



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

OPTIMIZACIÓN TOPOLOGICA DE PIEZAS MECANICAS EMPLEANDO ALGORITMOS GENÉTICOS

Javier L. Mroginski ^{*.1,3}, Pablo A. Beneyto ¹, Cesar G. Veroli ²,

Oscar R. Lucca ¹ y Javier Baravalle ¹

^{*1} Dep. de Mecánica Aplicada, Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional del Nordeste

² Dep. de Mecánica, Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional del Nordeste

³ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas (CONICET)

Av. Las Heras 727 Resistencia Chaco Argentina

correo-e: javierm@ing.unne.edu.ar

RESUMEN

Una buena parte de los problemas de la ingeniería que involucran el diseño estructural de piezas mecánicas pueden ser abordados mediante el empleo de teorías simplificadas de la resistencia de materiales o bien mediante técnicas numéricas, como el Método de los Elementos Finitos. En ambos casos, las soluciones abordadas son determinísticas, perdiéndose el carácter heurístico del problema de diseño óptimo (Belegundu and Chandrupatla, 1999). En estos casos pueden emplearse técnicas iterativas de búsqueda donde la solución no es única, sino que está encerrada en un intervalo.

En el presente trabajo se desarrollo una herramienta computacional que permite optimizar la topología de piezas empleadas en la industria metalmecánica. Basado en Algoritmos Genéticos, el software desarrollado permite determinar soluciones óptimas a problemas de diseño estructural, mejorando sustancialmente tanto la seguridad como la economía de las piezas estudiadas.

Una de las principales características de dicho software radica en un análisis previo de sensibilidad de las variables (o genes) que intervienen en el problema (Mroginski, et al. 2013) que mejora notablemente la convergencia de la solución en situaciones donde se presentan grupos de variables con baja incidencia en la función objetivo.

Los resultados numéricos presentados demuestran la robustez y la convergencia del algoritmo propuesto, aplicado al diseño de piezas estructurales.

Palabras Claves: Algoritmos Genéticos, Método de Elementos Finitos, Optimización Multiobjetivo,

Diseño Estructural, Análisis de Sensibilidad



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

1. INTRODUCCIÓN

Numerosos problemas de ingeniería que involucran el diseño de piezas estructurales pueden ser abordados mediante el empleo de las teorías simplificadas de la resistencia de materiales o bien, mediante el Método de los Elementos Finitos, conduciendo, en ambos casos, a soluciones determinísticas. Sin embargo la solución del diseño óptimo de una estructura no puede ser obtenida en virtud del carácter heurístico de la misma. En estos casos pueden emplearse técnicas iterativas de búsqueda donde la solución no es única, sino que está acotada a un intervalo [1].

Usualmente, la metodología de diseño está íntimamente relacionada con la experiencia del ingeniero estructuralista o con las restricciones propias del proyecto de ingeniería, descartando cualquier análisis de optimización que tienda a mejorar el diseño inicial. Sin embargo, a menudo, la economía de materiales ha llevado a buscar alternativas de diseño con el objetivo de optimizar el peso (equivalente a la cantidad de material), sin dejar de lado la funcionalidad y la seguridad [2,3].

Dentro de los problemas que se enmarcan en el diseño estructural es posible mencionar la optimización de sistemas reticulados tanto de dos dimensiones como de tres dimensiones [4], diseño de pórticos planos y espaciales, secciones mixtas o compuestas, topología de secciones estructurales, etc.

En este trabajo se plantea el desarrollo de una herramienta computacional basada en Algoritmos Genéticos (AG) aplicado al diseño de piezas mecánicas, buscando minimizar la deformación de la estructura como así también la cantidad de material utilizado, a través de una formulación del tipo multiobjetivo [5].

2. DESCRIPCIÓN DEL ALGORITMO

Los AG deben su origen a la teoría de la evolución de Darwin, según la cual de una población de individuos los más aptos tienen mayores probabilidades de supervivencia. En un problema de optimización, los individuos representan las distintas soluciones al problema y su aptitud al medio se define mediante la función de evaluación (o función objetivo) que es la función cuyo valor extremo es buscado.

2.1. Características generales

Algunas de las características principales del algoritmo propuesto son las siguientes:

- El algoritmo es de tipo elitista, los individuos con mayor probabilidad de ser elegidos de la población pasan a la generación siguiente sin pasar por el procedimiento de cruzamiento.



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

- Restricciones solamente en cotas inferior y superior de las variables.
- Procedimiento iterativo escalonado/selectivo con la finalidad de centrar la búsqueda en las variables con mayor sensibilidad.
- Renovación parcial de la población con el fin de evitar que la población se sature con los mejores individuos y evitar el paso de mutación.

