

Criterios de diseño para el desarrollo de una suspensión de lavadora de carga frontal

Objetivo

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo plantear los criterios de diseño para el desempeño óptimo de una suspensión clásica de una lavadora de carga frontal.

Los criterios de optimización de la suspensión clásica se llevaran a través de dos métodos, uno llamado optimización gráfica y el segundo vía utilización de Algoritmos Genéticos.

Proyecto de investigación

Esta investigación forma parte del estudio doctoral con título:

“Criterios de diseño de suspensión de lavadora de carga frontal”.

Tesis doctoral surgida bajo convenio industrial UNAM – MABE para el desarrollo de proyectos de base tecnológica llevada a cabo en el Posgrado de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería – UNAM.

Introducción

El diseño y configuración de las suspensiones en las lavadoras de eje horizontal (carga frontal) o eje vertical (carga superior) juega un papel muy importante, son capaces de disipar la energía de vibración y fuerzas generadas por la ropa mal distribuida al interior de la lavadora conforme la velocidad de centrifugado incrementa, por lo tanto el diseño óptimo de la suspensión puede permitir que se aumente la velocidad de centrifugado hasta el punto donde la suspensión tenga la capacidad de disipar la energía sin poner en riesgo la integridad de los componentes internos de la lavadora.

Cobra tal importancia la eficiencia de consumo de energía que el Departamento de Energía de los Estados Unidos de Norteamérica (D.O.E. por sus siglas en inglés) tiene parámetros muy específicos al respecto y recomienda a los consumidores que adquieran productos con clasificación Energy Star[®] que son productos que cumplen con un mínimo de consumo de energía y agua [1].

Bajo estos estudios el departamento de energía hace una observación importante acerca de la velocidad de centrifugado en las lavadoras: “Motores más eficientes giran dos o tres veces más rápido durante el ciclo de centrifugado para extraer mayor cantidad de agua. Menos humedad en la ropa representa menor tiempo y consumo de energía en la secadora”.

Durante el proceso de centrifugado el problema de vibración comienza hacer gradualmente grave.

Este proceso de centrifugado en la lavadora es la fuente de vibraciones indeseadas y ruido que puede causar un efecto desagradable en el usuario y un efecto que deteriora a la lavadora debido a las vibraciones que tiene un alto impacto en la vida útil, confiabilidad y operación de la misma.

Desarrollo

En la búsqueda de minimizar las vibraciones y/o aceleraciones del sistema que permitan mejorar la eficiencia energética y el consumo de agua varios autores y compañías han apuntado sus esfuerzos a mejorar el desempeño de la suspensión a través de la optimización de la misma, LG Electronics [2] [3], Fisher & Pikel [4], Sanyo Electric [5], Whirlpool por citar algunas han hecho investigaciones al respecto. Con la inclusión de programas computacionales que resuelven modelos de multicuerpos rígidos y flexibles [6] se

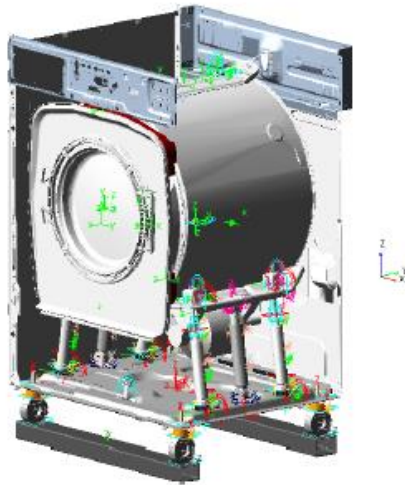


Fig. 1 Modelo de lavadora carga frontal empleando ADAMS software.

han facilitado la optimización y selección de variables de diseño que mejoren el desempeño de la suspensión (fig. 1). Investigaciones en otras entidades educativas a nivel mundial, como en el trabajo de Brian Sowards [7] plantea modelos dinámicos de 6 DOF (Grados de libertad) para optimizar, sin embargo la dificultad de las operaciones y la no linealidad del sistema orillan al autor a linealizar el sistema de manera que se pueda obtener la solución de las ecuaciones de forma analítica.

