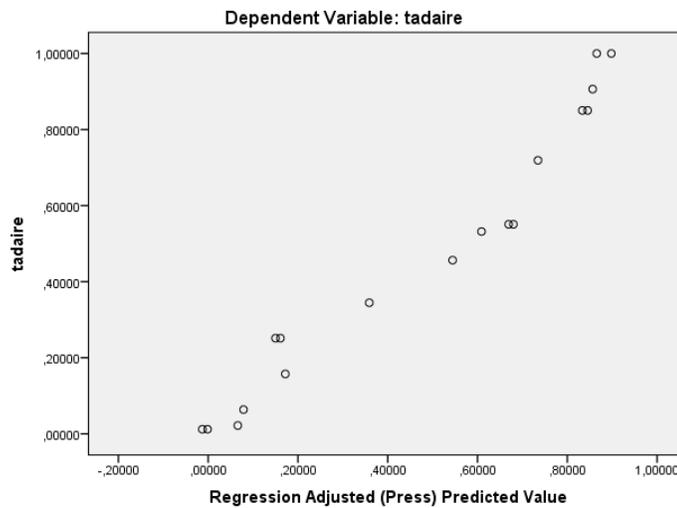
Charts



Normal P-P Plot of Regression Standardized Residual



Scatterplot



Temperatura adimensional del gas en función de las coordenadas altura y radio.

ModelSummary^b

| Model | R | R Square | Adjusted R Square | Std. Error of the Estimate |
|-------|-------------------|----------|-------------------|----------------------------|
| 1 | ,875 ^a | ,766 | ,731 | ,13913893 |

Anexos

a. Predictors: (Constant), r2, z, r

b. Dependent Variable: tadgas

ANOVA^a

| Model | | Sum of Squares | df | Mean Square | F | Sig. |
|-------|------------|----------------|----|-------------|--------|-------------------|
| 1 | Regression | 1,266 | 3 | ,422 | 21,792 | ,000 ^b |
| | Residual | ,387 | 20 | ,019 | | |
| | Total | 1,653 | 23 | | | |

a. Dependent Variable: tadgas

b. Predictors: (Constant), r2, z, r

Coefficients^a

| Model | | Unstandardized Coefficients | | Standardized Coefficients | t | Sig. |
|-------|------------|-----------------------------|------------|---------------------------|--------|------|
| | | B | Std. Error | Beta | | |
| 1 | (Constant) | 2,268 | 1,267 | | 1,790 | ,089 |
| | r | -5,165 | 3,266 | -2,863 | -1,581 | ,129 |
| | z | ,599 | ,086 | ,839 | 6,989 | ,000 |
| | r2 | 3,471 | 2,018 | 3,096 | 1,720 | ,101 |