2.2. Características particulares

En la Fig. 1 se presenta el pseudocódigo elemental del AG implementado en este trabajo en el cual se describen algunas de las principales características del mismo.

```
BEGIN
Inicialización de variables
SENSITIVITY Análisis de sensibilidad
FOR Bucle sobre los grupos de variables
  Generación de la población inicial
  FOR Bucle sobre el número de generaciones
    FOR Bucle sobre generaciones
      Evaluación de la función objetivo
      Determinación del conjunto elitista
      Selección
      IF Generación impar
        Smart Crossover
      ELSE Generación par
        Multiple Crossover
      END IF
      Población = Pob.Cruzada + Elit
    END FOR
  END FOR
  Renovación de parte de la población
END FOR
END FOR
END
```

Figura 1. Pseudocódigo AG propuesto

2.3. Iniciación

En este punto se definen las variables del problema, entre ellas se encuentra el tamaño de la población *PopSize*, el número de generaciones *ngen*, la cantidad de variables *numvars*, el porcentaje de individuos que no se renuevan *porpas* y la cantidad de individuos del elit *Nelit*.

2.4. Análisis de sensibilidad

Previo al inicio del algoritmo evolutivo se lleva a cabo un análisis de sensibilidad de las variables que intervienen en la conformación de los individuos. El principal objetivo de este estudio es agrupar las variables en tres conjuntos según su incidencia en el resultado de la función objetivo, con el fin de disgregar la búsqueda de la solución global en tres partes.



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

2.5. Generación de población inicial

La población inicial es generada mediante un algoritmo heurístico especialmente diseñado para cumplir las restricciones de cada problema. Los individuos son vectores de dimensión *numvars*.

2.5.1. Evaluación multiobjetivo

Se evalúa cada individuo según la función objetivo adoptada [6]. En el presente trabajo se adoptaron las siguientes funciones de evaluación empleando el Método de los Elementos Finitos:

f1 Coeficiente de seguridad.

f2 Minimización del contenido de material.

f3 Minimización del desvío estándar de la tensión normal.

El análisis multiobjetivo se llevó a cabo mediante una combinación lineal de las funciones anteriores a través de una función de interpolación ponderada según los pesos w_i de la Ec. (1) [2].

$$Func = \sum w_i f_i \quad (1)$$

2.5.2. Selección

El proceso de selección es del tipo "Simple Roulette", mediante el cual se eligen los individuos en función de las probabilidades de cada uno utilizando tiros aleatorios. Las probabilidades son calculadas mediante una función de escalado que disminuye el inconveniente de saturación de la población con los individuos mejor adaptados [1,7].

2.5.3. Cruzamiento

En este módulo del algoritmo se implementó un procedimiento mixto de cruzamiento, intercalando procedimientos de cruzamiento diferentes. Para generaciones impares se utilizó el tipo de cruzamiento denominado Smart Crossover dado que la combinación entre las variables no es aleatoria sino que contiene un significado físico, mientras que en generaciones pares se emplea la técnica de cruzamiento Múltiple Crossover que genera un vector aleatorio de dimensión *numvars* con las posiciones de cruzamiento.

2.5.4. Renovación

Con la finalidad de evitar que el AG quede atrapado en óptimos locales se emplea una técnica de renovación de un porcentaje de la población. Este porcentaje debe ser pequeño para evitar que el



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

AG se transforme en un algoritmo de búsqueda aleatoria. Esto permite aumentar el campo de búsqueda del algoritmo y descartar los individuos menos adaptados del proceso evolutivo. Asimismo, el paso adicional de mutación no es requerido.

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En esta sección se presentan dos aplicaciones numéricas del AG propuesto. En ambos ejemplos se busca optimizar la forma de piezas conformadas en acero con las siguientes características:

- Módulo de Young, $E = 210.000 \text{ MPa}$
- Módulo de Poisson, $\nu = 0.3$

3.1. Optimización de una sección tubular

El primer ejemplo consiste en la determinación del diámetro interior y exterior óptimos de secciones tubulares sometidas a presiones internas de trabajo de 20 MPa. Al tratarse de un tubo de sección constante, bastará con la definición de los radios interior y exterior para establecer las dimensiones geométricas del tubo. En la Fig. 2 se muestra un esquema del individuo adoptado para la optimización de secciones tubulares.

