



Conciencia Tecnológica

ISSN: 1405-5597

contec@mail.ita.mx

Instituto Tecnológico de Aguascalientes  
México

Patiño Ruiz, Rodrigo; Olivares Galván, Juan C.; Campero Littlewood, Eduardo; Esparza Gonzalez, Mario Salvador

Transformadores de Distribución con Núcleos de Material Amorfo  
Conciencia Tecnológica, núm. 38, julio-diciembre, 2009, pp. 18-23  
Instituto Tecnológico de Aguascalientes  
Aguascalientes, México

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=94412327004>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica  
Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal  
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

## **Transformadores de Distribución con Núcleos de Material Amorfo**

Investigación

Ing. Rodrigo Patiño Ruiz<sup>1</sup>, Dr. Juan C. Olivares Galván<sup>1</sup>, M. C. Eduardo Campero Littlewood<sup>1</sup>,  
M. C. Mario Salvador Esparza Gonzalez<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Energía, Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco, Av. San Pablo 180. C.P. 02200, México. D.F, correo electrónico: jolivare\_1999@yahoo.com

<sup>2</sup>Instituto Tecnológico de Aguascalientes, correo electrónico: msespa@ieeee.org

### **Resumen**

Este artículo presenta un análisis comparativo de transformadores de distribución monofásicos construidos con núcleos de material amorfo y de láminas de acero magnético convencional basados en el costo total evaluado. El estudio se lleva a cabo utilizando diseños de transformadores de diferentes capacidades: 5kVA, 10kVA, 15kVA, 25kVA, 37.5kVA, 50kVA que satisfagan todas las restricciones impuestas por las normas y el cliente. Este artículo utiliza los factores de espacio correspondientes a cada material para núcleos ensamblados a una presión de 10 psi. Al final se presentan y analizan las ventajas y desventajas de los transformadores comparados.

**Palabras clave:** Transformador de Distribución, Núcleo, Acero al Silicio, Acero Amorfo, Costo Evaluado.

### **Abstract**

This paper presents a comparative analysis on the total ownership cost of single-phase distribution transformers built with cores of different materials: conventional electric steel and amorphous material based. The study is performed designing transformers of different capacities: 5kVA, 10kVA, 15kVA, 25kVA, 37.5kVA, 50kVA that satisfy all the restrictions imposed by the standard and user specifications. This paper uses the corresponding space factors of each material when cores are assembled to a pressure of 10 psi. The advantages and disadvantages of the compared transformers are analyzed in the last part of the paper.

**Key words:** Distribution Transformers, Transformer Cores, Conventional Steel, Amorphous Steel, Total Ownership Cost.

### **Introducción**

A principios de 1960, los metales con cristales en estado amorfo fueron producidos por primera vez. Los metales amorfos son un tipo de material relativamente nuevo que no tiene una estructura cristalina como los metales comunes, y puesto que su estructura es más

bien parecida a la del vidrio son llamados “vidrios metálicos”. Los metales amorfos se forman mediante una solidificación rápida donde el metal derretido es súper-enfriado en segundos, lo que provoca que los átomos se acomoden de manera arbitraria [1]. Este material, a pesar de ser muy delgado, tiene una gran dureza y resistencia física, tiene propiedades magnéticas que lo hacen fácilmente magnetizable y desmagnetizable. Los primeros transformadores que se hicieron experimentalmente con núcleos de metal amorfo presentaron una gran reducción de pérdidas en el núcleo.

Estudios en los sistemas de distribución de energía eléctrica en Estados Unidos de América muestran que aproximadamente el 60% de las pérdidas en las redes de distribución son atribuibles a los transformadores. Por otra parte, se sabe que el 80 % de las pérdidas totales de un transformador son debidas a las pérdidas en el núcleo [2]. Se estima que si todos los transformadores de EUA fueran reemplazados con núcleos de metal amorfo, podrían ahorrarse de 6 a 14 GWh/año

Un transformador de distribución con capacidad de 25kVA, monofásico, hecho con un núcleo moderno de acero al silicio, sus pérdidas en vacío representan una demanda de alrededor de 60 watts, mientras que la misma unidad con un núcleo de metal amorfo demanda solamente 20 watts [3], lo que significa un ahorro de entre 60 y 70%.

