

# Algoritmos genéticos

## Una estrategia clave para abordar problemas de secuenciamiento en gran escala

Lic. Olivera, Carolina Ana <sup>1</sup>  
Departamento de Ciencias e Ing. de la Computación  
Universidad Nacional del Sur (UNS)  
Av. Alem 1253 - Bahía Blanca - Argentina  
aco@cs.uns.edu.ar

Ing. Frutos, Mariano <sup>2</sup> - Ing. Casal, Ricardo  
Departamento de Ingeniería  
Universidad Nacional del Sur (UNS)  
Av. Alem 1253 - Bahía Blanca - Argentina  
mfrutos@uns.edu.ar - rcasal@uns.edu.ar

**Resumen** - El trabajo aborda un problema de secuenciación que fue planteado por la Sociedad Francesa de Investigación Operativa y Ayuda a la Toma de Decisiones. El mismo describe una problemática existente en las plantas productivas de RENAULT, en Francia. El problema analizado consta de varios objetivos a minimizar definidos por los distintos “work center”. Se emplean funciones de composición que traducen las prioridades existentes entre estos objetivos de acuerdo con el tipo de planta que se considere. Para resolver este problema se propone un algoritmo multiobjetivo que aplica Técnicas Evolutivas. Se evaluó su desempeño sobre distintos escenarios propuestos por la compañía.

**Palabras Clave** - Algoritmos Genéticos, Optimización Multiobjetivo, Secuenciamiento, Producción.

### I. INTRODUCCIÓN

La referencia [1] es el punto de partida de un campo llamado “Algoritmos Genéticos” (AGs). Holland discutió el problema general de explorar un espacio de estructuras con planes reproductivos, que seleccionan y crean nuevas estructuras usando un conjunto de reglas denominadas operadores genéticos. La población de estructuras funciona bajo una presión selectiva, y como un resultado de estas reglas el objetivo es obtener, por evolución, mejores estructuras [2]. La meta central es comprender los principios subyacentes en los sistemas adaptativos, aquéllos capaces de automodificación, en respuesta a las interacciones con el medio en el cual deben funcionar. Desde la perspectiva de Holland la clave de estos sistemas adaptativos robustos, en la naturaleza, esta en el uso exitoso de la competición y la innovación para proveer la capacidad de responder dinámicamente a eventos anticipados y cambios ambientales [3].

En general, cualquier AG para resolver un problema tiene los siguientes componentes básicos: una codificación o representación del problema, que resulte adecuada al mismo; una manera de crear una población inicial de soluciones; una función de ajuste, también llamada función de evaluación o fitness; dos operadores genéticos, el operador de cruzamiento (crossover) entre dos individuos de la población y el operador de mutación (mutation) aplicable a los individuos obtenidos por crossover; y valores para los parámetros, tamaño de la población, probabilidad de mutación.

---

<sup>1</sup> Agradecimiento a la Comisión de Investigaciones Científicas (CIC), Provincia de Buenos Aires.

<sup>2</sup> Agradecimiento al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina.

En la actualidad adoptan diversas características cómo se puede observar en trabajos editados sobre este tipo de procedimientos [4], [5] y [6].

## 2. PROBLEMA PRESENTADO

A continuación se describe brevemente el problema estudiado, el mismo se puede encontrar en forma completa en [7] y [8].

La planificación y programación de la producción se inicia con el procesamiento de las órdenes originadas por los clientes las cuales son ingresadas al sistema por los vendedores. La frecuencia de transmisión de las órdenes de los clientes a las plantas fabriles es diaria y se produce en tiempo real. Desde la perspectiva del proceso de planificación y programación, cada una de las plantas debe establecer, en primer lugar, el día en el cual se producirá cada uno de los automóviles solicitados, verificando las capacidades de las instalaciones y los plazos de entrega que los vendedores pactaron con los clientes. Posteriormente, cada fábrica debe determinar para cada día la secuencia de vehículos a procesar a lo largo de la línea de producción. El establecimiento de esta secuencia diaria debería realizarse tratando de cumplir con el mayor número posible de restricciones asociadas con los requerimientos específicos de los distintos centros de trabajo intervinientes (Taller de soldadura, Taller de pintura y Línea de ensamblado).

