

SINTONIZACIÓN DE GANANCIAS DE REGULADORES PID APLICADOS A UN CONVERTIDOR MULTICELULAR POR MEDIO DE UN ALGORITMO COMPETITIVO IMPERIALISTA

García Mejía Juan Fernando¹, Flores Fuentes Allan Antonio¹, Ambriz Polo Juan Carlos², González Morales Maximiliano¹, Granda Gutiérrez Efrén Everardo¹, García Mejía José Antonio¹
 Universidad Autónoma del Estado de México¹, Tecnológico de Estudios Superiores de Jocotitlan²
 Centro Universitario UAEM Atlacomulco
 Carretera Toluca-Atacomulco Km.60 Atlacomulco Estado de México
 Tel. 7121220436
 e-mail fgarciam@uaemex.mx

RESUMEN.

Los convertidores de energía multicelulares son circuitos electrónicos que transforman corriente directa a alterna con la finalidad de energizar cargas resistivas, inductivas, capacitivas o mixtas como el caso de los motores de corriente alterna. Están formados por dispositivos semiconductores de conmutación, diodos y capacitores flotados, estos últimos funcionan como fuentes de voltaje ideales cuyo funcionamiento es regulado por controladores Proporcionales Integrales y Derivativos, cuyas ganancias son sintonizadas habitualmente por medio del criterio de Zigler-Nichols o de forma alterna por medio de algoritmos evolutivos. En este trabajo se muestra la sintonización de ganancias de los controladores del tipo Proporcional-Integral-Derivativo aplicados en la regulación de voltaje de los capacitores de un convertidor multicelular de 3 células por medio de un Algoritmo Competitivo Imperialista, el cual es soportado teóricamente en el Darwinismo Social descrito por Herbert Spencer y desarrollado por Atashpaz Gargari y Caro Lucas

Palabras Clave: plantilla, electro, indicaciones, publicación

ABSTRACT.

Multicellular energy converters are electronic circuits that transform direct current to alternating in order to energize resistive, inductive, capacitive or mixed loads as the case of alternating current motors. They are formed by commutation semiconductor devices, diodes and floating capacitors, the latter function as ideal voltage sources whose operation is regulated by Proportional Integral and Derivative controllers, whose gains are usually tuned by the Zigler-Nichols criterion or alternately by evolutionary algorithms. This paper shows the gains tuning of the controllers of Proportional-Integral-Derivative type applied in the voltage regulation of the capacitors of a 3-cell multicellular converter by means of an Imperialist Competitive algorithm, which is theoretically supported in Social Darwinism described by Herbert Spencer and developed by Atashpaz Gargari and Caro Lucas

Keywords: template, electro, guidelines, publication

1. INTRODUCCIÓN

Los convertidores multicelulares son circuitos electrónicos que convierten corriente directa en alterna para consumos de corriente elevados [1]. Son una serie de arreglos de

semiconductores de potencia y capacitores flotados que funcionan como fuentes ideales de voltaje. Es posible modelar una célula de conmutación a partir del esquema mostrado en la figura 1, utilizando un par de dispositivos de conmutación (Mosfet y Mosfet 1) y un capacitor [2].

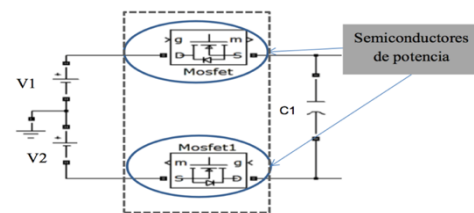


Figura. 1 Modelo de una célula de conversión

La topología general de un convertidor multicelular se muestra en la figura 2 donde se ve el conjunto de células de conmutación interconectadas entre sí [3].

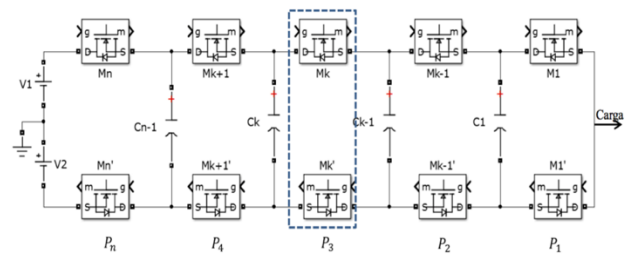


Figura 2 Convertidor Multicelular

Donde M_n , M'_n y C_{n-1} forman la P -ésima célula, la cual está separada por medio de dos capacitores flotados, dado que no se encuentran referenciados a tierra, y que funcionan como fuentes ideales de voltaje. Por lo tanto, un convertidor de P_n células está constituido por C_{n-1} capacitores, cuyos voltajes están determinados por medio de las ecuaciones 1 y 2