Aunque el metal amorfo ofrece altas eficiencias en los núcleos de los transformadores también implica retos en la producción. El material amorfo es de 4 a 5 veces más duro que el acero al silicio, lo que requiere que las herramientas de corte sean mucho más rápidas [4]. Sin embargo, debido a lo delgado de las placas del metal amorfo se requiere de láminas más anchas, lo que a su vez significa algunas veces que el núcleo sea más grande a lo ancho y alto.

De cualquier forma los transformadores de distribución con núcleos de material amorfo son comercialmente atractivos. Las bajas pérdidas en los núcleos representan un ahorro en el costo de operación de los transformadores y se presentan como una nueva estrategia para la conservación de la energía [4].



Un buen diseño de transformador puede lograrse mediante la optimización de los materiales empleados en su construcción. En el diseño que se hace en este trabajo se cumple con las restricciones impuestas por la norma como: corriente de excitación, porcentaje de impedancia, pérdidas en vacío, pérdidas totales, eficiencia [5], y se usan alternativamente laminaciones de acero al silicio M3 y de metal amorfo y se comparan las pérdidas en vacío (núcleo) y los costos evaluados de cada diseño.

En esta investigación se demuestra que, al incorporar el metal amorfo en núcleos de transformadores, se obtiene un ahorro promedio de 7.9% en el costo evaluado comparado con transformadores cuyo núcleo está fabricado con aceros convencionales. Este valor se obtuvo al diseñar transformadores de 5kVA a 50kVA, clase de aislamiento de 15kV. El precio utilizado para el metal amorfo fue de \$75/kg y para el acero convencional de \$50/kg.

En este artículo se propone la utilización del metal amorfo en transformadores de distribución con núcleo tipo acorazado e inmersos en aceite. Sin embargo, los autores recomiendan utilizar el material amorfo en otros tipos de transformadores.

#### Características del programa de cómputo para el diseño de transformadores

La metodología del programa de diseño de transformadores desarrollada en este trabajo cumple cabalmente con las normas correspondientes y las especificaciones del cliente. La ventaja de este programa es que es de fácil implementación para las pequeñas y medianas empresas fabricantes de transformadores.

El programa se utilizó para diseñar transformadores, cuyas características se presentan a continuación: **Capacidades:** 5-50kVA, **Tensión en alta:** 13.2-33kV, **Tensión en baja:** 240/127V, **Fases:** monofásico, **Frecuencia:** 60Hz, **Material Magnético del Núcleo:** Acero al silicio de grano orientado laminado grado M3 y acero amorfo grado 2605SA1, **Refrigeración:** OA (sumergido en aceite, con enfriamiento natural), **Materiales del devanado de alta tensión:** Alambre magneto de aluminio, **Materiales del devanado de baja tensión:** Cinta o lámina de aluminio.

Los costos de los materiales utilizados en el diseño están dados por unidad (pu) en términos de un precio base de \$75/kg: **Acero amorfo** 1pu, **Aluminio** 0.53pu, **Acero al silicio** 0.39pu, **Aceite** 0.062pu, **Aislamiento** 0.543pu, **Acero al carbón para el tanque** 0.4pu.

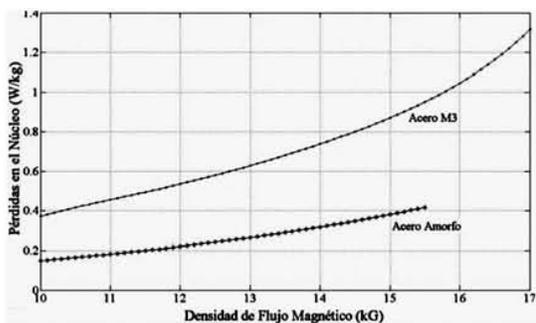
El programa tiene como datos de entrada las especificaciones del transformador: capacidad del transformador (kVA), número de fases, voltajes, elevación de temperatura, frecuencia, conexión de los devanados y valores de garantía (porcentaje de corriente de excitación, porcentaje de impedancia, pérdidas en el núcleo, pérdidas totales y eficiencia). Los valores de garantía se incluyen en la base de datos del programa desarrollado. El programa ha sido validado por la industria y su tiempo de ejecución es de 268 segundos. El diseño de los transformadores se lleva a cabo en tres etapas: 1) Circuito Magnético, 2) Circuito Eléctrico y 3) Diseño Mecánico.