Bagepelli [8] presenta una investigación de un modelo dinámico de 4 DOF dos movimientos en un plano ortogonal y dos movimientos más en otro plano ortogonal (fig. 2), un movimiento de traslación y un movimiento de rotación.

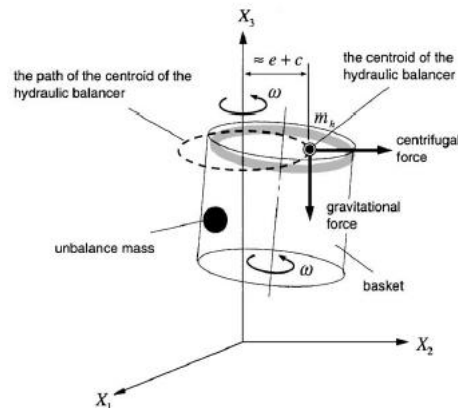


Fig. 2 Modelo Dinámico de lavadora carga vertical de 4 DOF.

Mas autores como Hai-Wei Chen and Qiu-Ju Zhang [9] muestra un análisis de estabilidad de una lavadora de eje vertical sin contemplar efectos de autobalance. Plantea un modelo dinámico de 7 DOF formulado a través del método de Lagrange no obstante no resuelve por la complejidad del sistema, plantea soluciones “de orden periódico” para ser empleadas en las ecuaciones diferenciales (fig. 3).

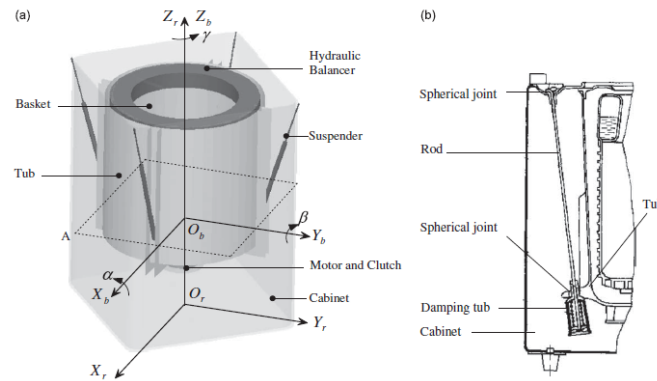


Fig. 3 Modelo Dinámico de lavadora carga vertical de 7 DOF.

Pueden citarse el estado del arte y tecnológico a nivel mundial pero finalmente la búsqueda es la misma, la optimización de la suspensión para la mejor disipación de energía.

La investigación de este proyecto, plantea el siguiente esquema de conceptualización así como las variables de diseño de suspensión:

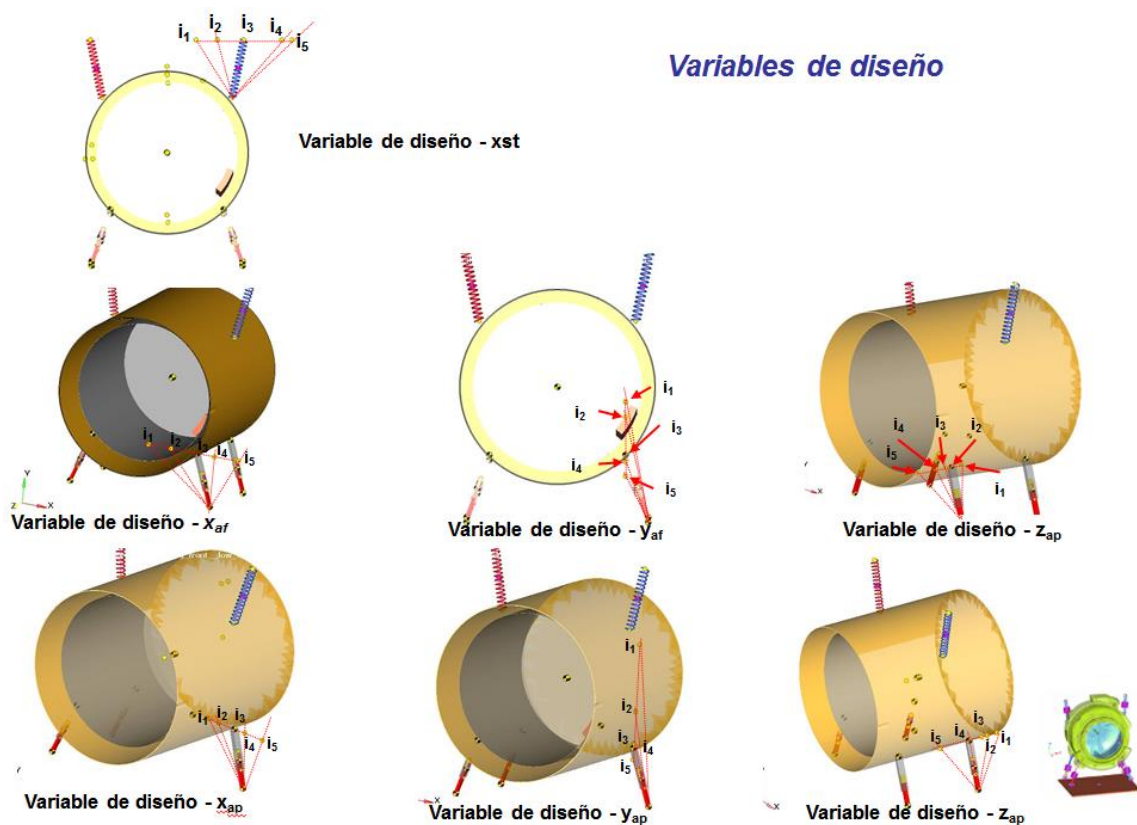


Fig. 4 Configuración de Suspensión de Lavadora Carga Frontal y Variables de Diseño.

Las variables de diseño son:

x_{st} – Posición de resorte en coordenada x de punto en tierra [m]
 x_{af} – Posiciones de amortiguadores frontales en coordenada x de punto en tina [m]
 y_{af} – Posiciones de amortiguadores frontales en coordenada y de punto en tina [m]
 z_{af} – Posiciones de amortiguadores frontales en coordenada z de punto en tina [m]
 x_{ap} – Posiciones de amortiguadores posteriores en coordenada x de punto en tina [m]
 y_{ap} – Posiciones de amortiguadores posteriores en coordenada y de punto en tina [m]
 z_{ap} – Posiciones de amortiguadores posteriores en coordenada z de punto en tina [m]
 k – Rigidez de resortes [N/m]
 c – Constante de amortiguamiento [Ns/m]

Optimización Grafica

Consiste en plantear el modelo dinámico de 7 DOF de la lavadora y resolver el sistema de ecuaciones diferenciales en estado transitorio y estable del sistema.

$$\begin{bmatrix} D_1^T \\ D_2 \\ D_3 \\ D_4 \\ D_5 \\ D_6 \\ D_7 \end{bmatrix} \ddot{\mathbf{q}} + \begin{bmatrix} V_1^T \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \\ V_6 \\ V_7 \end{bmatrix} \dot{\mathbf{q}} + \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ C_4 \\ C_5 \\ C_6 \\ C_7 \end{bmatrix} \mathbf{q} = \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \\ Q_4 \\ Q_5 \\ Q_6 \\ Q_7 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{D}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{V}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{C} = \mathbf{Q}$$

Donde la ecuación es el modelo dinámico de la suspensión de la lavadora que contempla los efectos inerciales a través de la matriz $\mathbf{D}$, los efectos de amortiguamiento vía la matriz $\mathbf{V}$ y los efectos debidos a la gravedad $\mathbf{C}$ así como las fuerzas externas y de excitación del sistema $\mathbf{Q}$. Este sistema de ecuaciones diferenciales no lineales es resuelto utilizando el software **Wolfram Mathematica** ver9 empleado el método RungeKutta para obtener la solución.