$$V_T = V_1 + V_2 \quad (1)$$

$$V_k = \frac{k * V_T}{n} \quad (2)$$

donde V_T es el voltaje de alimentación del convertidor, k representa la célula y n el número total de células del convertidor. Con base en lo anterior en [3] y [4] se han diseñado convertidores de 3 células como el mostrado en la

figura 3, donde los voltajes presentes en los capacitores son regulados por medio de controladores del tipo Proporcional-Integral-Derivativo (PID), dado que es condición que estos estén estables (con mínimas variaciones) en todo momento.

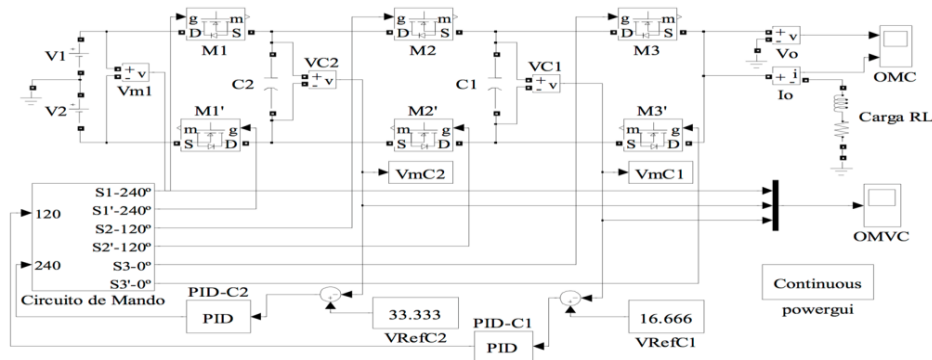


Figura 3 Esquema de un convertidor multicelular de 3 células

Las funciones de transferencia de los dos controladores PID y de los capacitores de las células de conversión se muestran en las ecuaciones 3, 4 y 5 respectivamente [4].

$$PID(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (3)$$

$$C_1(s) = \frac{0.99596}{0.00002655s^2 + 0.02755s + 1} \quad (4)$$

$$C_2(s) = \frac{0.99759}{0.000655s^2 + 0.0518s + 1} \quad (5)$$

donde:

- K_p es la ganancia proporcional
- K_i es la ganancia integral
- K_d la ganancia derivativa

Los valores K_p, K_i, K_d pueden ser obtenidos por medio del criterio de Ziegler-Nichols, un método heurístico basado en la respuesta a un escalón. La principal desventaja de este método consiste en que obliga a la planta a operar en condiciones cercanas a la zona de estabilidad marginal, lo cual implica que puede tener un comportamiento inestable en ciertas condiciones [5], una alternativa a esta situación, es el uso de algoritmos evolutivos para el cálculo de ganancias de este tipo de controlador, como lo realizó. Sin embargo, a partir del teorema "No Free Lunch" propuesto por Wolpert y Macready el cual indica que no existe el algoritmo evolutivo que resuelva de manera satisfactoria todos los problemas de optimización [6], es por eso que surge el planteamiento de realizar un ajuste de

ganancias con un Algoritmo Competitivo Imperialista; cuyos resultados son presentados en este trabajo.

2. ALGORITMO EVOLUTIVO COMPETITIVO IMPERIALISTA

Una heurística propuesta por Atashpaz-Gargari y Lucas de la Universidad de Tehran en 2007 es el Algoritmo Imperialista Competitivo (ICA, por sus siglas en inglés) cuyo diagrama de flujo se muestra en la Figura 4. Su andamiaje teórico se encuentra soportado en el Darwinismo Social propuesto por Herbert Spencer [7]. En este postulado los países se dividen en dos clases: Imperios y Colonias, donde los primeros compiten entre si para obtener beneficios de los segundos, los cuales en algún momento dado pueden convertirse en fuerzas preponderantes que intercambian su posición de poder con los imperios.