El programa obtiene el diseño del transformador utilizando como función objetivo el costo total evaluado. Este costo toma en cuenta no sólo el precio inicial del transformador sino también el costo de operación y mantenimiento durante su vida útil (20 años). El costo total evaluado (CTE) se define de la siguiente manera [6]:

$$CTE = CMT + A * PSC + B * PCC \quad (1)$$

Donde: *CMT* es el costo de materiales del transformador (en pesos mexicanos), *A* el costo de las pérdidas en vacío (\$89.90/W), *B* el costo de las pérdidas con carga (\$44.28/W) [6], *PSC* las pérdidas sin carga (W), *PCC* las pérdidas con carga (W).

El programa de diseño tiene las siguientes variables de iteración: Vueltas del embobinado de baja tensión, calibres de conductores de alta tensión y baja tensión, densidades de flujo magnético y anchos de láminas. Se utilizan 11 calibres de alambre magneto para alta tensión, 7 diferentes cintas de aluminio para el devanado de baja tensión y 4 diferentes anchos de lámina del núcleo. Para determinar el transformador cuyo diseño cumple con la función objetivo se varía la densidad de flujo. Para el caso de núcleos de material amorfo la densidad de flujo magnético inicia en 11kG y se incrementa en 0.1 hasta llegar a 15kG y se asume un factor de espacio de 0.85 (descrito más adelante). Para el diseño con núcleo de acero al silicio la densidad de flujo magnético inicia en 15kG y se incrementa en 0.1 hasta llegar a 17kG y el factor de espacio se toma de 0.97. Por falta de espacio no se dan más detalles del algoritmo del programa de diseño, pero los lectores interesados pueden obtener más detalles sobre el funcionamiento del programa utilizado en el presente trabajo en [8].



**Figura 1.** Comparación de pérdidas magnéticas en núcleos de metal amorfo y de acero M3 en W/kg para diferentes valores de densidad de flujo.

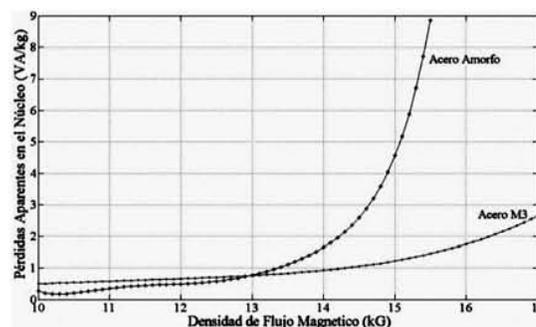
### Características de los materiales magnéticos utilizados y sus factores para el diseño de transformadores

En las Figuras 1 y 2 se muestran los valores de pérdidas en el núcleo y pérdidas aparentes proporcionados por los fabricantes de metal amorfo y acero eléctrico M3 [9] [10]. La Figura 1 muestra las pérdidas en vacío (núcleo) para ambos materiales.

El factor de destrucción del núcleo del transformador es el índice de las pérdidas del núcleo para un transformador totalmente ensamblado entre el producto del peso del núcleo por las pérdidas proporcionadas por el fabricante del material magnético. Algunos de los factores que pueden incrementar las pérdidas en el núcleo son: 1) El manejo impropio del acero del núcleo durante la fabricación del transformador; 2) Una capa pobre de aislamiento de la laminación; 3) Arreglos impropios de los entrehierros del núcleo; 4) Rebabas formadas en el núcleo que causan cortocircuitos entre laminaciones. En el programa de cómputo desarrollado para el diseño de transformadores monofásicos se utilizó un factor de destrucción de **1.06** para tomar en cuenta estos factores en pérdidas adicionales.

En la Figura 2 se muestran las pérdidas aparentes en núcleos para el acero al silicio M3 y material amorfo. Se puede observar que a bajas densidades de flujo magnético, el núcleo de metal amorfo tiene menos pérdidas en comparación con el acero M3, pero a altas densidades el metal amorfo se satura y por tanto las pérdidas aumentan considerablemente.