a. Dependent Variable: tadgas

Residuals Statistics^a

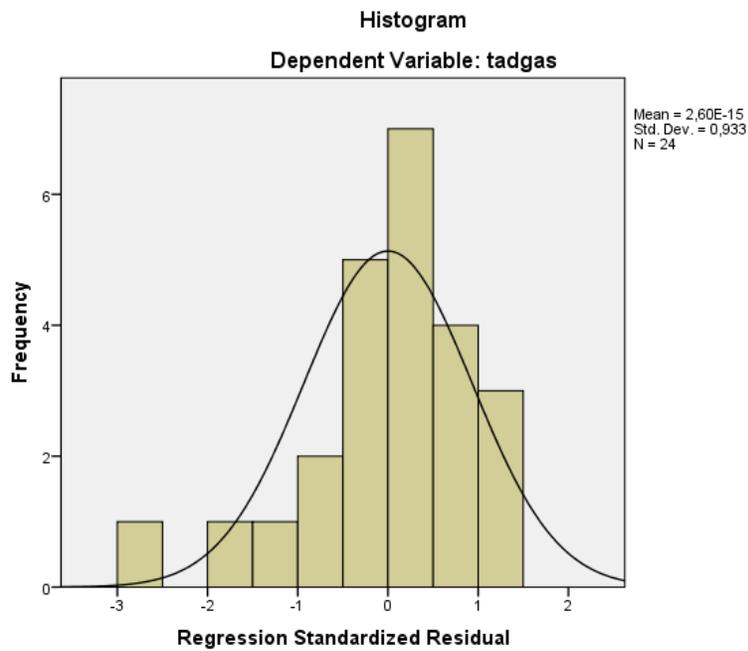
| | Minimum | Maximum | Mean | Std. Deviation | N |
|-----------------------------------|------------|-----------|------------|----------------|----|
| Predicted Value | ,3951776 | 1,1719812 | ,7107107 | ,23458207 | 24 |
| Std. Predicted Value | -1,345 | 1,966 | ,000 | 1,000 | 24 |
| Standard Error of Predicted Value | ,046 | ,076 | ,056 | ,009 | 24 |
| Adjusted Predicted Value | ,4197212 | 1,2430304 | ,7114023 | ,24016266 | 24 |
| Residual | -,36514756 | ,20789820 | 0E-8 | ,12974772 | 24 |
| Std. Residual | -2,624 | 1,494 | ,000 | ,933 | 24 |
| Stud. Residual | -2,832 | 1,587 | -,002 | 1,017 | 24 |
| Deleted Residual | -,42517519 | ,23460717 | -,00069155 | ,15470752 | 24 |
| Stud. Deleted Residual | -3,566 | 1,655 | -,036 | 1,127 | 24 |

Anexos

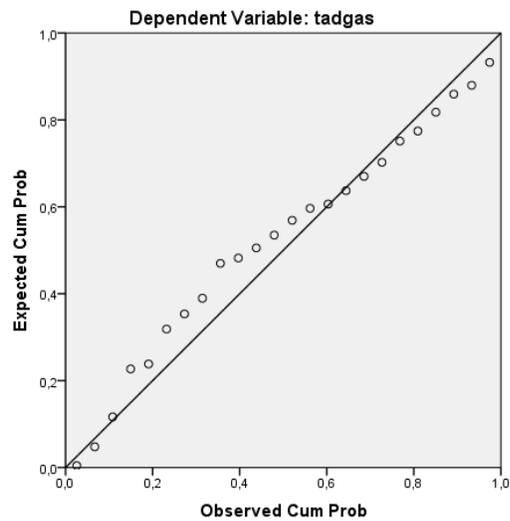
| | | | | | |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|----|
| Mahal. Distance | 1,535 | 5,936 | 2,875 | 1,344 | 24 |
| Cook'sDistance | ,000 | ,330 | ,048 | ,079 | 24 |
| CenteredLeverageValue | ,067 | ,258 | ,125 | ,058 | 24 |

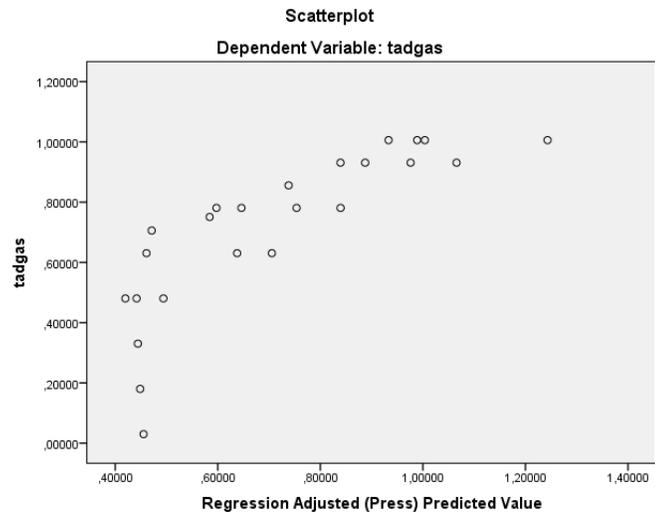
a. Dependent Variable: tadgas

Charts



Normal P-P Plot of Regression Standardized Residual

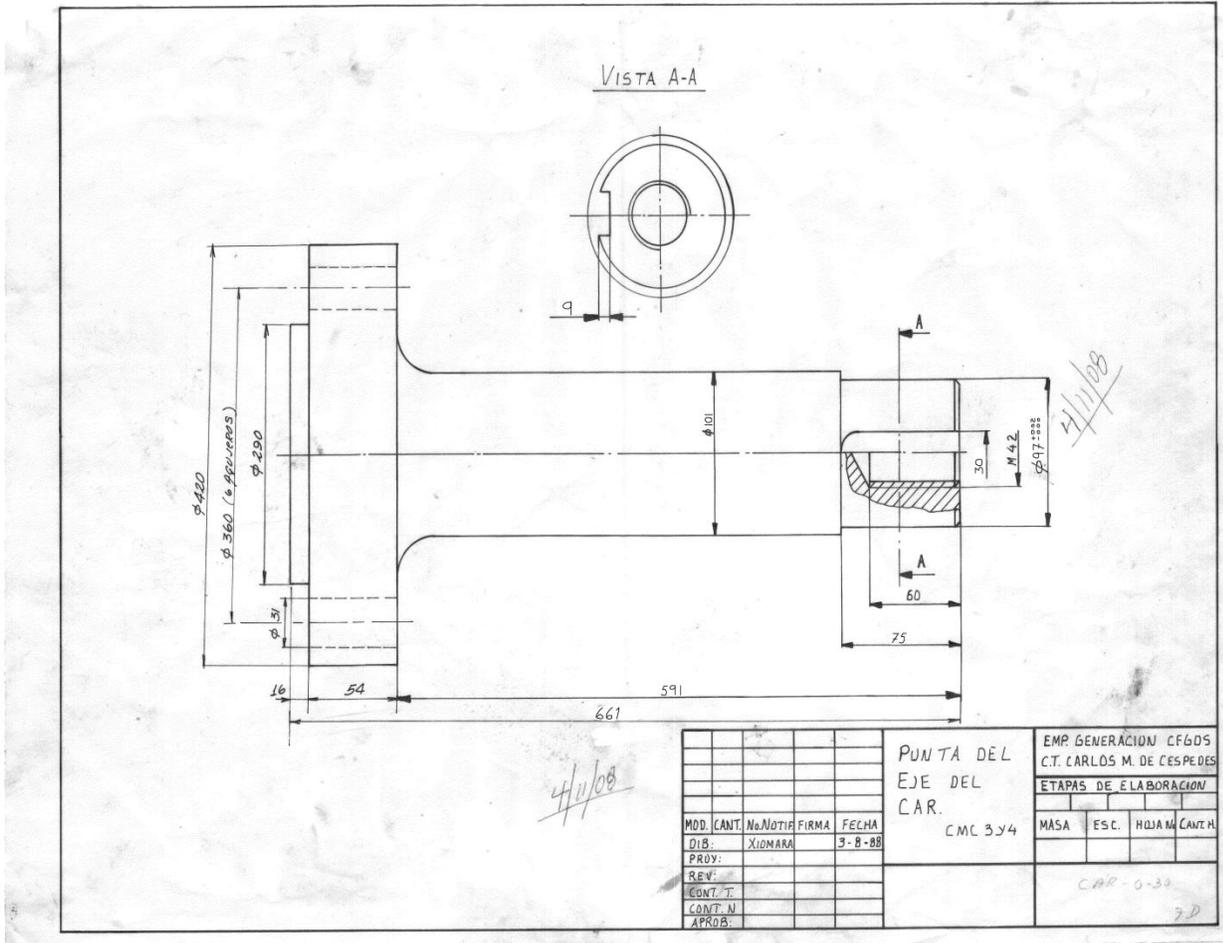




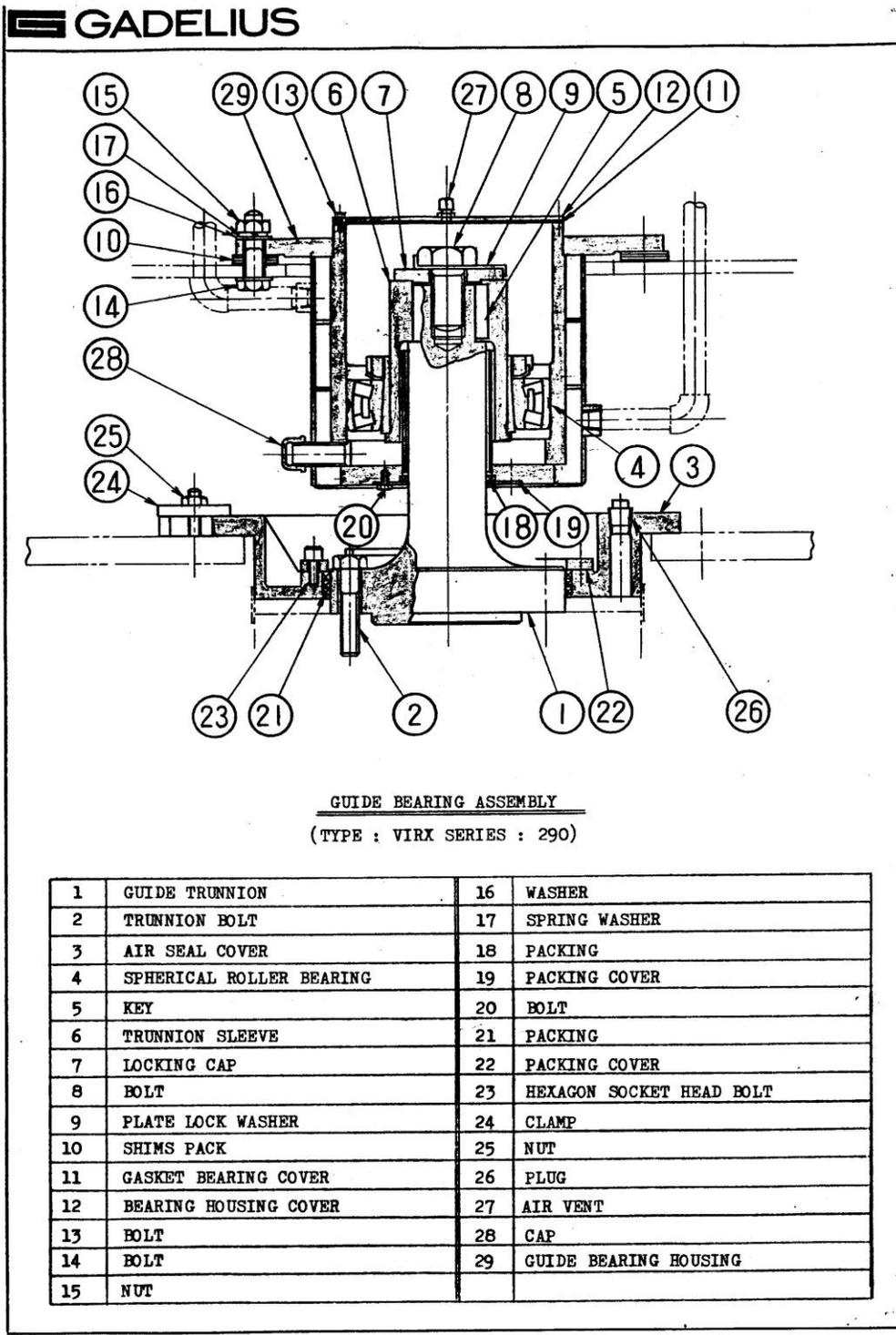
Anexos

Anexo 2: Plano del semieje superior del Car de la unidad CMC 3.

Fuente: CTE CMC.

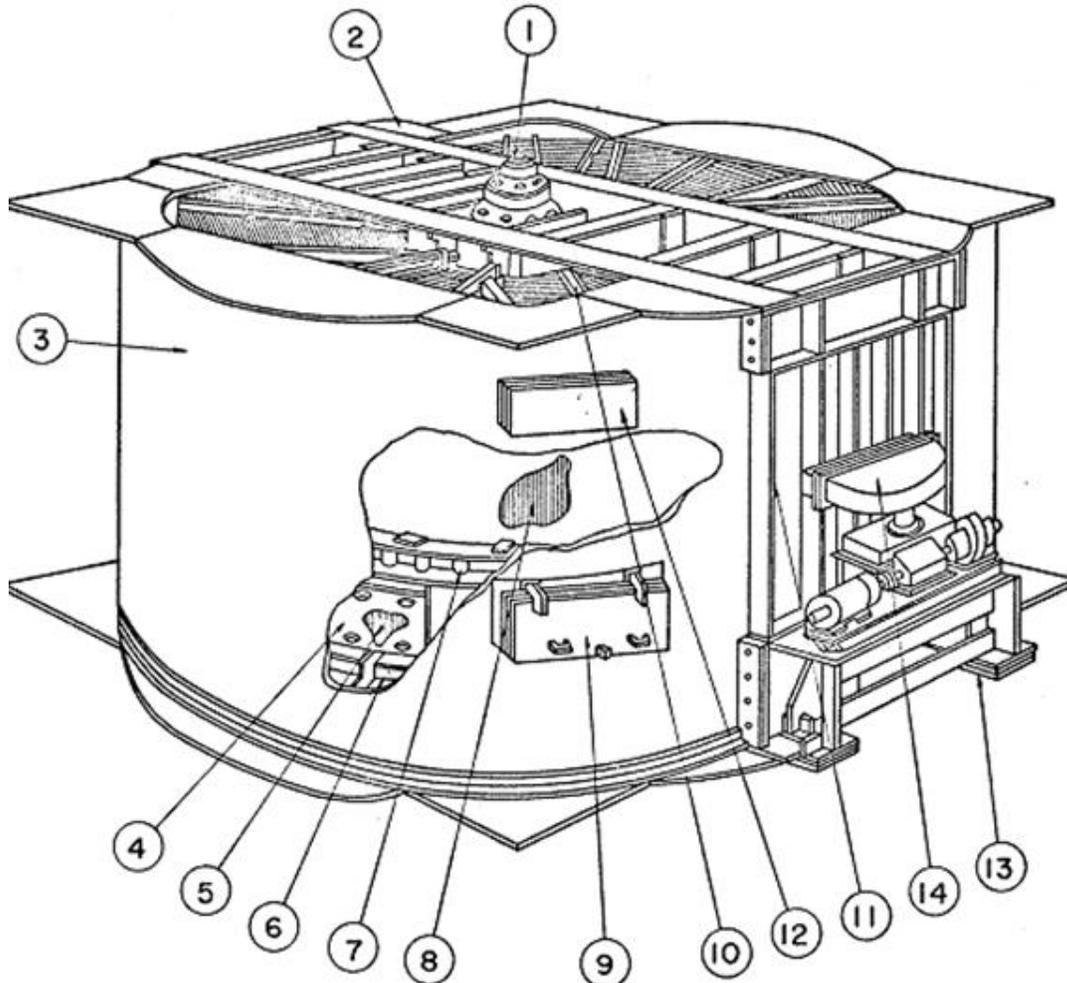


Anexo 3: Conjunto de rodamiento y soporte del semieje superior del Car de la unidad CMC 3. Fuente: CTE CMC.



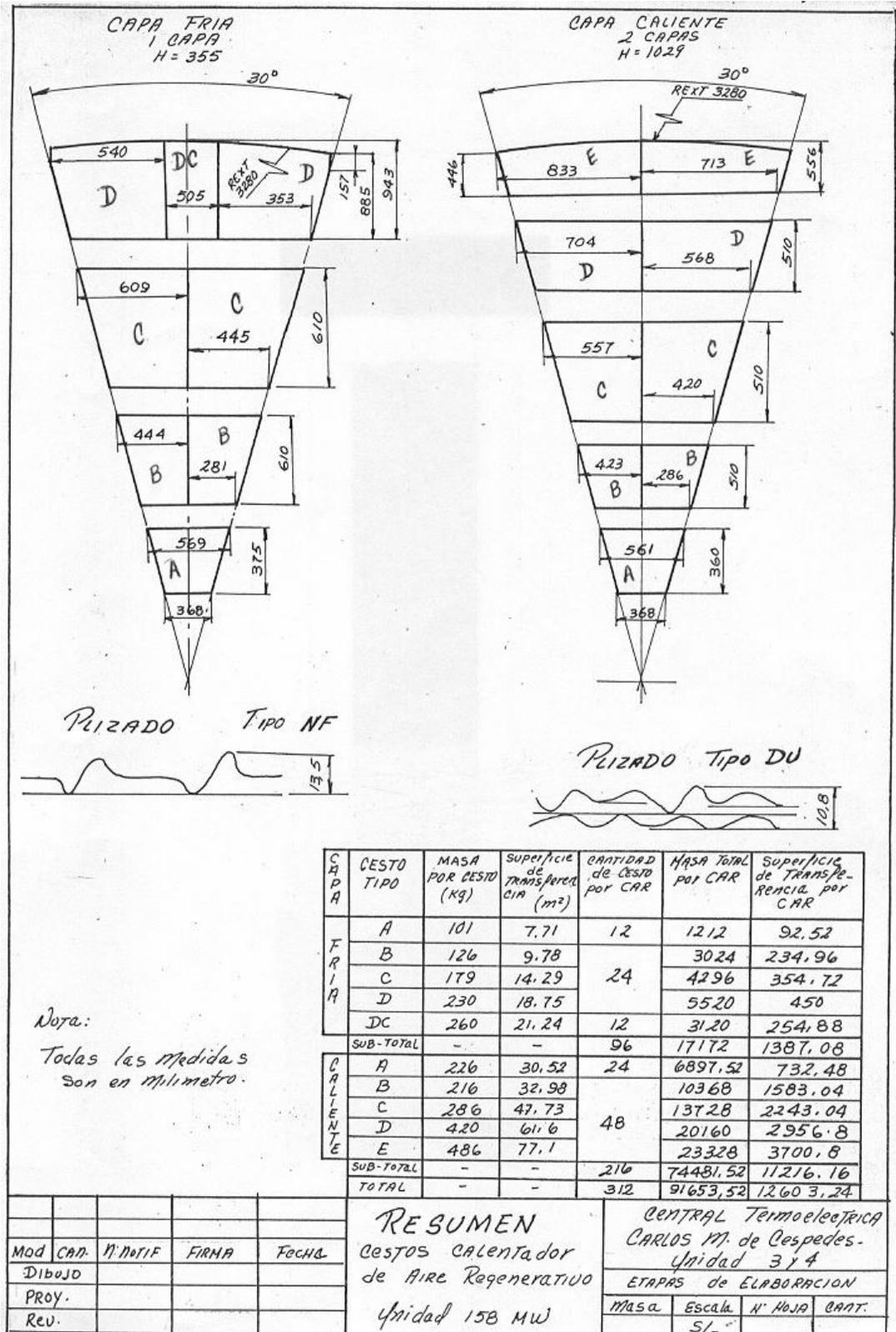
Anexo 4: Partes Calentador del Aire Regenerativo Ljungström.

Fuente: CTE CMC.



| | | | |
|---|--|----|--------------------------------|
| 1 | guía que aguanta el eje | 8 | Elemento calefactor (caliente) |
| 2 | Sector de placa | 9 | Puerta de retiro de cestos |
| 3 | cubierta de rotor | 10 | Cello radial |
| 4 | tapa de retiro de cestos | 11 | Pedestal principal |
| 5 | Elemento calefactor (frío) | 12 | tapa de acceso al sello |
| 6 | Sello circunferencial | 13 | Pie de apoyo |
| 7 | Bastidor de PIN por donde entra el mov. al rotor | 14 | Reductor |

Anexo 5: Plano de los cestos del CAR. Fuente: CTECMC.



Anexo 6: Vista real del semieje superior del CAR de la unidad CMC 3.

Fuente: CTE CMC.



Anexo 7: Vista real del Car de la unidad CMC 3. Fuente: CTE CMC.