Un ICA está compuesto por modelos matemáticos e inspirados en procesos históricos y políticos del imperialismo del siglo XIX [8], comienza con imperios iniciales, formados por colonias y estados imperialistas, las competiciones imperiales entre estos imperios forman la base de ICA. Sus etapas, de manera general son: Asimilación, Revolución y Competencia, este proceso continúa hasta que se cumple la condición de paro o se cumple el número predefinido de iteraciones del algoritmo. [8]

Los ICA tienen una población aleatoria inicial. Cada individuo se llama país y forman una matriz de valores variables. En un problema de optimización n-dimensional, un P país es una matriz $1 \times n$ donde a cada n componente se le denomina facility es decir, a nivel sociopolítico un elemento como industria,

comercio, marina, ejército, por mencionar algunos y le dan ventaja competitiva sobre otros (ecuación 6)

$$P = p_1, p_2, \dots, p_n \quad (6)$$

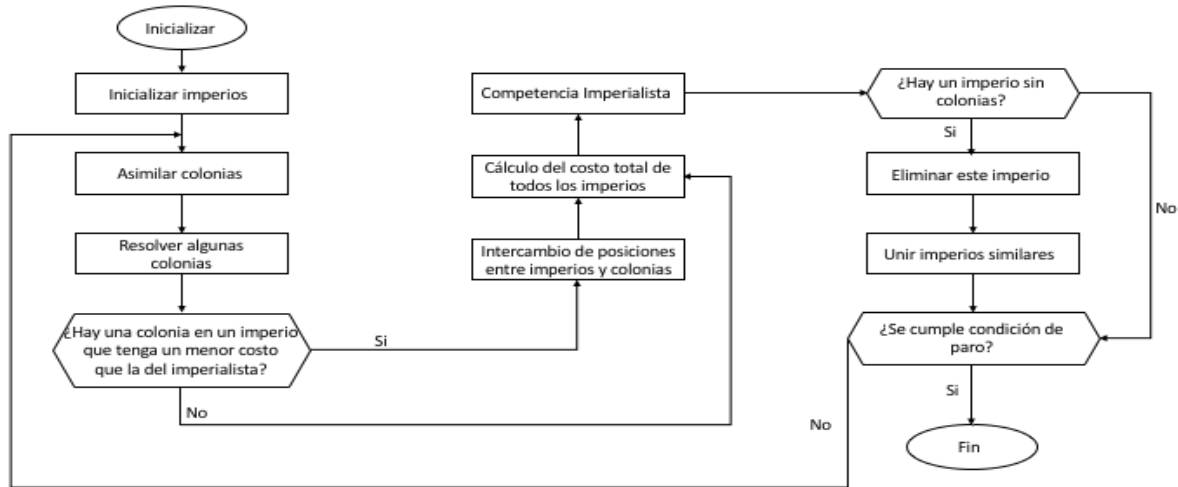


Figura 4 Diagrama de flujo de un ICA

En un ICA se forman imperios (Inicialización), formados por imperialistas (los países con valores de la función objetivo más altos) y sus colonias (asignadas al azar del resto de los países). El número de colonias iniciales N_{col} asignadas a cada imperialista dependen de su poder Pow_n , determinado por medio de la ecuación 7

$$Pow_n = \left\lfloor \frac{C_n}{\sum_{i=1}^{N_{imp}} c_i} \right\rfloor \quad (7)$$

Donde C_n (calculado a partir de la expresión 8) es el costo normalizado del c_n imperialista y N_{imp} es el número de imperios.

$$C_n = \text{maximo costo de imperiliastas} - c_n \quad (8)$$

Por otra parte c_n es el costo del n imperialista y es obtenido a partir de la valoración de los países en la función objetivo. De tal forma que N_{col} se calcula por medio de 9 a partir de N_{imp} , Pow_n y el número total de países N_{pop}

$$N_{col} = \text{round}\{Pow_n * (N_{pop} - N_{imp})\} \quad (9)$$

La asimilación de las colonias, es decir los movimientos que realizan estas en torno a su correspondiente imperialista es determinada por medio de la expresión 10

$$X_{new} = X_{old} + U(0, d) \quad (10)$$

Donde :

X_{new} nueva posición de la colonia

X_{old} posición anterior de la colonia

d distancia entre la posición de la colonia y su imperialista

La revolución consiste en un intercambio entre los roles del imperialista y la colonia en términos de cuales son los que tienen el mejor valor de la función objetivo.

Posteriormente es necesario calcular el poder TC_n de cada n -ésimo imperio, el cual esta determinado por los valores de las funciones objetivos de imperialistas y colonias, esto se puede observar en la ecuación (11) donde $\zeta \in [0,1]$

$$TC_n = \text{Costo}(\text{imperialista}) + \zeta * \text{promedio}\{\text{Costo}(\text{colonias})\} \quad (11)$$

Los imperios más fuertes, es decir con un mayor TC_n tienen una mayor posibilidad de poseer la colonia más débil del imperio más débil o con menor TC_n . De tal forma que se redistribuyen las colonias existentes. Cuando un imperialista pierde todas sus colonias se considera eliminado el imperio. El

algoritmo termina cuando solo existe un imperio y el imperialista es considerado la solución al problema de optimización.

3. METODOLOGÍA.

La ecuación 12 muestra el cálculo de la función de transferencia para los sistemas propuestos. Por otra parte, la ecuación 13 muestra la función objetivo a maximizar.

$$V_{c_n}(s) = \frac{PID_n(s)C_n(s)}{1 + PID_n(s)C_n(s)} * Vref_n \quad (12)$$

$$fobj_n(K_p^n, K_i^n, K_d^n) = \max \left(\frac{1}{1 + \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T E(K_p^n, K_i^n, K_d^n)^2}} \right) \quad (13)$$

Donde :

$V_{c_n}(s)$ representa el voltaje del n-esimo capacitor
 $C_n(s)$ es la función de transferencia del n-esimo capacitor

$PID_n(s)$ la función de transferencia del n-esimo controlador PID

$Vref_n$ es el voltaje de referencia del n-esimo sistema de control
 $fobj_n(K_p^n, K_i^n, K_d^n)$ es la función objetivo del n-esimo sistema de control

$\frac{1}{T} \int_0^T E(K_p^n, K_i^n, K_d^n)^2$ es el error cuadrático medio del n-esimo sistema de control en términos de las ganancias del control PID
 T es el tiempo de simulación

n es el número de sistemas de control usados el cual es $P-I$ células

Esto implica la generación de dos diferentes espacios de búsqueda (países) formados por vectores de números reales con el siguiente formato:

$$País = [k_p, k_i, k_d]^T$$

La tabla 1 muestra las condiciones de generación de los cromosomas, propuestas a partir del criterio de Nichols, para cada uno de los sistemas de control, los cuales son identificados como V_{c_1} y V_{c_2}

Tabla 1. Condiciones de generación de cromosomas

Cromosoma de V_{c_1}	Cromosoma de V_{c_2}
$K_p = ((random[0,1]) * 40)$	$K_p = ((random[0,1]) * 90)$
$= (20 + (random[0,1]) * 1000)$	$K_i = ((random[0,1]) * 1000)$
$= (20 + (random[0,1]) * 0.09)$	$K_d = ((random[0,1]) * 0.01)$

La tabla 2 muestra los experimentos realizados en este trabajo, los cuales permiten determinar si existen diferencias significativas por el uso de diferentes valores en el cálculo del poder del imperio

Tabla 2. Experimentos a realizar.

Test	Países	Colonias	Imperios	ζ
1	40	30	10	variable
2	40	30	10	0.1
3	40	30	10	0.2
4	40	30	10	0.3
5	40	30	10	0.4
6	40	30	10	0.5
7	40	30	10	0.6
8	40	30	10	0.7
9	40	30	10	0.8
10	40	30	10	0.9
11	40	30	10	1

4. RESULTADOS.

Las tablas 3 y 4 muestran los resultados estadísticos realizados sobre 40 ejecuciones, lo cual permite determinar cuál variante

del algoritmo cumple con los mejores criterios de estabilidad a través del cálculo de la repetitividad (desviación estándar entre media aritmética), Además se aplicó un test de Kolmorov-Smirnov, (con la finalidad comprobar el comportamiento estocástico de los experimentos propuestos). Esto es realizado para los sistemas de control V_{c_1} y V_{c_2} . La finalidad es demostrar la pertinencia del algoritmo ICA, como un método de sintonización de ganancias de controladores aplicados a un convertidor de energía multicelular.