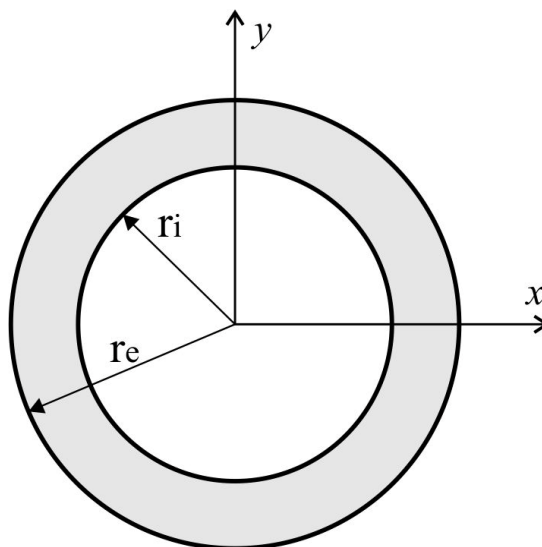


Figura 2: Esquema del individuo

Las funciones objetivo adoptadas en el análisis multiobjetivo son:

- 1) *func1*: minimización del coeficiente de seguridad
- 2) *func2*: minimización del peso de la sección



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

Para la determinación del *func1* se resuelve el problema mecánico mediante un software de elementos finitos desarrollado por los autores. Dicho software permite obtener el estado tensional en todo el dominio de la sección tubular, en forma exacta cuando son medidos en los puntos de Gauss de cada elemento finito. Para transferir el estado tensional a los nodos se realiza por la técnica de minimización de cuadrados. Luego el coeficiente de seguridad, *func1*, como el cociente de la diferencia entre las tensiones tangenciales y radiales máximas y la tensión de fluencia del material.

La función objetivo *func2* se obtiene sencillamente del área de la sección tubular hueca.

Una vez definidas las funciones objetivo se aplica la interpolación lineal de la Ec. (1) siendo la función de peso: $weight=[1 \ 0.00001]$ y se obtienen los siguientes resultados para dos tamaños de población en la Tabla 1.

Tabla1: Resultados de la optimización para dos tamaños de población

Popsiz = 50		
Radio interior (mm)	Radio exterior (mm)	Func
31.132	45.5671	0.3817
31.6025	45.7691	0.3817
31.0859	45.1548	0.3818
31.0581	45.4322	0.3817
30.6463	45.1361	0.3817
Popsiz = 100		
Radio interior (mm)	Radio exterior (mm)	Func
30.8455	45.1413	0.3817
30.9464	45.6170	0.3818
30.9197	45.1016	0.3818
31.2206	45.3074	0.3818
31.1314	45.2647	0.3818



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

Los valores de la función de peso responden a que en la función interpolada *Func*, la incidencia del peso y del coeficiente de seguridad se similar. Si solo se busca minimizar el coeficiente de seguridad ($weight=[1 \ 0]$), el resultado obtenido será el siguiente:

Tabla2: Resultados de la optimización para el mínimo coeficiente de seguridad

Popsize = 100		
Radio interior (mm)	Radio exterior (mm)	Func
1.8917	12.1374	1E-4

3.2. Optimización topológica de un eje tubular sometido a tracción

El siguiente ejemplo consiste en la determinación de la geometría óptima de un eje tubular con sección variable sometido a un estado tensional de tracción pura de 100KN. Dada la simetría en la geometría y cargas exteriores del problema (ver Fig. 3), éste puede ser modelado bajo la hipótesis de estado plano de tensiones, como se observa en la Fig. 4a.



Figura 3: Problema tridimensional

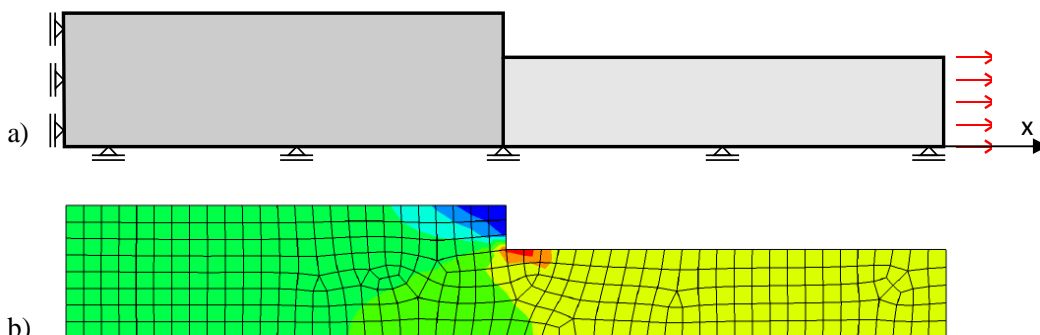


Figura 4: a) Esquema del problema mecánico, b) estado tensional axial.