Y posteriormente con la ayuda de la función **FindMinimum** encontrar las variables de diseño que optimicen la función objetivo

$$F. \text{Objetivo} = \sum_{i=1}^7 \left(\sum_{j=1}^{12} f_{i,j}^2 \right)^{1/2}$$

El resolver para 38 variables al mismo tiempo implica un tiempo computacional exageradamente grande, por consiguiente se replantea el problema, de forma que se lleva a cabo el siguiente esquema de optimización:

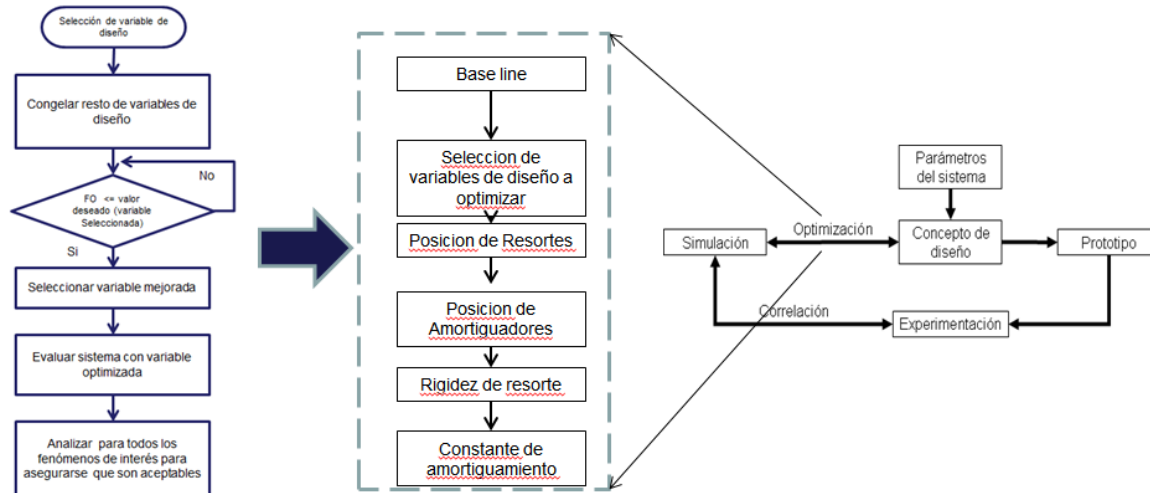


Fig. 5 Proceso de Optimización Gráfica.

Donde ahora se resuelve para una o máximo dos variables a la vez, obteniendo un suboptimo de diseño.

El recurso computacional empleado a este nivel fue:

Laptop – Asus
 Intel (R) Core™ i7-2670 QM CPU @2.20 GHz
 RAM Memory – 8 GB
 Operating System – 64 Bits

Donde el tiempo consumido para resolver 2 variables hasta alcanzar las 38 tomó aproximadamente 15 días, teniendo en cuenta que el proceso no fue sistemático ni automático, sin embargo los resultados obtenidos al compararlos contra el solver de Altair-MotionView mostró datos alentadores.

Optimización usando Algoritmos Genéticos

Los algoritmos genéticos funcionan entre el conjunto de soluciones de un problema llamado fenotipo, y el conjunto de individuos de una población natural, codificando la información de cada solución en una cadena, generalmente binaria, llamada cromosoma. Los símbolos que forman la cadena son llamados los genes. Cuando la representación de los cromosomas se hace con cadenas de dígitos binarios se le conoce como genotipo. Los cromosomas evolucionan a través de iteraciones, llamadas generaciones. En cada generación, los cromosomas son evaluados usando alguna medida de aptitud. Las siguientes generaciones (nuevos cromosomas), son generadas aplicando los operadores genéticos repetidamente, siendo estos los operadores de selección, cruzamiento, mutación y reemplazo.

El empleo de Algoritmo Genéticos para este tipo de problemas de Diseño Mecánico son una buena herramienta debido a la complejidad y numero de variables a resolver, usando nuevamente Wolfram Mathematica se planteó el modelo de AG para resolver la optimización de 38 variables a la vez, con el recurso computacional antes mencionado, sin embargo este método de AG contempla la solución de cientos de miles de iteraciones para converger a un máximo o mínimo global.