Factor de espacio o factor de laminación es el índice de compactación que se logra en el acero eléctrico de un núcleo. También se le conoce como factor de apilamiento. La presión máxima de compresión de las de las laminaciones del núcleo no debe exceder el límite de 1,0MPa para evitar la reducción excesiva de la resistividad del aislamiento [11].



**Figura 2.** Comparación de pérdidas aparentes de un transformador con núcleo de metal amorfo y de acero M3.

El factor de espacio en el acero al silicio es aproximadamente de 0.96% ensamblado a 10 psi. El factor de espacio del acero amorfo utilizado en los diseños es de 0.85% [12], se selecciona este valor porque es lo recomendado por el fabricante del material amorfo.

### Modelado de las laminaciones de material amorfo y acero al silicio

Los núcleos de acero amorfo tienen pérdidas equivalentes a 0.26W/kg, cuando funcionan a 60Hz y una densidad de flujo de 1.35T, esto representa una gran calidad. En comparación el acero al silicio tiene 0.63W/kg (40% más) a esta misma densidad. En la Figura 3 se presentan las curvas de pérdidas para el acero amorfo representadas con polinomios de orden 4, 5 y 6 y se determina cuál de ellos se ajusta más a la curva del fabricante. Para determinar el mejor ajuste se utilizará el error cuadrático medio y el error medio [13]:

$$e_{cua}(f) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |f(x_i) - y_i|^2} \quad (2)$$

$$e_{medio}(f) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |f(x_i) - y_i| \quad (3)$$

Donde:  $x$  es la densidad de flujo en kG,  $n$  es el número total de densidades de flujo magnético,  $y$  es el valor real de las pérdidas del acero proporcionado por el fabricante,  $f(x_i)$  representa al polinomio que se obtiene por mínimos cuadrados [13]. La notación para representar los polinomios es  $fm(x_i)$ , donde  $f$  representa el polinomio y  $m$  el grado, por ejemplo para un polinomio de grado seis la expresión que se utiliza es  $f_6(x_i)$ .

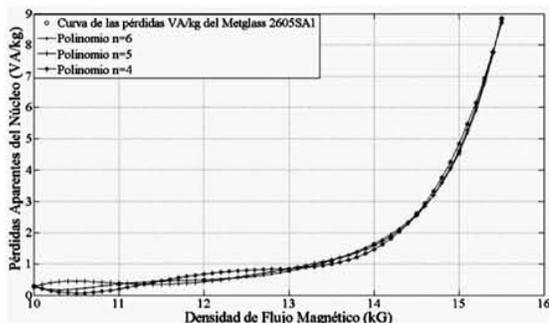
En la Tabla I se tienen los resultados al evaluar los diferentes polinomios con respecto a la curva formada por los puntos que proporciona el fabricante de acero amorfo. Aparece claramente la ventaja que tiene el polinomio de grado seis con respecto a polinomios de menor orden, tanto el error medio como el error cuadrático medio fueron menores. Entonces el polinomio que mejor se ajusta a los valores de pérdidas aparentes del acero amorfo es:

$$f_6(x) = 0.0074x^6 - 0.552x^5 + 17.05x^4 - 280.35x^3 + 2585.366x^2 - 12677.634x + 25820.946 \quad (4)$$

**TABLA I.-** Resultados obtenidos de la evaluación del error promedio y el error cuadrático medio en los polinomios de grado 6, 5, 4

Grado del polinomio ( $m$ )	$e_{medio}(f_m)$	$e_{cua}(f_m)$
6	0.0286	0.0858
5	0.1385	0.4157
4	0.3841	1.1521

En la Figura 3 se observa la comparación entre los polinomios  $f_6(x)$ ,  $f_5(x)$ ,  $f_4(x)$  y la curva real de pérdidas aparentes. También puede observarse que el polinomio de grado 6 es el que mejor se ajusta a la curva de pérdidas aparentes del Metglass 2605SA1.



**Figura 3.-** Comparación de los polinomios de grado 6, 5, 4 para el ajuste de la curva de pérdidas aparentes del fabricante Metglass 2605SA1.

Ahora se obtiene el polinomio que se ajusta a la curva de pérdidas en el núcleo en W/kg para el material amorfo dadas por el fabricante. Para esto se utilizó el método de mínimos cuadrados y se obtuvo el mejor ajuste con un polinomio de grado tres. La notación con la que se representa el polinomio es  $q_m(x)$  donde  $q$  es el polinomio y  $m$  el grado:

$$q_3(x) = 0.0003x^3 - 0.006x^2 + 0.0715x - 0.2288 \quad (5)$$

El error cuadrático medio del polinomio de orden 3 obtenido por mínimos cuadrados fue de 0.0850. En [8] se proporcionan los valores de las pérdidas para el material amorfo.

Para el acero al silicio grado M3 podemos encontrar las curvas de pérdidas en el núcleo y las pérdidas aparentes en la información que nos proporciona el fabricante de dicho material [10]. Los polinomios que se ajustan a las curvas de pérdidas en el acero al silicio se muestran a continuación. El polinomio para la curva de pérdidas aparentes en el acero al silicio M3 es:

$$f_5(x) = -19.67757 + 7.68509x - 1.193769x^2 + 0.09271119x^3 - 0.00359027x^4 + 0.00005564x^5 \quad (6)$$

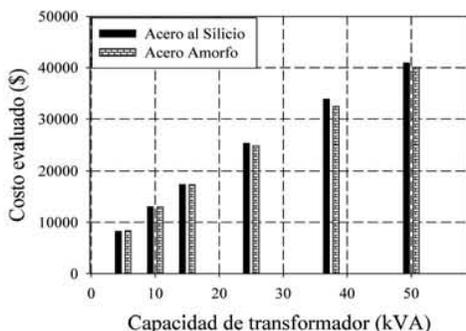
El polinomio para la curva de pérdidas en W/kg para el acero al silicio M3 es:

$$q_5(x) = 0.24517740 + 0.23723880x - 0.07519870x^2 + 0.01137693x^3 - 0.00076942x^4 + 0.00001938x^5 \quad (7)$$

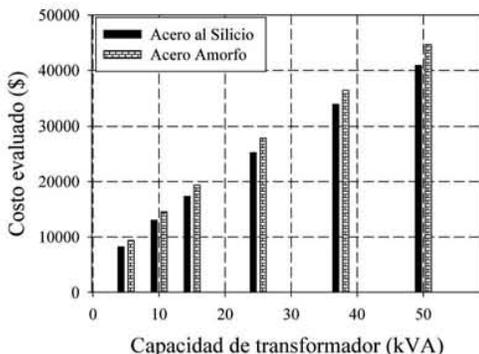
Con base en los polinomios obtenidos se realizaron los diseños correspondientes de los núcleos de metal amorfo y acero al silicio.

### Comparación y Resultados

Se obtuvieron diseños de transformadores para las capacidades de 5 a 50kVA, utilizando como función objetivo el costo evaluado. Esto se aplicó tanto para el transformador de metal amorfo como para el acero al silicio M3. El precio del acero al silicio M3 se mantuvo en \$50/kg. Los resultados para el metal amorfo se obtuvieron para 2 costos diferentes: \$75/kg y \$100/kg. Las simulaciones correspondientes se muestran en las Figuras 4 y 5. En la Figura 4 se muestran los costos evaluados con el precios de \$75/kg; se puede comprobar que el costo evaluado en transformadores de metal amorfo es menor en 7.9% que en los transformadores de acero al silicio. En la Figura 5 se muestra que el costo evaluado de los transformadores de acero amorfo con un precio de \$100/kg es mayor en un 12% que para los transformadores de acero al silicio M3. En la Figura 6 se muestran las pérdidas sin carga contra capacidades de transformadores con núcleo de metal amorfo y acero al silicio, se observa que el transformador con núcleo de acero amorfo tiene menores pérdidas en un 40% que en los transformadores de acero al silicio.



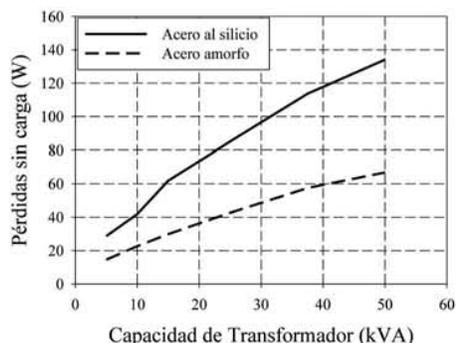
**Figura 4.** Costo total evaluado de transformadores monofásicos. Los costos considerados del acero al silicio y metal amorfo son \$50/kg y \$75/kg respectivamente.



**Figura 5.** Costo total evaluado de transformadores monofásicos. Los costos de considerados del acero al silicio y metal amorfo son \$50/kg y \$100/kg respectivamente.

### Conclusiones

Este artículo ha presentado una comparación de costos evaluados en transformadores de distribución con núcleos construidos con dos diferentes metales: metal amorfo y acero al silicio M3 (acero convencional), con el objetivo de observar cuál diseño presenta el menor costo total evaluado. En todas las simulaciones se cumplieron con restricciones impuestas por la norma (corriente de excitación, pérdidas en el núcleo, pérdidas totales, eficiencia e impedancia). Para las capacidades analizadas de 5 a 50 kVA resulta que los transformadores con material amorfo presentan un menor costo total evaluado cuando el costo del acero amorfo es \$75/kg. Cuando el costo del acero amorfo es de \$100/kg, el costo total evaluado de los transformadores es mayor que utilizando el acero convencional.



**Figura 6.** Pérdidas sin carga para transformadores con núcleo de acero amorfo y acero al silicio.

### Referencias

- [1] J. C. Olivares, I. López-García, E. Campero-Littlewood, R. Escarela-Pérez y J.L. Hernández Ávila, (2007), "Transformadores con núcleo de metal amorfo". *Vigésima Reunión de Verano de Potencia, Aplicaciones Industriales y Exposición Industrial (IEEE sección México)*, RVP-AI 2007, 8 al 14 de julio de 2007.
- [2] W. J. Ross y T. M. Taylor, (1993), "Amorphous metal transformer cores save energy and capacity investment". *IEEE Electricity Distribution Conf.*, pp. 5.24/1-5.24/4.
- [3] Prolec GE, (2008), "Mejoras tecnológicas para reducir el costo de propiedad de los Transformadores de Distribución". *3º Simposium Latinoamericano de la Energía*, México. pp. 32
- [4] Anónimo: "Amorphous-Core Transformers Deserve Another Look", *Transmission and Distribution*, No. 43, pp. 8, December 1991.
- [5] Norma NMX-J116-ANCE-2006, Norma Mexicana ANCE, Transformadores de distribución tipo poste y tipo subestación.
- [6] M. Yamamoto, T. Mori, T. Kawasaki, K. Tsutsui, T. Itoh and T. Yagisawa. "A Design Study of Amorphous Core Transformer". *IEEE Trans on Mag-20*, No5, pp. 1771-3, September 1984.
- [7] Ángel G. Estrada Chablé, J. C. Olivares Galván, Marco A. Venegas Vega, Rafael Escarela Pérez. "Impacto del Costo Cobre/Aluminio en el Diseño de Transformadores con Bobina Alta-Baja". *ROPEC*, del 4 al 6 de noviembre del 2009, Morelia, Michoacán.
- [8] Juan C. Olivares-Galván, Pavlos S. Georgilakis, Francisco de León, and Rafael Escarela-Pérez, "Optimal Design of Shell-Type Distribution Transformers," Enviado a *Electric Power Components & Systems*, pp. 7, Agosto 2009.



- [9] Manual del Material Metglas. Inc. Designing For Metglas Amorphous Metal Distribution Transformers (AMDT). U.S.A. Metglas. Inc, pp. 18, 2004.
- [10] Allegheny Ludlum Corporation. *Technical Data Silectron Grain-Oriented Silicon Steel*. U.S.A. Allegheny Ludlum Corporation, pp.37, 1996.
- [11] J. C. Olivares, E. Campero-Littlewood, Georgilakis Pavlos, "Core Lamination Selection in Distribution Transformers", Submitted to IET Electric Power Applications. Septiembre 2009.
- [12] Pavlos S. Georgilakis, Marina A. Tsili, Athanassios T. Souflaris. "A Heuristic Solution to the Transformer Manufacturing Cost Optimization Problem". *Journal of Materials Processing Technology* 181, pp. 6, 2007.
- [13] John H. Mathews, *Métodos Numéricos con MATLAB*, Prentice Hall Educación, 3era edición. U.S.A., pp. 273-322, 1999.