

## Estimación del Frente de Pareto en un Caso Real de Planeación de Producción Discreta: Fase II

Sergio Manuel Ramírez Campos  
[sramirez@its.mx](mailto:sramirez@its.mx)

Juan V. de Dios Córdoba García  
[jcordova@its.mx](mailto:jcordova@its.mx)

Eugenia Rodríguez Contreras  
[erc7304@yahoo.com.mx](mailto:erc7304@yahoo.com.mx)

Instituto Tecnológico de Saltillo  
Blvd. Venustiano Carranza 2400  
Departamento de Ingeniería Industrial  
Saltillo Coahuila, México

### Resumen

En un artículo anterior Ramírez et al.<sup>1</sup> ilustraron un algoritmo genético con reparación para resolver un problema combinatorio NP-complejo basado en un caso real de producción de guantes de látex considerando un solo objetivo: minimizar el número de ciclos. En este artículo se presenta el método modificado basado en el mismo caso real para considerar otro objetivo más en conflicto como lo es el cumplimiento de las fechas de entrega de cada demanda, lo cual implica que un objetivo solo se puede mejorar a costa de empeorar al otro. El caso corresponde a un problema multi-objetivo (multi-objective problem o MOP) para el que se utilizó un método de ponderación basado en el enfoque de agregación convencional (cuyos valores cambian de manera gradual y periódica) para calcular la aptitud global. Los resultados muestran que el modelo genético desarrollado logra aproximarse al frente de Pareto permitiendo así, identificar soluciones factibles cercanas al óptimo.

**Palabras clave:** Frente de Pareto, problema combinatorio, algoritmo genético.

### Introducción

Los problemas de optimización del mundo real frecuentemente incluyen objetivos múltiples en conflicto. Una solución a tal problema generalmente es un arreglo que comprende los diferentes objetivos, dado que no es posible encontrar una solución ideal para todos los objetivos en forma simultánea. Por ejemplo, una firma de diseño de productos puede desear maximizar el rendimiento de un dispositivo mientras que también intenta minimizar el costo de producción. Típicamente, estos dos objetivos no se pueden alcanzar con una sola solución, por lo que, ajustando diversos parámetros de diseño, la compañía puede buscar qué combinaciones de esos dos objetivos son posibles, dado un conjunto de restricciones (por ejemplo, requerimientos legales y tamaño límite del producto).

En las últimas dos décadas ha ido aumentando significativamente el interés en los problemas multi-objetivos en la literatura. Por citar algunos desarrollos, Zhou et al.<sup>2</sup> exploran la regularidad que presentan las distribuciones de las soluciones óptimas de Pareto considerando solo dos objetivos basándose en el análisis de componentes principales y el ajuste por mínimos cuadrados para construir el modelo. Laumanns et al.<sup>3</sup> proponen algunas estrategias que ayudan a construir MOEAs que muestren propiedades deseables de convergencia y diversidad en una sola corrida. Relacionado con esto último, Deb y Jain<sup>4</sup> aportan dos métricas normalizadas para medir ambas propiedades (convergencia y

diversidad) facilitando una mayor visión de los MOEAs y una comparación entre sí. Fieldsend et al.<sup>5</sup> demuestran el impacto indeseable de restringir el número de soluciones en el archivo de Pareto y proponen nuevas estructuras de datos (dominated and non-dominated trees).

Por otro lado, Farina<sup>6</sup> propone una estrategia para aproximar el Frente Óptimo de Pareto para problemas de optimización de diseño industrial en el que se desean pocas soluciones equi-espaciadas ("de grano grueso") y en donde los MOEAs clásicos no son convenientes. Eiben et al.<sup>7</sup> aclaran y clasifican los conceptos relacionados con los parámetros de las estrategias evolutivas además de seleccionar y presentar varias formas de control de parámetros estudiados por la comunidad de la computación evolutiva en años recientes. Jin et al.<sup>8</sup> presentan un control de la evolución generacional para asegurar una convergencia correcta del algoritmo evolutivo usando una función de aptitud aproximada a la vez que se reduce el costo computacional inherente. Beilstein et al.<sup>9</sup> desarrollan una estrategia evolutiva capaz de optimizar un neuro-controlador de un sistema de control supervisor de un grupo de elevadores. Por último, Mezura y Coello<sup>10</sup> detallan una estrategia evolutiva basada en un mecanismo simple de diversidad que permite que soluciones infactibles permanezcan en la población logrando una reducción en el costo computacional menor a otras técnicas representativas del estado del arte en el campo de la optimización evolutiva.

### Optimización multi-objetivo

Un problema de optimización multi-objetivo puede ser formulado mediante un vector objetivo  $\mathbf{f}$  y un conjunto correspondiente de variables de decisión  $\mathbf{x}$ . Sin pérdida de generalidad se puede considerar la minimización de todos los objetivos considerados:

$$\begin{aligned} \min \mathbf{f}(\mathbf{x}) &= (f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), \dots, f_m(\mathbf{x})) \in \mathbf{F} \\ \text{donde } \mathbf{x} &= (x_1, x_2, \dots, x_n) \in \mathbf{X}, \end{aligned} \quad (1)$$

además  $\mathbf{X} \in \mathfrak{R}^n$  es el espacio de interés  $n$ -dimensional y  $\mathbf{F} \in \mathfrak{R}^m$  es el espacio objetivo  $m$ -dimensional. En el caso (que es el más común) que no exista un solo punto común  $\mathbf{x}$  en el que  $\mathbf{f}(\mathbf{x})$  alcance su óptimo, se utiliza como concepto de optimalidad el óptimo de Pareto basado en la relación de dominancia. Una solución  $\mathbf{x}_1$  domina a una solución  $\mathbf{x}_2$  en  $\mathbf{X}$  ( $\mathbf{x}_1 \succ \mathbf{x}_2$ ) si se satisfacen las dos condiciones siguientes:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_1 \succ \mathbf{x}_2 \text{ si } \forall i \in \{1, 2, \dots, m\}: f_i(\mathbf{x}_1) \leq f_i(\mathbf{x}_2) \wedge \\ \exists j \in \{1, 2, \dots, m\}: f_j(\mathbf{x}_1) < f_j(\mathbf{x}_2) \end{aligned} \quad (2)$$

La solución  $\mathbf{x}_1$  se dice que es indiferente a una solución  $\mathbf{x}_2$ , si ninguna de ellas domina a la otra. Cuando no hay una preferencia definida a priori entre los objetivos, la dominancia es el único camino para determinar si una solución se desempeña mejor que otra. Las mejores soluciones en un problema multi-objetivo están dadas por el óptimo global de Pareto lo cual representa el subconjunto no dominado de todas las soluciones factibles. La imagen de este subconjunto se conoce como el Frente de Pareto.

### Método de agregación convencional

En la explicación que sigue se consideran dos objetivos, aunque los problemas con más de dos objetivos son sencillos de abordar. En el método de agregación convencional, la función de aptitud es la suma ponderada de dos objetivos diferentes  $f_1$  y  $f_2$ :

$$\text{Aptitud} = w_1 f_1 + w_2 f_2 \quad (3)$$

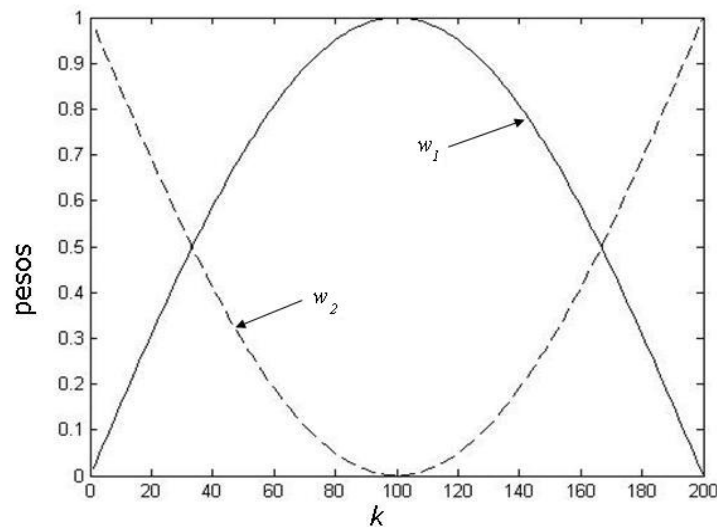
donde  $w_1$  y  $w_2$  son dos constantes determinadas usando un conocimiento a priori acerca del problema. Es claro que si se usa un par de pesos fijos, solo una solución óptima de Pareto puede ser obtenida. Por ello, es deseable correr el algoritmo tantas veces como sea necesario usando el mayor número de combinaciones de pesos para así obtener la mayor cantidad de soluciones de Pareto correspondientes al Frente de Pareto.

Para efectos de aplicar diferentes ponderaciones se ha utilizado el procedimiento propuesto por Jin et al.<sup>11</sup> (adaptado al algoritmo genético) el cual permite cambiar de manera gradual y periódica los pesos de la siguiente manera:

$$w_1(k) = |\text{sen}(2\pi k / F)| \quad (4)$$

$$w_2(k) = 1.0 - w_1(k) \quad (5)$$

donde  $k$  es la  $k$ -ésima ponderación distinta a considerar y  $|\cdot|$  es el valor absoluto. En la ecuación 4 se puede observar que  $w_1(k)$  cambia de 0 a 1 periódicamente. La frecuencia del cambio puede ser ajustada por medio de  $F$ .  $F = 400$  significa que  $w_1$  cambiará de 0 a 1 y de 1 a 0 una vez en el intervalo de  $1 \leq k \leq 200$ . En la figura 1 se muestra lo anterior haciendo notar que, a lo largo de este rango de  $k$ , ambos objetivos ( $f_1$  y  $f_2$ ) llegan a utilizar los mismos pesos.



**Figura 1. Determinación de pesos**

Dado que  $f_1$  está relacionado con el número de ciclos (lo cual se desea minimizar) y  $f_2$  con el cumplimiento de las fechas de entrega (lo cual se desea maximizar), se llevó a cabo una normalización para que la función de aptitud pueda ser calculada con valores adimensionales. En ambos casos, se estimó la media y la desviación estándar (con algunas corridas previas) con lo cual se hizo la siguiente transformación:

$$\min f_1 = \frac{\bar{x}_1 - x_1}{s_1} \quad (6)$$

$$\max f_2 = \frac{x_2 - \bar{x}_2}{s_2} \quad (7)$$

donde  $\bar{x}_1$  = media del número de ciclos

$x_1$  = número de ciclos de una corrida  $i$

$\bar{x}_2$  = media del índice de cumplimiento  
 $x_2$  = índice de cumplimiento de una corrida  $i$

El índice de cumplimiento se calcula a partir de las fechas de entrega de cada demanda  $i$  y de la prioridad individual (o la importancia) que la compañía asigne a la misma. Para ello, se determina la prioridad de entrega ( $pe_i$ ) ordenando la demanda primero de mayor a menor prioridad individual y luego de la fecha más próxima a la más lejana de vencimiento obteniendo el ordenamiento deseable ( $o_d$ ). Debe hacerse notar que puede haber demandas con igual prioridad de entrega. Una vez que se obtiene una solución dada, se genera un ordenamiento ( $o_x$ ) y se comparan ambos.

Un ejemplo del ordenamiento deseable ( $o_d$ ) de 13 demandas sería el siguiente: 1112234455678 y un ordenamiento derivado de una solución ( $o_x$ ) pudiera ser 4111543522867. Ésta última serie implica que la primer demanda que se va a atender tiene una prioridad de entrega de 4.

Al comparar ambas series se observa que solo dos posiciones concuerdan: la segunda y la tercera. Entonces, el índice de cumplimiento sería 2/13. Así,

$$x_2 = \frac{n_c}{n_d} \quad (8)$$

donde  $n_d$  = número de demandas consideradas y  
 $n_c$  = número de posiciones correctas

### El archivo de soluciones de Pareto

El algoritmo considerado para formar el archivo de soluciones de Pareto también es el propuesto por Jin et al.<sup>11</sup> con la modificación de que el tamaño del archivo no está limitado. El pseudo-código se muestra en el algoritmo 1.

---

```

for cada individuo  $o$  en la población de hijos do
  if ( $o$  domina a un individuo en la población de padres  $p$ ) and ( $o$  no está dominado por ninguna solución del archivo) and ( $o$  no es similar a ninguna solución del archivo)
    agregue  $o$  al archivo
  else
    descarte  $o$ 
  end if
end for
for cada solución en el archivo do
  if la solución  $a_1$  domina a  $a_2$  then
    remueva  $a_2$ 
  end if
end for

```

---

Algoritmo 1. Pseudo-código para mantener un archivo de soluciones de Pareto.

La similitud está dada por la distancia Euclidiana de las funciones de aptitud.

### Experimentación y resultados

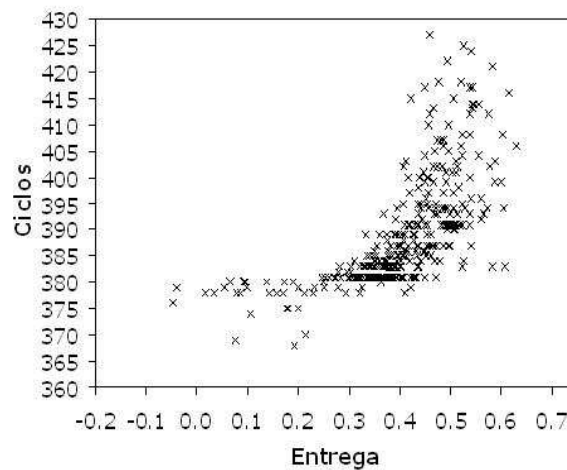
Se formaron 85 grupos de corridas, cada grupo de 100 corridas individuales (8500 corridas). Los parámetros considerados se muestran en el cuadro 1. Las corridas por lote se refiere a que los pesos  $w_1$  y  $w_2$  se mantuvieron constantes durante el número de corridas indicado, es

decir, para las corridas 1 a la 5 los pesos fueron los mismos ( $k=1$ ), de las corridas 6 a la 10, cambiaron de acuerdo a las ecuaciones 4 y 5 ( $k=2$ ) y así sucesivamente.

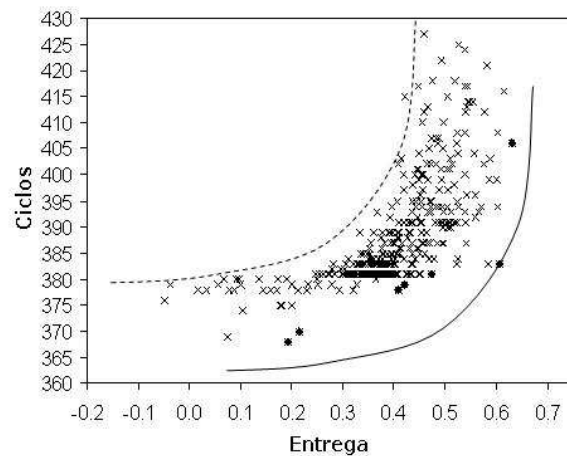
Población	Tasas			similitud	F	Corridas por lote
	reproducción	mutación	reemplazo			
80	40	40	50	0.0001	100	5

**Cuadro 1. Parámetros del algoritmo genético.**

Cada grupo de corridas generó un archivo con cierto número de soluciones aparentes de Pareto. En la figura 2 se muestran todas las soluciones aparentes de Pareto que se generaron en los 85 grupos independientes de corridas (428 soluciones).



**Figura 2. Soluciones aparentes de Pareto de los 85 grupos independientes de corridas.**



**Figura 3. Estimación del Frente de Pareto.**

Estas soluciones se hicieron competir entre sí para obtener el archivo final de Pareto. En la figura 3 se muestran las soluciones finales de Pareto (junto con las demás soluciones) las

cuales se resaltan por un símbolo relleno. La línea discontinua se forma a partir de la peor estimación del Frente de Pareto. Dicha línea, sin modificar su forma, se traslada hacia la esquina inferior derecha hasta tocar la última solución de Pareto. Esta línea continua es la mejor estimación del Frente de Pareto.

En el cuadro 2 se muestran los valores de las soluciones finales de Pareto. En este cuadro puede verificarse que las siete soluciones no están dominadas entre sí. A partir de la estimación del Frente de Pareto se pueden seleccionar tres resultados de interés: la solución con el menor número de ciclos (columna 1 del cuadro 2), la solución con la mayor entrega (columna 7 del cuadro 2) y la solución con el menor número de ciclos y con la mayor entrega (columna 6 del cuadro 2). En los cuadros 3, 4 y 5 se muestran dichas soluciones, haciendo hincapié en que éstas se aproximan al Frente de Pareto estimado dado que son soluciones no dominadas.

	1	2	3	4	5	6	7
<i>f1</i>	<b>368</b>	370	378	379	381	<b>383</b>	<b>406</b>
<i>f2</i>	<b>0.1920</b>	0.2153	0.4096	0.4221	0.4715	<b>0.6063</b>	<b>0.6297</b>