Simulando la geometría y condiciones de borde correspondientes a la Fig. 4a en el software de elementos finitos Abaqus, se observa que donde se produce la reducción del diámetro del eje se genera una concentración elevada de tensiones normales x-x.

Esta concentración puede generar la plastificación de la pieza e incluso llevarla al colapso. Una forma de disipar tensiones consiste en modificar levemente la geometría del eje conduciendo a estados homogéneos de deformación.

En esta sección se plantea la determinación de la forma óptima del eje con el objetivo de reducir el factor de intensidad de tensiones en las cercanías al punto de bifurcación del eje. Para esto se implemento en el AG propuesto un individuo que permite variar la forma de la sección tubular de radio mayor, R, como se muestra en la siguiente figura.

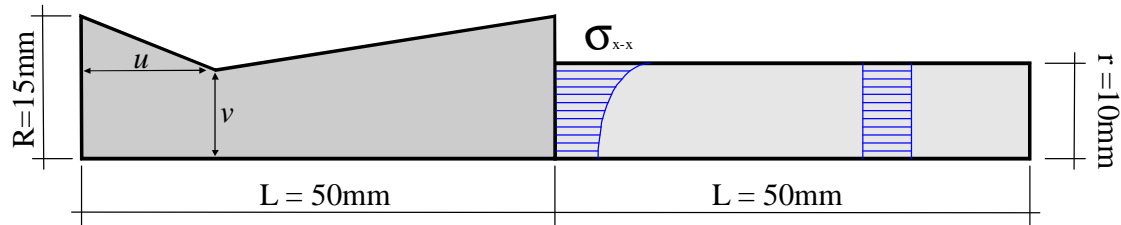


Figura 5: Esquema del individuo adoptado

La influencia de la forma del individuo en la concentración de tensiones se observa en la Fig. 5 donde puede apreciarse que el individuo identificado como 3 reduce notablemente la concentración de tensiones en la sección estudiada.

En la elección de las funciones para llevar a cabo el análisis multiobjetivo se adopto el desvío estándar de las tensiones normales según el eje x-x en dos secciones características del eje estudiado. La primer función, *func1*, corresponde entonces a la minimización del desvío estándar en el punto de bifurcación de los radios r y R. La segunda función, *func2*, minimiza también el desvío estándar pero en la sección correspondiente al vértice de coordenadas (u,v) . De esta manera, el individuo será evaluado según la función de interpolación Ec. (1).