En particular, el taller de soldadura no impone requerimientos sobre la programación diaria, motivo por el cual al momento de determinar la secuencia de vehículos correspondiente, el esfuerzo se centraliza en cumplir con los requerimientos definidos por el taller de pintura y la línea de ensamblado.

En el taller de pintura, el objetivo operativo fundamental radica en la minimización del consumo de solvente de pintura. Este solvente se utiliza para limpiar las pistolas de aplicación de pintura cada vez que se produce un cambio en el color entre un vehículo y el siguiente de la secuencia definida. Consecuentemente, desde el punto de vista de la operación del taller de pintura resulta necesario agrupar vehículos por color, esto es, de forma tal que se pueda minimizar el número de cambios de color en la secuencia programada de vehículos, es decir, programar los lotes de cada color de forma que resulten tan grandes como sea posible. No obstante el objetivo expuesto precedentemente tiene una cota superior, en razón de que las pistolas aplicadoras deben limpiarse regularmente, aún cuando no haya cambios de color en la secuencia. Esta condición constituye una restricción fuerte por lo cual cualquier secuencia que se proponga deberá respetarla.

En la línea de ensamblado, a los fines de equilibrar la carga de trabajo, los automóviles que requieren operaciones especiales, considerados “difíciles de ensamblar”, deben distribuirse uniformemente a lo largo de la secuencia total de automóviles. Idealmente, ninguna subsecuencia, incluida en la secuencia total de automóviles a producir, debería superar una cierta proporción de estos automóviles, relativa a la cantidad total a producir en dicha subsecuencia. El requerimiento anterior se

define a través de restricciones de montaje. Cada una de estas restricciones está asociada con características de los automóviles que requieren operaciones extra sobre la línea de montaje. Estas restricciones, quedan identificadas a través de un cociente  $N/P$ , que obliga a que como máximo  $N$  automóviles en cada subsecuencia consecutiva de  $P$  vehículos estén asociados con la restricción considerada. Por ejemplo, si  $N/P = 3/5$ , no debe haber más de 3 automóviles asociados con la restricción sobre cada subsecuencia de 5 vehículos. Existen dos tipos de restricciones de montaje, unas tienen un alto nivel de prioridad de verificación, y las otras tienen un bajo nivel de prioridad. Las restricciones de alta prioridad se corresponden con características del automóvil que requieren una fuerte carga de trabajo sobre la línea de montaje. Las restricciones de bajo nivel de prioridad resultan de características del automóvil que ocasionan pequeños inconvenientes sobre la cadena de ensamblado. Las restricciones de alto nivel deben ser satisfechas con preferencia a las restricciones de bajo nivel de prioridad. La verificación completa de todas las restricciones de montaje no puede asegurarse antes de generar el programa diario de producción. El problema podría resultar no factible. En consecuencia, estas restricciones se traducen en un objetivo a optimizar, correspondiente a la minimización del número de violaciones de las mismas.

El Problema a resolver es determinar una secuencia de vehículos que cumpla de la mejor forma posible con las exigencias del taller de pintura y de la línea de ensamblado. La Optimización multiobjetivo esta basada en tres objetivos fundamentales que se corresponden con (1) Minimizar el número de cambios de color, (2) Minimizar el número de violaciones de restricciones de montaje con alto nivel de prioridad y (3) Minimizar el número de violaciones de restricciones de montaje con bajo nivel de prioridad. Dependiendo de la planta de producción evaluada dichos objetivos se ponderaron de forma diferente. Para los problemas multiobjetivo planteados, se tiene una única restricción fuerte, la limitación sobre el máximo tamaño para los lotes de vehículos de un mismo color. No debe existir compensación alguna entre objetivos. la optimización del objetivo en el nivel  $O_{i+1}$  no debe producir desmejoras en el resultado del objetivo del nivel  $O_i$ , donde  $i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) se relaciona con el orden de los objetivos de optimización,  $i = 1$  corresponde al objetivo de mayor importancia.

El número de violaciones de una restricción de montaje  $N/P$  en una subsecuencia de  $P$  vehículos puede calcularse tomando el número de vehículos asociados con la restricción de montaje en la subsecuencia considerada, sustrayéndole el numerador de la restricción de montaje  $N$ .

Además, debe tenerse en cuenta para el cálculo del número de violaciones de restricciones de montaje en el día  $D$ , los últimos vehículos programados en el día  $D-1$ . Esto implica que las subsecuencias consecutivas a considerar (para el cálculo del número de violaciones de restricciones de montaje) deben comenzar en el día de producción  $D-1$ . Para una restricción  $N/P$ , la primera secuencia a considerar contiene los últimos  $P-1$  vehículos programados en el día  $D-1$  y el primer vehículo programado en el día de producción  $D$ . Debe recordarse que los vehículos del día de producción  $D-1$  ya están programados, por lo cual su orden en la secuencia no puede modificarse.

Los problemas presentados y su grado de dificultad queda expresado en la TABLA 1a, b y c. Se corresponde con A, a los problemas con baja dificultad, B, a los problemas con media dificultad y X, a los problemas con alta dificultad. Además, se especifica el escenario propuesto, indicando el orden en que se encuentran los objetivos mencionados, el número de restricciones de alta prioridad (HPRC), el número de restricciones de baja prioridad (LPRC), el límite máximo en la cantidad del lote de vehículos de un mismo color y el número de vehículos a secuenciar.

TABLA 1a  
RESUMEN DE ESPECIFICACIONES

Grado de dificultad: A					
Escenario	Multiobjetivo	HPRC	LPRC	Máx	Nº de V.
022 3 4 EP RAF ENP	2, 1, 3	3	6	450	499
024 38 3 EP RAF ENP	2, 1, 3	5	8	10	1274
025 38 1 EP ENP RAF	2, 3, 1	4	18	10	1232
025 38 1 EP RAF ENP	2, 1, 3	4	18	10	1232
039 38 4 EP RAF ch1	2, 1	5	-	20	981
039 38 4 RAF EP ch1	1, 2	5	-	15	981
048 39 1 EP ENP RAF	2, 3, 1	5	12	10	618
048 39 1 EP RAF ENP	2, 1, 3	5	12	10	618
064 38 2 EP RAF ENP ch1	2, 1, 3	7	2	15	904
064 38 2 RAF EP ENP ch1	1, 2, 3	7	2	15	904

TABLA 1b  
RESUMEN DE ESPECIFICACIONES

Grado de dificultad: B					
Escenario	Multiobjetivo	HPRC	LPRC	Máx	Nº de V.
022 EP ENP RAF S22 J1	2, 3, 1	2	7	500	540
022 EP RAF ENP S22 J1	2, 1, 3	2	7	500	540
023 RAF EP ENP S23 J3	1, 2, 3	9	8	25	1130
024 V2 EP ENP RAF S22 J1	2, 3, 1	6	7	10	1319
024 V2 EP RAF ENP S22 J1	2, 1, 3	6	7	10	1319
024 V2 RAF EP ENP S22 J1	1, 2, 3	6	7	10	1319
029 EP ENP RAF S21 J6	2, 3, 1	4	3	15	773
029 EP RAF ENP S21 J6	2, 1, 3	4	3	15	773
029 RAF EP ENP S21 J6	1, 2, 3	4	3	15	773
048 ch1 EP ENP RAF S22 J3	2, 3, 1	6	19	10	902
048 ch1 EP RAF ENP S22 J3	2, 1, 3	6	19	10	902
048 ch1 RAF EP ENP S22 J3	1, 2, 3	6	19	10	902
064 ch1 EP ENP RAF S22 J3	2, 3, 1	11	3	15	854
064 ch1 EP RAF ENP S22 J3	2, 1, 3	11	3	15	854
064 ch1 RAF EP ENP S22 J3	1, 2, 3	11	3	15	854

TABLA 1c  
RESUMEN DE ESPECIFICACIONES

Grado de dificultad: X					
Escenario	Multiobjetivo	HPRC	LPRC	Máx	Nº de V.
022 RAF EP ENP S49 J2	1, 2, 3	3	9	200	718
023 EP RAF ENP S49 J2	2, 1, 3	5	7	40	1279
024 EP RAF ENP S49 J2	2, 1, 3	7	11	10	1338
025 EP ENP RAF S49 J1	2, 3, 1	6	14	60	1071
029 EP RAF ENP S49 J5	2, 1, 3	4	3	60	822
035 CH2 RAF EP S50 J4	1, 2	2	-	1000	377
039 CH1 EP RAF ENP S49 J1	2, 1, 3	1	11	20	1543
039 CH3 EP RAF ENP S49 J1	2, 1, 3	2	10	20	1283
048 CH2 EP RAF ENP S49 J5	2, 1, 3	8	12	12	508
655 CH2 EP RAF ENP S52 J1 J2 S01 J1	2, 1	4	-	10	234

En este trabajo el análisis se centró en el problema correspondiente a la fase de determinación de la secuencia diaria de producción.

### 3. ALGORITMO ADOPTADO PARA LA RESOLUCIÓN

Dada la complejidad propia del problema a resolver, se decidió abordar al mismo con un algoritmo genético. Esta técnica resulta natural por las características propias de la solución buscada.

Dado que la secuencia en gran escala debe cumplir con múltiples objetivos, una representación genotípica binaria del individuo no era adecuada. En este caso particular, se trabajó con un individuo cuya representación se constituye de acuerdo al orden en que fue recibido el pedido considerado en tiempo real. El fenotipo resultante para un individuo de la población es el ordenamiento en sí mismo.

La población inicial, correspondiente a las  $n$  secuencias distintas de vehículos, está constituida inicialmente por la secuencia contenida en la especificación propia del problema, la cual se debe optimizar en el desafío. Las  $(n-1)$  secuencias restantes se generan aleatoriamente.

Este desafío presenta múltiples objetivos los cuales como se indicó anteriormente se ponderan de acuerdo al tipo de problema a resolver. El fitness es una función que se calcula en base a estos objetivos teniendo en cuenta los valores de  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\delta$  entregados por la compañía RENAULT. Se debe tener en cuenta que cuanto mejor sea la secuencia obtenida menor es su fitness, de esta manera este valor debe tender a minimizarse de generación a generación para los individuos de la población.

```
alpha :- 1.000.000
beta  :- 1.000
delta :- 1
fitness :- alpha * Obj One + beta * Obj Two + delta * Obj Three
```

Teniendo en cuenta que existe una restricción fuerte obligada a cumplirse que se corresponde con la cantidad máxima de vehículos en un lote del mismo color, la estrategia utilizada es la de agregar un cuarto objetivo dentro del fitness que penaliza al individuo que no la cumpla. De esta manera, individuos que no cumplen la restricción son rápidamente descartados para la futura generación. El valor de  $\gamma$  fue establecido en base a la experimentación efectuada.

```
alpha :- 1.000.000
beta  :- 1.000
delta :- 1
gamma :- 1.000.000
fitnessMod :- alpha * Obj One + beta * Obj Two + delta * Obj Three + gamma * Obj Four
```

Para la elección de los individuos de la población  $P$  que constituyen los padres de la población  $(P+1)$  se utilizó la selección por ranking según su valor de fitness. La selección es una función lineal dependiente de un parámetro  $R$  que constituye la presión selectiva del algoritmo genético, en nuestro caso el valor elegido es 0.6.

El operador de cruzamiento esta basado en crossover de un punto aleatorio dependiendo de la cantidad de vehículos a secuenciar del problema. El operador de mutación para cada vehículo en el individuo genera un valor que indica si el mismo debe o no cambiar de posición en la secuencia. Si se determina que debe cambiarse el vehículo de lugar, este lo hace con el otro vehículo elegido en forma aleatoria.

Según las pruebas realizadas, se determinó que una población entre 90 y 100 individuos constituye un caso de estudio interesante que ajusta a los valores esperados comparables a los dados por el ranking expuesto en el desafío. La probabilidad de mutación es lo suficientemente alta como para introducir individuos que generen secuencias viables y que tiendan a disminuir el valor del fitness. El caso de estudio presentado por RENAULT cuenta con un parámetro de cómputo adicional, constituido por el tiempo máximo de corrida para todos los problemas expuestos, dicho valor es de 600 segundos. El número de generaciones es entonces una función dependiente del tiempo de cómputo y la cantidad de vehículos dentro de la secuencia.

```

Time_Limit :- 600 sec.
Time :- Now
Number_of_Individual
Population(0) :- Generate_Initial_Population
For 1 to Number_of_Individual
    Population(0).Number_of_Individual.Fitness()
End For
While Time < Time_Limit
    Fathers :- Population.Select_Fathers()
    Children :- Crossover(Fathers)
    MutationChildrens :- Mutation(Children)
    For 1 to Number_of_Child
        MutationChildrens(Number_of_Child).Fitness()
    End For
    Population(j) :- NewPopulation(MutationChildrens,Population(j-1))
End While

```

El pseudo-código anterior muestra las características generales del algoritmo genético implementado.

#### 4. EXPERIMENTOS Y RESULTADOS

Se realizó una experimentación sobre los diferentes escenarios establecidos a fin de verificar el análisis del algoritmo estudiado. Esta experimentación se desarrollo en un equipo PC Pentium 2.4 GHZ y 512 MB de RAM. En las TABLAS 2a, b, c, se reflejan los resultados obtenidos por los autores mediante esta técnica. Se indica el escenario, el número de violaciones de restricciones de montaje con alto nivel de prioridad (NVHPRC), el número de violaciones de restricciones de montaje con bajo nivel de prioridad (NVLPRC), el número de cambios de color (NPCC) y el valor objetivo.

TABLA 2a  
RESULTADOS OBTENIDOS

Grado de dificultad: A (Tiempo de Ejecución 600 seg.)				
Escenario	NVHPRC	NVLPRC	NPCC	Valor Objetivo
022 3 4 EP RAF ENP	0	2	71	71003
024 38 3 EP RAF ENP	32	183	423	32183423
025 38 1 EP ENP RAF	0	570	53	570053
025 38 1 EP RAF ENP	0	1262	420	421262
039 38 4 EP RAF ch1	35	0	217	35217000
039 38 4 RAF EP ch1	272	0	68	68272000
048 39 1 EP ENP RAF	19	98	425	19980425
048 39 1 EP RAF ENP	18	759	205	18205759
064 38 2 EP RAF ENP ch1	0	782	252	252782
064 38 2 RAF EP ENP ch1	430	794	67	67430794

TABLA 2b  
RESULTADOS OBTENIDOS

Grado de dificultad: B (Tiempo de Ejecución 600 seg.)				
Escenario	NVHPRC	NVLPRC	NPCC	Valor Objetivo
022 EP ENP RAF S22 J1	0	9	134	9134
022 EP RAF ENP S22 J1	0	138	56	56138
023 RAF EP ENP S23 J3	1450	182	50	51450182
024 V2 EP ENP RAF S22 J1	1320	1022	612	1321022612
024 V2 EP RAF ENP S22 J1	1146	2968	1012	1148969012
024 V2 RAF EP ENP S22 J1	2233	2228	132	134235228
029 EP ENP RAF S21 J6	35	2150	512	37150512
029 EP RAF ENP S21 J6	35	2150	182	35184150
029 RAF EP ENP S21 J6	825	2186	52	52827186
048 ch1 EP ENP RAF S22 J3	0	0	560	560
048 ch1 EP RAF ENP S22 J3	0	522	215	215522
048 ch1 RAF EP ENP S22 J3	150	702	64	64150702
064 ch1 EP ENP RAF S22 J3	0	20	312	20312
064 ch1 EP RAF ENP S22 J3	0	162	134	134162
064 ch1 RAF EP ENP S22 J3	132	602	62	62132602

TABLA 2c  
RESULTADOS OBTENIDOS

Grado de dificultad: X (Tiempo de Ejecución 600 seg.)				
Escenario	NVHPRC	NVLPRC	NPCC	Valor Objetivo
022 RAF EP ENP S49 J2	2	3	12	12002003
023 EP RAF ENP S49 J2	0	115	322	322115
024 EP RAF ENP S49 J2	0	330	948	948330
025 EP ENP RAF S49 J1	0	232	634	232634
029 EP RAF ENP S49 J5	0	228	170	170228
035 CH2 RAF EP S50 J4	94	0	8	8940000
039 CH1 EP RAF ENP S49 J1	no solution file generated			
039 CH3 EP RAF ENP S49 J1	no solution file generated			
048 CH2 EP RAF ENP S49 J5	31	1128	134	31135128
655 CH2 EP RAF ENP S52 J1 J2 S01 J1	340	0	36	340036000

A partir de los resultados anteriores se puede deducir la buena performance del método de resolución adoptado. Teniendo en cuenta el ranking generado en el desafío [7], las soluciones alcanzadas por los investigadores son comparables con las obtenidas por los autores en el presente trabajo. Más aún, el costo de desarrollo del método es inferior en comparación al invertido por los participantes que alcanzaron un lugar en el ranking.

## 5. CONCLUSIÓN

Este trabajo propone un algoritmo genético para resolver el problema de secuenciamiento u ordenamiento en gran escala planteado en el desafío. La investigación y los resultados obtenidos confirman que estos algoritmos son una poderosa herramienta para la resolución de problemas en los cuales el espacio de soluciones es amplio y la función de optimización es compleja. Según afirman algunos autores, los algoritmos genéticos no son un método de solución universal de problemas, sino un paradigma que debe adaptarse correctamente al problema a resolver. El algoritmo propuesto logró resultados efectivos, teniendo en cuenta el tiempo y costo de su desarrollo en contraposición con los invertidos por los investigadores ranqueados en el desafío en cuestión. Aunque los algoritmos genéticos poseen una complejidad importante otras técnicas utilizadas tienden a ser poco naturales para su programación y pueden limitar la búsqueda de soluciones a sub-óptimos globales. Por estos motivos, el trabajo futuro se concentrará principalmente en la mejora de los operadores de crossover y mutación. Siendo importante además, para obtener la población inicial incorporar una herramienta meta-heurística de tipo constructiva.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Holland J. H. "Adaptation in Natural and Artificial Systems". The University of Michigan Press, 1975.
- [2] Moscazo P. and Tinetti F. "Blending Heuristics with a Population-Based Approach: A 'Memetic' Algorithm for the Traveling Salesman Problem". Caltech Concurrent Computation Program, C3P Report 826. Julio de 1994.
- [3] Esquivel S. and Gallard R. H. "Computación Evolutiva: Conceptos y Aplicaciones". M. Sc. R. Gallard, III Congreso Argentino de Ciencias de la Computación, CACIC, Universidad Nacional de la Plata, Octubre de 1997.
- [4] Cervantes M. M., Martínez L. M. and Villamizar J. C. "Asignación de recursos humanos mediante el uso de algoritmos genéticos". Publicado en anales (CD-ROM) Congreso Latino Americano de Investigación Operativa, CLAIO. Realizado del 4 al 8 Octubre en La Habana, Cuba. 2004.
- [5] De Ryan S. R., Trento J., Martínez C., Morales D. and Castellini M. A. "Algoritmo genético en un problema de asignación de aulas". Publicado en anales (CD-ROM) Congreso Latino Americano de Investigación Operativa, CLAIO. Realizado del 4 al 8 Octubre en La Habana, Cuba. 2004.
- [6] Pereira Rodrigues M. L. and Martins Ferreira Filho V. J. "Codificação sucessora em algoritmos genéticos para otimização da coleta de gás natural em malha de gasodutos offshore". Publicado



en anales (CD-ROM) Congreso Latino Americano de Investigación Operativa, CLAIO. Realizado del 4 al 8 Octubre en La Habana, Cuba. 2004.

- [7] Pág. Web: [www.prism.uvsq.fr/~vdc/ROADEF/CHALLENGES/2005/challenge2005.html](http://www.prism.uvsq.fr/~vdc/ROADEF/CHALLENGES/2005/challenge2005.html).
- [8] Casal R., Toncovich A., López N. y Corral R. “Una heurística multiobjetivo basada en búsqueda local para resolver un problema de determinación de secuencias de producción”. Publicado en anales (CD-ROM) XVII Encuentro Nacional de Docentes en Investigación Operativa, ENDIO, y XV Escuela de Perfeccionamiento en Investigación Operativa, EPIO. Realizado del 26 al 29 de mayo en Tandil, Buenos Aires. 2004.