El resultado del test de Kolmorov-Smirnoff permite mostrar cuales experimentos tienen un comportamiento estocástico. Para V_{c_1} .se observa que el valor de $\zeta = 0.8$ no se presenta un comportamiento determinado por una distribución de probabilidad normal; esta misma situación se presenta para el sistema V_{c_2} .cuando el valor de $\zeta = 0.2$ en ambos casos la significancia asintótica es menor a 0.05. Los valores de $\zeta = 0.4$ y $\zeta = 0.5$ para V_{c_1} .y V_{c_2} generan en promedio el valor más pequeño del error cuadrático medio. Para comprobar si existen diferencias estadísticamente significativas entre los experimentos con distribución normal, en ambas plantas, se aplica un test de Anova, el cual para ambos casos confirma que existen al menos dos grupos con similitudes estadísticas, por lo

tanto, se aplica un test de Tukey a ambos sistemas, los cuales se muestran en las tablas 5 y 6

Tabla 3. Experimentos a realizar Vc_1 .

Test	Valor Medio	Desviación Estándar	Repetitividad	Significancia asintótica (K-S)
1	661.0295	9.4175	1.4246	0.127
2	659.8847	9.5140	1.4417	0.200
3	664.8161	8.4431	1.2699	0.200
4	664.5582	10.3474	1.5570	0.200
5	657.8857	6.3383	0.96343	0.200
6	663.9005	7.2884	1.0978	0.200
7	659.7750	8.5489	1.2957	0.200
8	661.2110	7.5141	1.1364	0.200
9	661.2420	8.9391	1.3518	0.036
10	662.2578	8.5023	1.2838	0.200
11	661.0295	9.4175	1.4246	0.127

Tabla 4. Experimentos a realizar Vc_2 .

Test	Valor Medio	Desviación Estándar	Repetitividad	Significancia asintótica (K-S)
1	341.7205	3.6189	1.0590	0.200
2	342.8312	3.8886	1.1343	0.200
3	341.1626	4.3205	1.2664	0.017
4	340.9320	3.5347	1.0368	0.200
5	341.7076	3.4176	1.0002	0.200
6	339.7567	4.1984	1.2357	0.200
7	341.5460	3.6735	1.0755	0.200
8	340.6127	3.4658	1.0175	0.129
9	342.9572	3.6223	1.0562	0.200
10	341.6359	4.0280	1.1790	0.200
11	340.9348	3.9671	1.1636	0.200

Tabla 5 Experimentos a realizar Vc_1 .

Test	Grupo1	Grupo2
5	657,8856	
7	659,7749	659,7749
2	659,8847	659,8847
1	661,0295	661,0295
11	661,0295	661,0295
8	661,2110	661,2110
10	662,2578	662,2578
6	663,9004	663,9004
4		664,5581
3		664,8161

Tabla 6 Experimentos a realizar Vc_2 .

Test	Grupo1	Grupo2
6	339,7567	
8	340,6127	340,6127
4	340,9319	340,9319
11	340,9348	340,9348
3	341,1626	341,1626
7	341,5460	341,5460
10	341,6359	341,6359
5	341,7075	341,7075
1	341,7204	341,7204
2		342,8311

Con base a las tablas 3, 4, 5 y 6 es posible determinar que los mejores valores del ajuste de ganancias para cada sistema de control PID son los que se obtienen con valores de $\zeta = 0.4$ y $\zeta = 0.5$. Por lo tanto, las ganancias K_p, K_i, K_d obtenidas se muestran en la tabla 7.

La figura 5 (a) muestra los resultados de los ajustes propuestos en el sistema de control Vc_1 , en color azul se muestra el ajuste por ICA, mientras que en rojo el realizado por el criterio de Zigler-Nichols (Z-N) que forman el convertidor multicelular que se diseñó en este trabajo, por otra parte, la figura 5(b)

muestra los ajustes realizados en Vc_2 con las consideraciones descritas para la figura 5(a)

Tabla 7 Ganancias del controlador.

	K_p	K_i	K_d
Ajuste con ICA Vc_1 .	79.0676	110.7141	0.00782
Ajuste con Z-N Vc_1 .	51.0370	33073.821	0.0196
Ajuste con ICA Vc_2 .	32.7627	29.1681	0.07890
Ajuste con Z-N Vc_2 .	25.3935	309.0384	0.09400