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

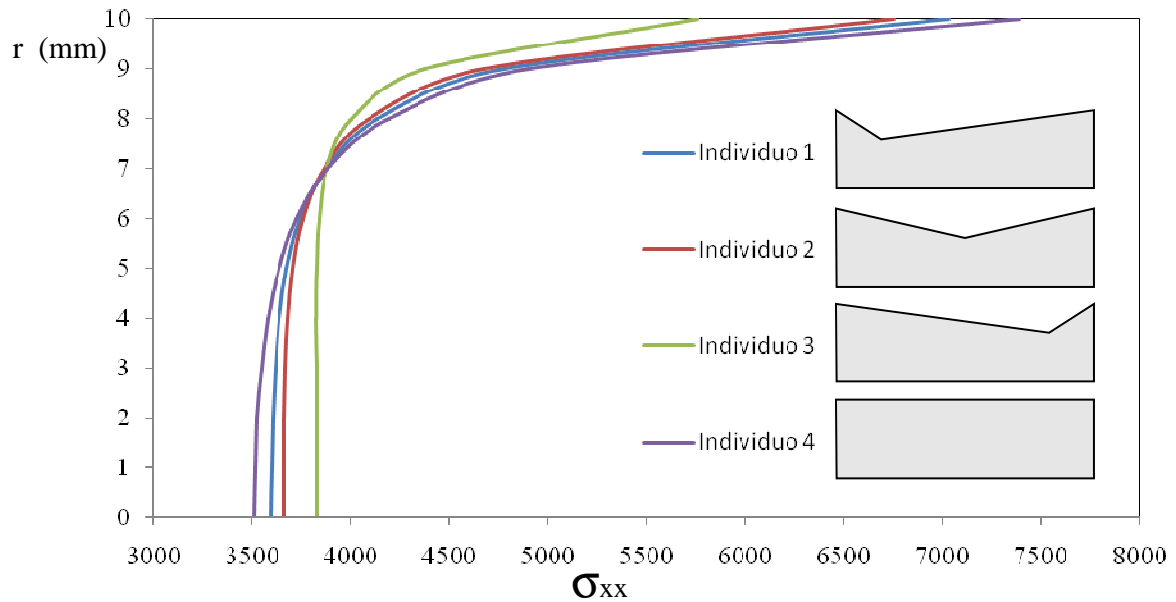


Figura 6: Incidencia de la forma del individuo

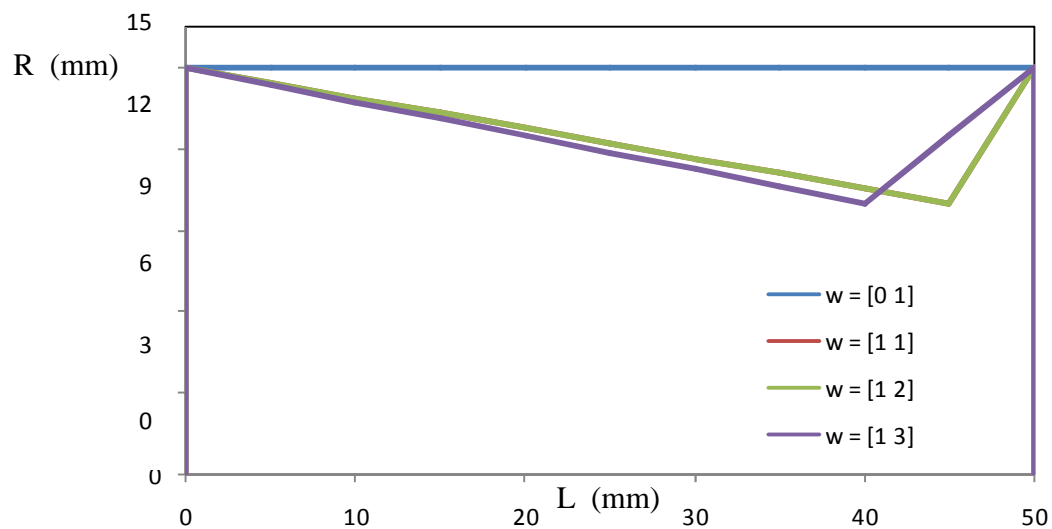


Figura 7: Soluciones obtenidas para diferentes funciones de peso



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

CONCLUSIONES

En el presente trabajo se ha desarrollado una herramienta computacional basada en Algoritmo Genético, que permite la optimización multiobjetivo de piezas mecánicas empleadas en la industria. Dicho algoritmo, permite encontrar soluciones óptimas que minimizan el estado de deformación de la estructura como así también la cantidad de material utilizado, a través de una formulación del tipo multiobjetivo. Los ejemplos numéricos adoptados consisten en una sección tubular clásica, sometida a presiones internas de trabajo y un aliviador de tensiones.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Belegundu, A. and Chandrupatla, T. Optimization Concepts and Applications in Engineering, Prentice Hall. 1999.
- [2] Beneyto, P.A.; Gutierrez, G.J.; Mroginski, J.L.; Di Rado, H.A. and Awruch A.M. . Análisis de la evolución de superficies de deslizamiento en suelos cohesivos utilizando optimización heurística, Mecánica Computacional, 31 , pp.845-856. 2012.
- [3] Coello, C. and Christiansen, A., Multiobjective optimization of trusses using genetic algorithms, Computer and Structures, 78 , pp.647-660.2000.
- [4] Deb, K. and Gulati, S.. Design of truss structure for minimum weight using genetic algorithm, Finite Element in Analysis and Design, 37, pp.447-465. 2001.
- [5] Huang, J. and Wang, D Z. . Topology optimization design for discrete structures using genetic algorithm, Journal of Ship Mechanics, 25 , pp.32-38.2008.
- [6] Mroginski, J.L. ; Gutierrez, G.J. ; Beneyto, P.A. and Di Rado, H.A.. Optimización topológica de sistemas estructurales bidimensionales discretos mediante algoritmos genéticos, Mecánica Computacional, 28, pp.2657-2674. 2009.
- [7] J.L. Mroginski, P.A. Beneyto y G.J. Gutierrez Implementación de un algoritmo selectivo de optimización de estructuras reticuladas espaciales. Matemática Aplicada, Computacional e Industrial, Vol. 4, pp 401-404 (ISSN 2314-3282) (2013)
- [8] Talaslioglu, T. . A new genetic algorithm methodology for design optimization of truss structures: Bipopulation-based genetic algorithm with enhanced interval search, Modelling and Simulation in Engineering, 2009, pp.1-28.2009.



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI