

Reducción de Averías en una Termoeléctrica por Sustitución del Material de los Tubos del Sobrecalentador Secundario

Failure reduction in a thermoelectric by substituting the materials used in the secondary Over-heater tubes

DOI: 10.17981/ijmsor.02.01.02

Research Article - Reception Date: November 15, 2016 - Acceptance Date: December 12, 2016

Rafael Goytisoló Espinosa

Universidad de Cienfuegos. Facultad de Ingeniería. Grupo de Investigación CEEDON
Cienfuegos, Cuba, ragoyti@ucf.edu.cu.

Hernán Hernández Herrera

Universidad de la Costa. Facultad de ingeniería. Grupo de investigación GIOPEN
Barranquilla, Colombia, hhernand16@cuc.edu.co

Leonel Martínez Díaz

Universidad Simón Bolívar. Centro de Crecimiento Empresarial
Barranquilla, Colombia, v.martinez@unisimonbolivar.edu.co.

To reference this paper:

R. Goytisoló Espinosa, H. Hernández Herrera and L. Martínez Díaz. "Reducción de averías en una termoeléctrica por sustitución del material de los tubos del sobrecalentador secundario" IJMSOR, vol. 2, no. 1, pp. 9-15, 2017. DOI: 10.17981/ijmsor.02.01.02

Resumen-- Las fallas por creep de los tubos de los generadores de vapor están presentes en la totalidad de las Centrales Termoeléctricas del mundo. En la Central Termoeléctrica "Carlos Manuel de Céspedes" de Cienfuegos, Cuba; está previsto un Proyecto de transformar una de las Unidades Japonesas de la Central para la quema de gas. Esto implicará el aumento de la temperatura de trabajo de la unidad, por lo que existirá mayor probabilidad de fallas por creep. En el presente trabajo se evalúa cuan rentable es la sustitución de toda la tubuladura del Sobrecalentador Secundario, que es donde ocurre el mayor número de averías por creep, por el acero SA 213 T91 que posee un comportamiento excepcional desde el punto de vista de la vida por creep, con vistas a reducir los gastos por averías y elevar la capacidad de producción de energía eléctrica de la Central haciéndola mucho más rentable.

Palabras claves-- Falla por creep, sobrecalentador secundario, ahorro en el ciclo de vida, elevación de la capacidad de generación, efectividad financiera y social.

Abstract-- Creep failure in the tubes of steam boilers is present in the totality of thermoelectrics in the world. In the thermoelectric "Carlos Manuel de Céspedes" of the province of Cienfuegos in Cuba; it is foreseen a project to transform one of the Japanese units from operating with diesel to natural gas. This will implicate an increase in the working temperature of the unit which will lead to an increment in probability of happening Creep failures. In this paper is evaluated how profitable is replacing all the tubes in the secondary overheater, where takes place most of Creep failures, due to the stainless steel SA 213 T91 that has an exceptional behavior from the point of view of Creep life, aiming to reduce expenses by failures and to increase the capacity of electric energy production of the thermoelectric making it more profitable..

Keywords-- Creep failure, secondary overheater, savings in life cycle cost, generation capacity increase, social and financial effectiveness.

I. INTRODUCCIÓN

En los trabajos [1-2] se elaboró una metodología que permite pronosticar la vida útil por creep de los tubos de los Generadores de Vapor, en dicho trabajo se realizó el pronóstico de la vida, con el acero actualmente más utilizado, en los tubos de la CTE "Carlos M. de Céspedes" el AISI 210 A1; utilizando la Norma ISO/TR 7468-1981 [3], obteniéndose que para una temperatura $T=500^{\circ}\text{K}$ el pronóstico de vida arroja un valor de $4,5 \times 10^{10}$ horas. En el Evento Científico Creep 2012 celebrado en Mayo de 2012 en Kyoto y artículos publicados en revistas los autores se refieren al empleo del acero con un 9% de cromo y 1% de Molibdeno, AISI 213 T91 [4]-[10]. Ello motivó que se realizara el pronóstico en la CTE "Carlos M. de Céspedes" para este tipo de acero, obteniéndose que para una temperatura de 600°K , que es la temperatura nominal de las calderas de esta planta para un 100% de carga, la vida de los tubos con este acero puede llegar a ser de 5×10^{11} horas, o sea, un pronóstico de vida muy superior a la del otro acero. Este acero por supuesto es mucho más caro que el AISI 210 A1 el cual cuesta 2 552,864 USD/t mientras que el AISI 213 T91 cuesta 7 323,9538 USD/t, pero este último posee una vida varias veces superior lo que permitió formular la Hipótesis de que la sustitución debe ser rentable dada la enorme reducción de las averías que se esperan, por el hecho de prolongar tanto la vida de los tubos. En el trabajo [11]- [13] se determinó que la avería de un solo tubo de una de las calderas de la CTE implica un costo de 13 419,13 USD y en los más de 30 años de existencia de la CTE "Carlos M. de Céspedes" se han perdido más de 4 millones de USD solo por el concepto de tubos averiados, sin considerar las pérdidas que representa esta situación en la eficiencia de la Central. Estas enormes pérdidas sumado al proyecto actual de la Central Termoelectrica "Carlos M. de Céspedes" de preparar una de las dos unidades japonesas para la quema de gas, lo cual implica que la temperatura de los tubos aumente debido a que la quema de gas incrementa la temperatura de la caldera por encima de los 600°K y la probabilidad de falla por creep aumenta, ha motivado la idea de profundizar en este análisis técnico económico; para ello se utilizará el Criterio del Costo del Ciclo de Vida, criterio muy utilizado en la actualidad para evaluar diferentes variantes de equipos o sistemas simples, que forman parte de un sistema mucho más complejo, como puede ser una Central Termoelectrica y en los cuáles resulta prácticamente imposible determinar los flujos netos de caja; producto de la imposibilidad de determinar el valor de la producción realizada por ese equipo o sistema particular dentro del sistema general que es la producción global de la planta. En el presente trabajo se pretende evaluar cuanto se reduce el Costo del Ciclo de Vida del Sobrecalentador Secundario, que es donde se produce el mayor

número de averías por creep de cualquiera de las dos unidades japonesas, mediante la utilización del acero AISI 213 T91 con el objetivo de proponer este cambio de material.

II. METODOLOGÍA.

Un criterio muy utilizado en la actualidad para evaluar diferentes variantes de equipos o sistemas simples, que forman parte de un sistema mucho más complejo, como puede ser una Central Termoelectrica y en los cuáles resulta prácticamente imposible determinar los flujos netos de caja es el Criterio del Costo del Ciclo de Vida [14-17]. El CCV no es más que una variante del VAN en la cual se consideran, los costos en que se incurre durante toda la vida útil del equipo o sistema, donde están incluidos los gastos de la inversión inicial y todos los demás gastos en la vida del equipo o sistema, de manera que la variante para la cual el CCV sea menor es la más rentable. El CCV se puede obtener a través de la ecuación 1.

$$\text{CCV} = I + \sum_{i=1}^N \text{En}_i \left(\frac{1}{1+d_e} \right)^i + \sum_{i=1}^N \text{OM}_i \left(\frac{1}{1+d} \right)^i + \sum_{i=1}^N \text{R}_i \left(\frac{1}{1+d} \right)^i - \text{VR} \left(\frac{1}{1+k} \right)^N \quad (1)$$

Donde:

I es el costo de la Inversión Inicial con el equipo instalado, En_i es el costo anual de la energía consumida en el año i , OM_i es el costo anual de operación y mantenimiento (sin incluir la energía) en el año i ,

R_i es el costo anual de reparación en el año i ,

VR es el valor residual al concluir la vida de servicio.

d . Es la tasa neta de descuento ajustada a la inflación.

d_e . Es la tasa neta de descuento ajustada a la inflación de la energía.

Los términos d y d_e se obtienen a través de las ecuaciones 2 y 3.

$$d = \frac{k - i}{1 + i} \quad (2)$$

$$d_e = \frac{k - i_e}{1 + i} \quad (3)$$

Donde:

k es la tasa de retorno anual de la inversión

i es la tasa de inflación general.

i_e es la tasa de inflación aplicable a la energía.

En el caso de que los costos anuales de la energía, operación, mantenimiento y reparación sean constantes en la vida de servicio (1), puede escribirse como se muestra en (4),

En el caso de que los costos anuales de la energía, operación, mantenimiento y reparación sean constantes en la vida de servicio la ecuación 1, puede escribirse como se muestra en (4).

$$CCV = I + E_n \frac{(1+d_e)^N - 1}{d_e(1+d_e)^N} + (OM + R) \frac{(1+d)^N - 1}{d(1+d)^N} - VR \left(\frac{1}{1+k} \right)^N \quad (4)$$

Para obtener el costo de la inversión con el equipo instalado (I) es necesario calcular y sumar los costos de los materiales requeridos para la instalación (M), los de la mano de obra para cada una de las actividades propias de instalación asociadas a estos materiales (Lc) y el costo de las operaciones de ajuste y puesta en marcha del equipo (Le), como se muestra en (5).

$$I = E_q + M + L_c + L_e \quad (5)$$

En el caso analizado

Eq: es la Caldera que no varía para una u otra variante de las que serán analizadas,

M: es el costo de los materiales que es el objeto de estudio de esta investigación es diferente para cada una de las variantes de tubos a emplear,

Lc: los costos de la mano de obra para cada una de las actividades propias de instalación asociadas a estos materiales

Le: el costo de las operaciones de ajuste y puesta en marcha del equipo que son independientes del material que se emplee.

La expresión (4) se adecuará al objetivo de esta investigación en base a las siguientes premisas:

- El costo de Inversión Inicial se diferenciará como sigue: I_{MO} Inversión material original, I_{NM} Inversión nuevo material.
- El costo de la energía se considerará independiente del material de los tubos.
- El costo de operación y mantenimiento no asociado a las averías de los tubos es el mismo, o sea: OM es constante para todas las variantes de materiales de los tubos.
- El costo de reparación no asociado a las averías de los tubos no se considerará por ser independiente del material de estos. Solo se considerará el costo de reparación asociado a la reparación de los tubos averiados que se diferenciará
- Para uno u otro material como sigue $R_{Material\ Original}$ y $R_{Nuevo\ Material}$.
- En el valor residual VR al concluir la vida de servicio se considerarán las diferencias pues el nuevo material es más caro. Se diferenciarán como sigue: $VR_{Material\ Original}$ y $VR_{Nuevo\ Material}$.

Sobre la base de que existen muchos costos que son independientes del material que se utilice en los tubos de las calderas en el presente trabajo se utilizará un nuevo criterio: El Ahorro en el Ciclo de Vida (ACV).

Se elegirá conservadoramente un Ciclo de Vida de $N=15$ años que es la mitad del Ciclo de Vida de una Central Termoeléctrica cuya tubuladura es nueva. El cálculo del ahorro en el ciclo de vida se determina a través de la (6):

$$ACV = CCV_{MO} - CCV_{NM} \quad (6)$$

$$ACV = (I_{MO} - I_{NM}) + (R_{MO} - R_{NM}) \frac{(1+d)^N - 1}{d(1+d)^N} - (VR_{MO} - VR_{NM}) \left(\frac{1}{1+k} \right)^N$$

Donde: MO es el Material Original y NM el Nuevo Material.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el trabajo se tomó una tasa de retorno anual de la inversión de $k=0,2$ y una tasa de inflación general $i=0,028$, donde según la ecuación $d=0,167$. Se consideró $i = i$. Para obtener la inversión inicial con cada material hay que conocer el precio/t de cada acero y las toneladas de acero que se requieren. En el Proyecto de Quema de Gas se incluyen tubos de acero AISI 212 T12, AISI 213 T22 similares desde el punto de vista de la vida por creep que el acero AISI 210 A1 según los datos de la Norma ISO/TR 7468-1981 y algunos tubos del acero AISI 213 T91, de comportamiento muy superior.

Los precios por tonelada de estos aceros son los que se muestran en la tabla.1.

TABLA 1. PRECIO POR TONELADA DE LOS ACEROS ANALIZADOS CUC/T

| Marca del acero | Precio en CUC por tonelada (CUC/t) |
|-----------------|------------------------------------|
| AISI 213 T12 | 3 330 |
| AISI 213 T22 | 4 227 |
| AISI 213 T91 | 7 324 |

SOURCE:

En el período desde el 1998 hasta el 2008 en la Unidad Japonesa designada como CMC 3 se produjeron un total de 32 averías por tubos punchados: 21 de ellas ocurrieron en el Sobrecalentador Secundario, 5 en las Paredes de Agua, 3 en el Recalentador, 1 en el Sobrecalentador Primario, 1 en el Deaireador y 1 en el Condensador. O sea en el Sobrecalentador Secundario ocurren actualmente 2 averías por año como promedio por lo que en el presente trabajo se evaluará sólo el Sobrecalentador Secundario que es el más propenso a las fallas por creep, ya que es el primero que recibe a los gases calientes del horno y su temperatura es más alta Las toneladas de acero que se requieren para el Sobrecalentador Secundario, según el Proyecto de Quema de Gas, se muestran en la tabla 2.

TABLA 2. TONELADAS DE ACERO QUE SE REQUIEREN PARA EL SOBRECALENTADOR SECUNDARIO, SEGÚN EL PROYECTO DE QUEMA DE GAS.

| NO. | Descripción del Material | Dimensiones de la Unidad | Cantidad m | Peso por unidad (kg) | Peso total (kg.) | Cantidad Total |
|---|--------------------------------|--------------------------|------------|----------------------|-------------------------|----------------|
| Título del Proyecto: 29 Serpentes Sobrecalentador Secundario Sección Entrada Salida para Quema de Gas | | | | | | |
| 1 | TUBO Ø 57x8 Ac SA 213 T22 | 6 m | 351 | 58 | 20 358 | 2 106 m |
| 2 | TUBO Ø 57x8 Ac SA 213 T91 | 6 m | 192 | 58 | 11 136 | 1 152 m |
| 3 | TUBO Ø 57x9.5 Ac SA 213 T22 | 6 m | 128 | 66.77 | 8 546.56 | 768 m |
| 4 | TUBO Ø 57x9.5 Ac A 213 T12 | 6 m | 32 | 66.77 | 2136.64 | 192 m |
| PESO TOTAL | | | | | 42 177,2 kg = 42,1772 t | |
| Título del Proyecto: 29 Serpentes Sobrecalentador Secundario Sección Salida para Quema de Gas | | | | | | |
| 1 | TUBO Ø 51x8 Ac SA 213 T91 | 6 m | 382 | 50.9 | 19 444.3 | 2 292 m |
| 2 | TUBO Ø 51x9.5 Ac SA 213 T22 | 6 m | 32 | 58.34 | 1 867 | 192 m |
| Peso Total | | | | | 21 311,3 kg = 21,3113 t | |
| Peso Total General | | | | | 63,49 t | |

SOURCE:

La inversión inicial con los materiales originales del Proyecto de Quema de Gas será:

$$I_{MO} = (20,358 + 8, 54656 + 1,867) * 4 227 + 2,13664 * 3330 + (11,136 + 19,4443) * 7324$$

$$I_{MO} = 130 071,38 + 7 115,01 + 223 970,11 = 361 157,37 \text{ CUC}$$

La inversión inicial si todos los tubos son de acero SA 213 T91 sería:

$$I_{NM} = 63,49 * 7324 = 465 000,76 \text{ CUC.}$$

En las metodologías descritas en la literatura para la estimación de la vida útil por creep y otros tipos de falla en tubos de calderas, no se toma en cuenta la influencia de la diferencia de la temperatura Δt entre la superficie exterior e interior de la pared en la magnitud de las tensiones [1], [2]. Según [18]-[20] para el cálculo de la tensión en la pared, ya sea de recipientes o de tubos, tomando en cuenta la diferencia de temperatura Δt entre la superficie exterior e interior de la pared del componente en cuestión, para calentamiento exterior, deben realizarse a través de (7), (8).

$$\sigma_{eq} = \frac{(\epsilon + 1)^2}{4 \cdot \epsilon} \cdot \sqrt{3 \cdot p^2 + 3 \cdot p \cdot m \cdot \Delta t + (m_1 \cdot \Delta t)^2} \quad (7)$$

$$m_1 = \frac{E \cdot \alpha}{1 - \mu} \quad a_1 = \frac{2 \cdot \epsilon}{(\epsilon + 1)^2 \cdot \ln\left(\frac{\epsilon + 1}{\epsilon - 1}\right)} - 1 \quad (8)$$

$$y \quad \epsilon = \frac{D}{h}$$

Donde:

P es la presión interior en el tubo,

E- es el Módulo de Elasticidad del material del tubo,

α es el coeficiente de dilatación térmica del material del tubo.

μ es el Coeficiente de Poisson del material del tubo,

D es el diámetro del tubo

h el espesor de la pared del tubo.

Estas expresiones para el cálculo de la tensión en la pared de los tubos de las calderas fueron incorporadas en la Metodología de Pronóstico de la vida por creep elaborada en el trabajo [1], [2], [4].

Se hace necesario destacar que el hecho de incorporar la diferencia de temperatura Δt en las expresiones de cálculo de las tensiones, juega un papel importante en el valor de las tensiones calculadas en comparación con el valor cuando no se considera la misma. Por otra parte hay que agregar que es muy importante disponer de datos de las propiedades físicas y mecánicas, tales como: E, α y μ en función de la temperatura de trabajo para el material en cuestión [21]-[22]. La presión de trabajo de la pared de dos tubos de la CTE es: $p = 14.32 \text{ MPa}$.

La vida útil por fractura bajo creep se puede calcular a través de (9), partiendo del Parámetro de Larson Miller según los datos dados por la Norma ISO / TR7468-198. Basados en esta Norma para el acero AISI 210 A1 de los tubos de la CTE "Carlos Manuel de Céspedes" se tiene que:

$$P(\sigma) = \frac{\log t - 10,656877}{T - 500} = a + b \cdot (\log \sigma) + c \cdot (\log \sigma)^2 + d \cdot (\log \sigma)^3 + e \cdot (\log \sigma)^4 \quad (9)$$

Donde: a, b, c, d, e son constantes del ajuste de la curva dadas por la Norma ISO.

En esta expresión de cálculo t es la vida útil en horas, T es la temperatura de trabajo en grados Kelvin y σ es la tensión equivalente en la pared del tubo.

Esta tensión σ se calcula por (7). Conociendo el valor de la tensión σ se puede calcular el valor del Parámetro de Larson Miller partiendo del lado derecho (9) y teniendo entonces la temperatura de trabajo T del material, se puede despejar del lado izquierdo de la misma, el tiempo de rotura t en el cual dicho material a esa tensión y a esa temperatura se deformará plásticamente por el fenómeno de creep alcanzando la deformación de rotura y ésta será la vida útil por creep para esas condiciones de trabajo. Esta ecuación del Parámetro de Larson Miller, incluyendo las ecuaciones que caracterizan las propiedades físicas del acero con la temperatura se montaron en un software hecho en MatLab para calcular la vida útil por creep para cualquier material del cual se posean las constantes de correlación y para cualquier temperatura de trabajo [1-2]. Los valores de E_T , α_T y μ_T se calculan para cada una de las temperaturas del lazo según las iteraciones sucesivas.

En los trabajos [1-4] se evaluaron sólo temperaturas de trabajo próximas a los 600°K que es la temperatura nominal de la CTE "Carlos M. de Céspedes" para 100% de carga, sin embargo si se quema gas la temperatura se elevará por encima de este valor, aspecto este que tiene que ser considerado en el presente trabajo. En el trabajo [2] se consideraron temperaturas superiores y se consideró además la presencia de una razón de adelgazamiento de la pared de los tubos [23] de $k = 2,5 \text{ nm/h}$ producida por el fenómeno de erosión corrosión. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 3 para $\Delta t = 0$, o sea que las vidas reflejadas en la Tabla 3 son las máximas posibles.

Como se aprecia de la tabla 3, los aceros SA 213 T12 y SA 213 T22 son peores desde el punto de vista

de la vida por creep que el acero SA 210 A1 y ninguno de estos tres aceros son buenos para temperaturas superiores a 600°K. Como se aprecia por otro lado el acero SA 213 T91 es tan bueno desde el punto de vista de su vida por creep que en el peor de los casos para estas temperaturas la misma es más de 1000 veces superior. Para la quema con gas se requiere de este acero. En el presente trabajo no se considerará que el número de averías en el ciclo de vida se reduzca en proporción inversa al incremento de la vida, sino que simplemente se considerará muy conservadoramente que las averías se reduzcan en 20 veces. En el Ciclo de Vida de 15 años se considerará que sólo ocurrirán 0,1 averías/año con el nuevo material (1 avería cada 10 años) mientras que con los materiales originales del Proyecto de Quema de Gas se incrementarían en 5 veces debido al incremento de la temperatura ver tabla 3, o sea, 10 averías/año en una de las unidades japonesas El valor residual se considerara igual a un 20% del costo inicial de los tubos.

El Ahorro en el Ciclo de Vida considerando que todos los tubos del Sobrecalentador Secundario fueran sustituidos para tubos de acero SA 213 T91 será aplicando (10):

$$ACV = (I_{MO} - I_{NM}) + (R_{MO} - R_{NM}) \frac{(1+d)^N - 1}{d(1+d)^N} - (VR_{MO} - VR_{NM}) \left(\frac{1}{1+k}\right)^N \quad (10)$$

$$ACV = (361157,37 - 465000,76) + (10 \times 13\,419,13 - 0,1 \times 13\,419,13) \frac{(1+0,167)^{15} - 1}{0,167(1+0,167)^{15}} - (0,2 \times 361157,37 - 0,2 \times 465000,76) \left(\frac{1}{1+0,167}\right)^{15}$$

$$ACV = -103843,39 + (132840) \frac{(1,167)^{15} - 1}{0,167(1,167)^{15}} + (20766,65)(0,8569)^{15}$$

$$ACV = -103\,843,39 + 132\,849,39 \times 5,3975 + 2047,79 = 615\,258,97 \text{ CUC}$$

TABLA 3. VIDA EN HORAS PARA DIFERENTES TEMPERATURAS CON RAZÓN DE ADELGAZAMIENTO $k = 2,5 \times 10^{-9} \text{ m/h}$ POR EROSIÓN CORROSIÓN (DEL JUNCO, 2013) Y $\Delta T = 0 \text{ oC}$ PARA LOS DIFERENTES POSIBLES MATERIALES A EMPLEAR EN EL SOBRECALENTADOR SECUNDARIO

| Tipo de Acero | Temperatura en °K | | | | | | | | | |
|---------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | 475 | 500 | 525 | 550 | 575 | 600 | 625 | 650 | 675 | 700 |
| AISI 210 A1 | 1.385 x10 ¹² | 4.445 x10 ¹⁰ | 1.427 x10 ⁹ | 4.581 x10 ⁷ | 1.470 x10 ⁶ | 47200 | 1515 | 48.6 | 1.56 | 0.05 |
| AISI 213 T12 | 6.858 x10 ²⁴ | 1.661 x10 ¹³ | 40.218 | 9.740 x10 ⁻¹¹ | 2.359 x10 ⁻²² | 5.712 x10 ⁻³⁴ | 1.383 x10 ⁻⁴⁵ | 3.350 x10 ⁻⁵⁷ | 8.113 x10 ⁻⁶⁹ | 1.965 x10 ⁻⁸⁰ |
| AISI 213 T22 | 6.972 x10 ¹⁹ | 2.093 x10 ¹³ | 6.286 x10 ⁶ | 1.887 | 5.667 x10 ⁻⁷ | 1.70 2 x10 ⁻¹³ | 5.109 x10 ⁻²⁰ | 1.534 x10 ⁻²⁶ | 4.606 x10 ⁻³³ | 1.383 x10 ⁻³⁹ |
| AISI 213 T91 | 9.871 x10 ¹⁵ | 1.358 x10 ¹⁵ | 1.869 x10 ¹⁴ | 2.572 x10 ¹³ | 3.539 x10 ¹² | 4.87 x10 ¹¹ | 6.7 x10 ¹⁰ | 9.2 x10 ⁹ | 1.27 x10 ⁹ | 1.75 x10 ⁸ |

SOURCE:

La sustitución resulta rentable con un Ahorro en el Ciclo de Vida mayor que la Inversión Inicial con el nuevo material.

Para evaluar la Efectividad Financiera del Proyecto del Nuevo Material para el Proyecto de Quema de Gas se propone introducir el concepto del Ahorro por cada CUC Inversión Inicial, o sea:

Efectividad Financiera =

$$\left(\frac{ACV}{I}\right) = \left(\frac{615\,258,97}{465\,000,76}\right) = 1,323$$

O sea, que la versión escogida de materiales para el Proyecto de Quema de Gas Ahorra 1,323 CUC por cada CUC de Inversión Inicial con relación al Proyecto Inicial de Quema de gas, lo que es una efectividad financiera muy importante.

La Efectividad Social de la Inversión se puede medir por el tiempo que se evitan de paradas sin generar electricidad. En la avería del 19 de Mayo de 2003, la Unidad CMC 3 estuvo parada 60 horas y esta Unidad es capaz de generar 160 MW, o sea que se dejan de generar en una avería: 9 600 MW-h/unidad. En 10 averías por año que es el pronóstico de averías con los materiales seleccionados según el Proyecto Original de Quema de Gas se dejarían de generar 96 000 MW-h/año. Teniendo en cuenta que el consumo promedio de una vivienda en Cuba en un mes es de 150 kW-h/mes, en un año una vivienda consume 1 800 kW-h/año = 1,8 MW-h/año. Todo este razonamiento conduce a que el efecto social de la alternativa seleccionada para la sustitución de los materiales de los tubos del Sobrecalentador Secundario permite satisfacer la demanda media de 53 334 consumidores/año adicionales como promedio, lo que constituye una efectividad social muy importante.

IV. CONCLUSIONES

Desde el año 1980 hasta el año 2012, las averías ocurridas en la Central Termoeléctrica "Carlos Manuel de Céspedes" representan económicamente un costo total de más de cuatro millones de dólares debido a que la avería de un solo tubo en cualquiera de las Unidades Japonesas representa un gasto de 13 419,13 CUC siendo el Sobrecalentador Secundario donde ocurren el mayor número de averías por creep, como promedio 2 averías al año.

La quema de gas implica que la temperatura de la caldera se eleve en el rango de 600 a 700 °K, conduciendo a que las averías por *creep* se incrementen sustancialmente y los costos por averías sean mucho mayores; para estas temperaturas el pronóstico de vida por *creep* de los tubos de acero SA 213 T91 realizado por la metodología establecida por la Norma ISO / TR7468-198 es del orden de 1 000 veces superior en comparación con la del acero SA 210 A1 y mucho mayor aún que la pronosticada para los aceros AISI 213 T12 y AISI 213 T22.

La alternativa analizada sobre el cambio del material de todos los tubos del sobrecalentador secundario por el acero AISI 213 T91 en el Proyecto de Quema de Gas de una de las unidades japonesas de la CTE "Carlos M. de Céspedes", considerando muy conservadoramente una reducción de las averías de sólo 20 veces, resulta rentable, con un Ahorro en el Ciclo de Vida de 615 258,97CUC y una Efectividad Financiera de: EF = 1,323, o sea, que la versión escogida de materiales para el Proyecto de Quema de Gas Ahorra 1,323 CUC por cada CUC de Inversión Inicial con relación al Proyecto Inicial, lo que es una efectividad financiera importante.

El Efecto Social de la Alternativa Seleccionada para la sustitución de los materiales de los tubos del Sobrecalentador Secundario permite satisfacer la demanda media de 53 334 consumidores/año adicionales como promedio, solo por la reducción de horas de parada de la Unidad sin generar electricidad.

REFERENCIAS

- [1] Rivero, M. "Estimación de la Vida Útil de los tubos de las Calderas de la CTE "Carlos Manuel de Céspedes" para diferentes materiales. Tesis de M.S. Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad de Cienfuegos "Carlos Rafael Rodríguez", Cienfuegos, 2012.
- [2] Eras, J. J. C., Gutiérrez, A. S., Lorenzo, D. G., Martínez, J. B. C., Hens, L., & Vandecasteele, C. (2015). Bridging universities and industry through cleaner production activities. Experiences from the Cleaner Production Center at the University of Cienfuegos, Cuba. *Journal of Cleaner Production*, 108, 873-882.
- [3] ISO/TR 7468-1981. "Summary of average stress rupture properties of wrought steels for boiler and pressure vessels".1981.
- [4] Fujio, A. "Creep deformation behavior and deciding factors for creep life of tempered martensitic 9% Cr-steels". En *Creep 2012 Proceedings*, Kyoto, Japón, Mayo, 2012.
- [5] Yamasaki, S. "Creep behavior at ultra-low strain rate in 9% Cr steel studied by helical spring creep test". En *Creep 2012 Proceedings*, Kyoto, Japón, Mayo, 2012.
- [6] W. Hana, G. Yanga, L. Xiaoa, J., Wanqi "Creep properties and creep microstructure evolution of Mg-2.49Nd-1.82Gd-0.19Zn-0.4Zr alloy" *Materials Science and Engineering: Vol. 684*, Pages 90-100, 27 Jan 2017.
- [7] Maile, K. Klenk, "A. Creep damage evolution in martensitic 9% Cr-steels". En *Creep 2012 Proceedings*, Kyoto, Japón, Mayo, 2012.
- [8] Y. Zheng, S Yang, X. Ling. "Creep life prediction of small punch creep testing specimens for service-exposed Cr-5Mo using the theta-projection method", *Engineering Failure Analysis*, Volume 72, Pp 58-66, Feb 2017.
- [9] O. J. Suárez, "Aproximación al origen de la noción de objeto de aprendizaje: revisión histórico - bibliográfica," *INGE CUC*, vol. 12, no. 2, pp. 26-40, Aug. 2016.
- [10] Goytisolo Espinosa, R.A. "Improvement of the calculation of stresses during creep life prediction of tubes steam generators. En *Creep 2012 Proceedings*, Kyoto, Japón, Mayo, 2012.
- [11] Rodríguez Calderón, Y. "Costo de las averías por creep de los tubos de la Central Termoeléctrica "Carlos M. de Céspedes" y perspectivas de su reducción", *Centro azucar. Volumen 40, _No 4*. Pp. 28-36. Jul 2013.
- [12] J. Dong, Y. Ping, T. Yuan, "Coal mine methane control cost and full cost: The case of the Luling Coal Mine, Huaibei coalfield, China. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, Vol. 26, Pp. 290-302, Sep 2015.

- [13] J. Li, J. Xue, X. Xie, Q. Wan, Q. Tan, L. Tan, "EPIPE: A low-cost fault-tolerance technique considering WCET constraints". *Journal of Systems Architecture*, Vol. 59, No 10, Pp. 1383-1393, Nov 2013.
- [14] Goytisolo R. A. "Recálculo y regulación de los compresores centrífugos con enfriamiento externo". Tesis Doctoral. Universidad de Cienfuegos. Cuba. 1997
- [15] A. S. Gutiérrez, J. J. C. Eras, P. Billen, C. Vandecasteele, "Environmental assessment of pig production in Cienfuegos, Cuba: alternatives for manure management". *Journal of Cleaner Production*, 112, Pp. 2518-2528. 2016.
- [16] H. Hernandez Herrera, J.J.C. Eras, M. Balbis, R goytisolo "Stress in butt welded joints of open profiles under torsion. *Ingeniare*, Vol 23 No 4. Pp 638-646. Oct 2015.
- [17] M. I. Melgarejo Rincón, C. Ramírez Martín, and W. A. Aperador Chaparro, "Determinación de las causas de falla en la ZAC de un acero ASTM A36 soldado por proceso SMAW," *INGE CUC*, vol. 9, no. 2, pp. 75–82, 2013.
- [18] Jusmatulin E. R. Manual de recipientes y tuberías de alta presión. Moscú: Editorial Mashinostroenie. 1era edición 1990. 832 p.
- [19] O. de los Ríos, J. C Eras, "Estudio sobre la resistencia y rigidez de ejes huecos". *Scientia et technica*, 1(30), 219-224. (2006).
- [20] G. Páramo Bermúdez, A. Benítez Lozano, "Deformación incremental de lámina sin matriz (DIELESS) como alternativa viable a procesos de conformación de lámina convencionales". *INGE CUC*, 9(1), 115–128. 2013.
- [21] Birger, I. Termo resistencia de piezas de máquinas. Moscú: Editorial Mashinostroenie. 1ra Edición, 1975. 455 p.
- [22] Maslienkov, & Maslienkova. Aceros y aleaciones para altas temperaturas. Moscú: Editorial Metalurgiya. 1991.
- [23] Zarrabi, K. Estimation of Boiler Tube lives presence of corrosion and erosion process. *Int. J. Pres Ves. And Piping. No. 53*. (1993), 8 p.