Se define el problema de optimización a través del AG como:

Condiciones de Frontera

Mutacion de 10%

Elitismo 20% [Los dos individuos mejores de cada generacion pasan a la siguiente generacion]

Ponderacion definidas como:

$w1 = 0.05;$

$w2 = 0.05;$

$w3 = 0.05;$

$w4 = 0.05;$

$w5 = 0.05;$

$w6 = 0.05;$

$w7 = 0.05;$

$w8 = 0.05;$

$w9 = 0.05;$

$w10 = 0.25;$

$w11 = 0.15;$

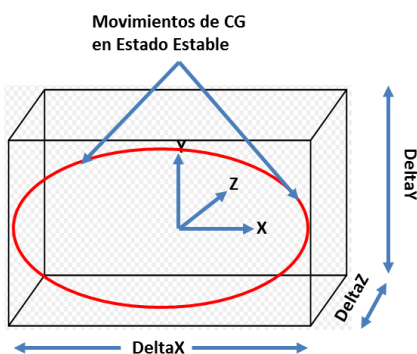
$w12 = 0.15;$

Funcion Fitness

```
funFit[i] = w1 * deltaX + w2 * deltaY + w3 * deltaZ + w4 * deltadX +
           w5 * deltadY + w6 * deltadZ + w7 * deltaddX + w8 * deltaddY +
           w9 * deltaddZ + w10 * tminimo +
           w11 * (centXYZ[[1]] + centXYZ[[2]] + centXYZ[[3]]) +
           datodteta[[fin]] * w12;
```

Donde:

Bounding Box



DeltaX= Distancia de movimientos de CG en dirección X

DeltaY= Distancia de movimientos de CG en dirección Y

DeltaZ= Distancia de movimientos de CG en dirección Z

DeltadX = Velocidad de CG en dirección X

DeltadY = Velocidad de CG en dirección Y

DeltadZ = Velocidad de CG en dirección Z

DeltaddX = Aceleracion de CG en dirección X

DeltaddY = Aceleracion de CG en dirección Y

DeltaddZ = Aceleracion de CG en dirección Z

Condicionales

Si se alcanza la velocidad estable entonces:

tminino – tiempo en el cual se alcanza la velocidad en estado estable

CenXYZ – Posicion de centro de gravedad en estado estable

Datodteta – Velocidad de estado estable

Si no se alcanza la velocidad estable entonces:

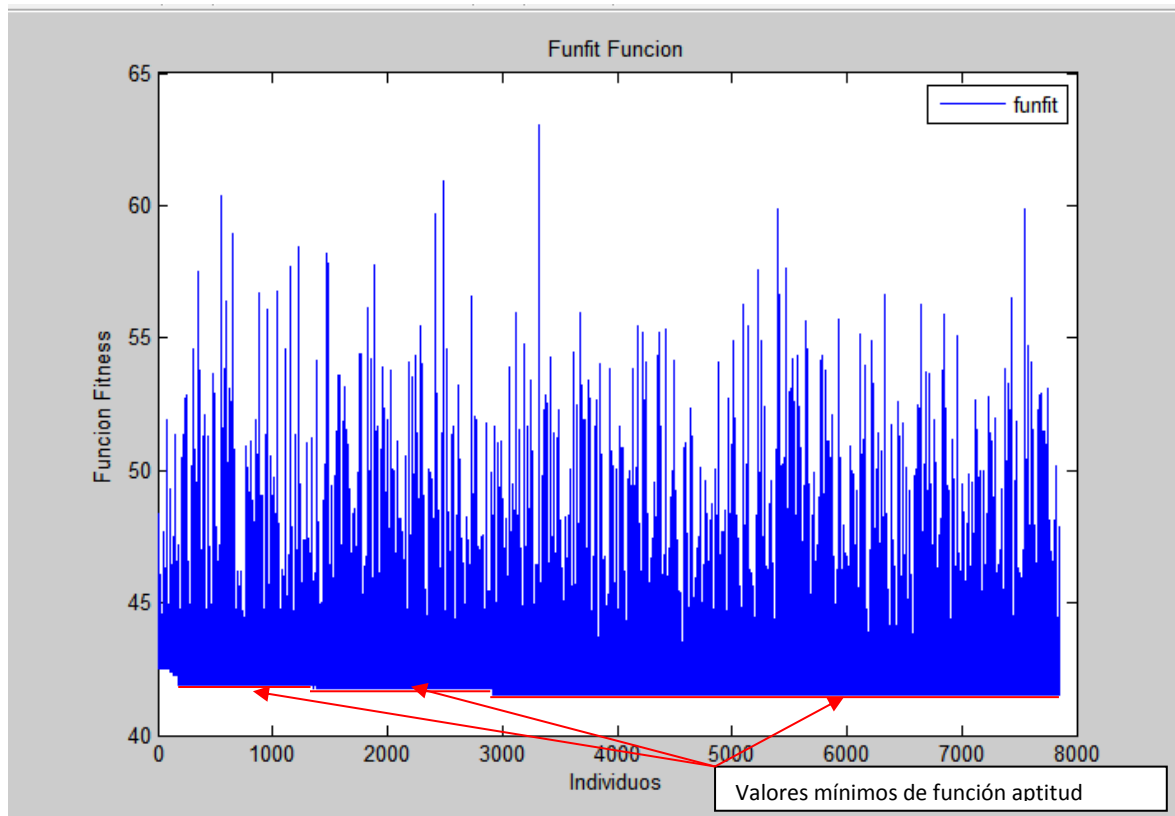
t_{minimo} – tiempo máximo de solución de Ecuación Diferencial

CenXYZ – Posición de centro de gravedad considerando todos los datos de movimiento

Datodteta – Velocidad alcanzada

Se busca minimizar la función aptitud (fitness), es decir de la figura x mostrada arriba, se busca minimizar los lados del cubo **deltaX**, **deltaY**, **deltaZ**, etc, para garantizar menor desplazamiento, velocidad y aceleración del CG traduciéndose en mínimas vibraciones.

Utilizando el recurso computacional antes mencionado se pudo obtener la siguiente información de optimización:



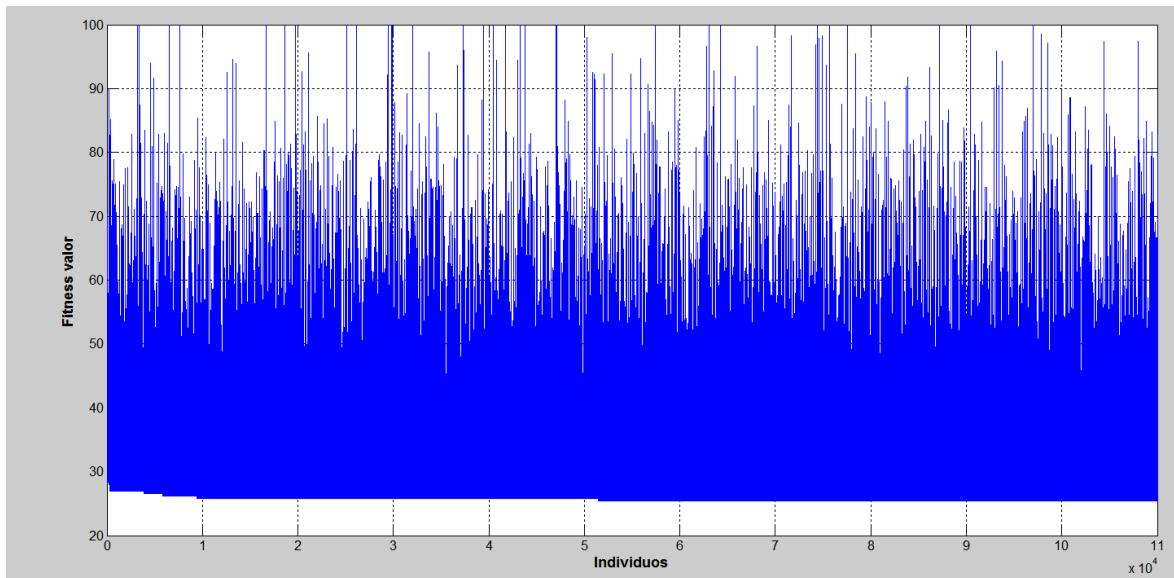
La grafica arriba mostrada representa la función aptitud definida para evaluar las variables de diseño, en el eje X se tiene el número de individuos evaluados (número de veces que se ha ejecutado el algoritmo), se debe resaltar que para la obtención de una generación de 10 individuos se debe ejecutar la solución del modelo dinámico de 7 DOF 50 veces, esto es debido a que se definió que 2 individuos fueran escogidos vía selección por ruleta de cada 10.

El eje Y se muestra el valor de función aptitud y como se observa los valores mínimos de la función aptitud van decreciendo en forma escalonada para tal caso se busca que la función aptitud obtenga su valor mínimo conforme crece el número de individuos. Para estos 8000 individuos (800 generaciones o 8,000 veces resuelta la ecuación diferencial (ED)) se consumió un tiempo estimado de:

Tiempo de solución de una ED = 24 seg.

Tiempo total de 800 ED*50 = 24 *40,000 = 960,000 seg. = 266.66 Hr =11.11 Días

Se propuso un modelo de configuración de suspensión simétrico lo cual considera simetría en las variables de diseño, por lo que el cromosoma de 38 individuos se reduce a 14.



Esta nueva configuración permitió obtener aproximadamente 11,000 individuos utilizando un recurso computacional:

Laptop – Asus
Intel (R) Core™ i7-2670 QM CPU @2.20 GHz
RAM Memory – 8 GB
Operating System – 64 Bits

Tiempo de solución de una ED = 18 seg

Tiempo total de 11,000 ED*50 = 18 *550,000 =9900,000 seg = 2750 Hr = 114.58 Dias

Objetivo de uso de Supercomputo

En conclusión se desea contar con los recursos de supe cómputo para poder correr dos problemas de optimización mediante Algoritmos Genéticos:

Problema 1 : Modelo completo de 38 variables

Problema 2 : Modelo reducido de 14 variables

Esto permitirá seleccionar la mejor configuración de diseño de la suspensión que permita minimizar el desplazamiento, velocidad y aceleración del sistema que carga la suspensión.

El recurso de supercomputo se empleara para llegar a la convergencia de la función de aptitud, es decir se espera que la convergencia de la aptitud en el tiempo tenga una variación mínima de 0.1.

Referencias

- [1] Department of Energy www.energy.gov
- [2] Balance weight in drum type washing machine and manufacturing method
Jae Gyn Cho, Sam Je Park, Soung Kue Yoo, LG Electronics, US 7155942B2, Jan 2 2007
- [3] Han, Dae Yeong, Jeon Si Moon, "Device for attenuation vibration of drum type washing machine and method for controlling vibration", LG Electronics, EP 1092801 B1, 2000.
- [4] Clive Marsh, Steve Taylor, Paul Milliken, "Developing an understanding of washing machine dynamics", Fisher and Payker, 2006.
- [5] , Takayuki Koiumi, Nobutaka Tsujiuchi, Shuichi Matsumoto , "Noise Prediction of a Washing Machine considering panel vibration", Departament of Engineering, Doshisha University, Yuji Hirasawa, SANYIO Electric Co. Ltd
- [6] A Sergio, J Duarte , "The design of a washing machine prototype", Department of Mechanical Engineeing, University of Aveiro, Material & Design, ELSEVIER, 2003.
- [7] Brian Sowards, "Spring –damper suspension system analysis for horizontal axis washing machines", Whirlpool Coorporation and The University of Michigan, 1972.
- [8] B.S. Bagepelli , Dynamic Modeling of Washing machine suspension systems, General Electric Company.
- [9] Hai-Wei Chen and Qiu-Ju Zhang, "Stability analyses of a vertical axis automatic washing machine without balancer", School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Journal of Sound and Vibration 2010.