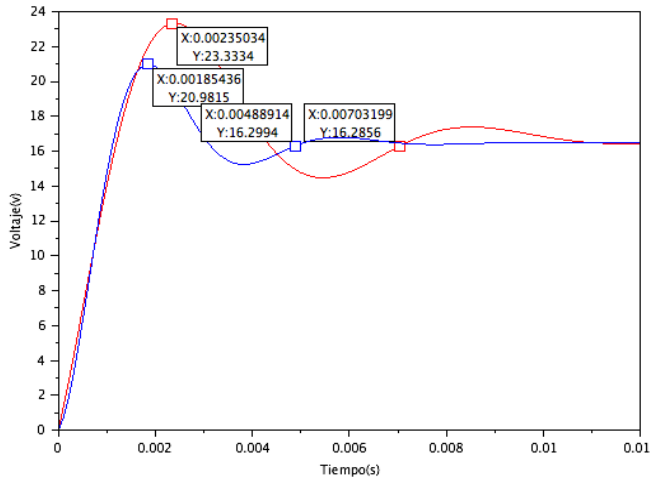


Figura 5(a) Respuesta de sistema 1

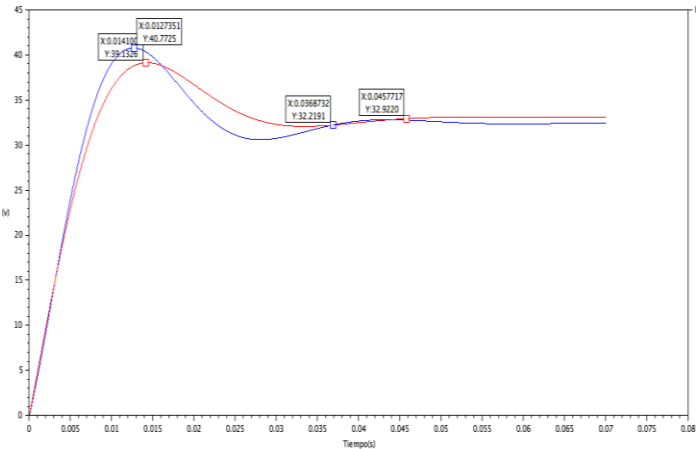


Figura 5(b) Respuesta de sistema 2

5. CONCLUSIONES

De acuerdo a la información registrada en las tablas 3,4,5,6 y 7, así como en la figura 5 se muestra que los ajustes realizados por medio de un ICA, se constituye como una alternativa aceptable frente al ajuste de Ziegler-Nichols. Una de las aportaciones de este trabajo es el estudio estadístico que se realiza sobre los ajustes realizados en un algoritmo evolutivo, los cuales permiten determinar si existe un comportamiento estocástico y sobre todo estudiar la repetibilidad, es decir que tanto varían las soluciones reportadas con respecto a las ejecuciones.

6. REFERENCIAS

[1] Gazzam, N., Benalia A: Observability Analysis and Observer Design of Multicellular Converters In: 8th International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC-2016). IEEE, Algiers, Algeria (2016).
 [2] Rossano Díaz I. O.: Tesis de maestría en Ciencias en Ingeniería Electrónica, "Sistema digital aplicado a un convertidor multinivel estático" Instituto Tecnológico de Toluca – Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, Toluca, Estado de México, México (2009).

[3] Flores Fuentes A. A.: Tesis de Doctorado en Ciencias en Ingeniería Electrónica, "Generador de RF de alta potencia por medio de un inversor multinivel", Instituto Tecnológico de Toluca – Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, Toluca, Estado de México, México (2009).
 [4] Flores Fuentes A. A.: Algoritmo Genético implementado en la optimización de los parámetros de un controlador PID aplicado a un convertidor estático de energía. En: Congreso Internacional de Ingeniería Electrónica Electro, pp 89-94. Instituto Tecnológico de Chihuahua, Chihuahua, Mex (2013)
 [5] Craig A. Kluever Dynamic Systems: Modeling, Simulation, and Control, Wiley, Estados Unidos (2015)
 [6] D.H. Wolpert "No free lunch theorems for optimization" IEEE transactions on evolutionary computation, vol. 1, no. 1, april 1997
 [7] Esmaeil Atashpaz-Gargari, Caro Lucas (2007) Imperialist Competitive Algorithm: An algorithm for optimization inspired by Imperialistic Competition IEEE Congress on Evolutionary Computation pp 4061-4067
 [8] Bayati, M. (2015). Using Cuckoo Optimization Algorithm And Imperialist Competitive Algorithm To Solve Inverse Kinematics Problem For Numerical Control Of Robotic Manipulator. Journal Of Systems And Control Engineering, 1-14.
 [9] Hosseini Seyedmohsen "A survey on the Imperialist Competitive Algorithm metaheuristic: Implementation in engineering domain and directions for future research" Applied Soft Computing (2014)