**Cuadro 2. Soluciones del Frente de Pareto.**

1	2	3	4	5	Programación										Variación		17	18	
					Ciclos					Platos		*	#	pares	%	Moldes por barra			Platos en inventario
					Pares	Platos	de	a	Total	de	a								
No.	Tipo	Talla	Pares	Platos	Pares	Platos	de	a	Total	de	a	*	#	pares	%	barra	tario		
1	485	7	4536	67	5040	18	1	4	4	1	18	0	17	504	0.1	14	18		
2	485	11	15768	361	16065	7	1	51	51	19	25	0	19	297	0	9	7		
3	490	10	2160	38	2400	6	1	2	2	26	31	0	11	240	0.1	12	20		
						6	3	4	2	26	31	0	11	240	0.1	12	20		
						8	5	6	2	1	8	0	11	240	0.1	12	20		
4	485	6	6696	99	6930	9	5	15	11	9	17	0	6	234	0	14	9		
5	485	9	114696	1818	116870	1	5	62	58	18	18	0	7	2174	0	13	34		
						6	5	62	58	26	31	0	7	2174	0	13	34		
						8	7	64	58	1	8	0	7	2174	0	13	34		
						9	16	73	58	9	17	0	7	2174	0	13	34		
						7	52	109	58	19	25	0	7	2174	0	13	34		
6	485	10	48960	841	50400	1	63	104	42	18	18	0	8	1440	0	12	20		
						6	63	104	42	26	31	0	8	1440	0	12	20		
						8	65	106	42	1	8	0	8	1440	0	12	20		
						5	74	115	42	9	13	0	8	1440	0	12	20		
7	490	11	5328	122	5355	4	74	90	17	14	17	0	19	27	0	9	7		
						3	91	107	17	14	16	0	19	27	0	9	7		
8	485	8	5760	85	5600	1	91	94	4	17	17	0	13	-160	0	14	20		
						1	95	98	4	17	17	0	13	-160	0	14	20		
						1	99	102	4	17	17	0	13	-160	0	14	20		
						1	103	106	4	17	17	0	13	-160	0	14	20		
						1	105	108	4	18	18	0	13	-160	0	14	20		
						6	105	108	4	26	31	0	13	-160	0	14	20		
						8	107	110	4	1	8	0	13	-160	0	14	20		
						1	107	110	4	17	17	0	13	-160	0	14	20		
9	490	9	4248	68	4030	3	108	109	2	14	16	0	12	-218	-0.1	13	34		
						1	109	110	2	18	18	0	12	-218	-0.1	13	34		
						6	109	110	2	26	31	0	12	-218	-0.1	13	34		
						7	110	111	2	19	25	0	12	-218	-0.1	13	34		
						3	110	111	2	14	16	0	12	-218	-0.1	13	34		
						8	111	112	2	1	8	0	12	-218	-0.1	13	34		
						1	111	112	2	17	17	0	12	-218	-0.1	13	34		
						1	111	112	2	18	18	0	12	-218	-0.1	13	34		
						1	111	112	2	26	26	0	12	-218	-0.1	13	34		
10	497	7	1000	15	1050	15	116	116	1	1	15	1	14	50	0.1	14	18		
11	495	6	12300	181	12600	9	116	135	20	16	24	1	12	300	0	14	9		
12	487	11	3744	86	3780	7	116	127	12	25	31	1	16	36	0	9	7		
13	491	6	1350	20	1260	9	117	118	2	1	9	1	18	-90	-0.1	14	9		

\* Configuración de tanques # Prioridad

**Cuadro 3. Solución con el menor número de ciclos** (continúa en la siguiente página)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Demanda					Programación									Variación		Moldes	Platos
No.	Tipo	Talla	Pares	Platos	Pares	Ciclos				Platos		*	#	pares	%	por	en
						Platos	de	a	Total	de	a					barra	inven-
																tario	
14	492	7	55092	811	56700	5	117	278	162	10	14	1	20	1608	0	14	5
15	491	7	650	10	700	1	117	117	1	15	15	1	5	50	0.1	14	18
						1	118	118	1	15	15	1	5	50	0.1	14	18
						8	119	119	1	1	8	1	5	50	0.1	14	18
16	495	10	1100	19	1140	1	119	119	1	9	9	1	13	40	0	12	20
						1	119	119	1	15	15	1	13	40	0	12	20
						8	120	120	1	1	8	1	13	40	0	12	20
						1	120	120	1	9	9	1	13	40	0	12	20
						1	120	120	1	15	15	1	13	40	0	12	20
						7	121	121	1	1	7	1	13	40	0	12	20
17	492	11	4704	108	4500	1	121	130	10	8	8	1	10	-204	0	9	10
						1	121	130	10	9	9	1	10	-204	0	9	10
						1	121	130	10	15	15	1	10	-204	0	9	10
						7	122	131	10	1	7	1	10	-204	0	9	10
18	491	8	7450	110	7000	7	128	132	5	25	31	1	2	-450	-0.1	14	20
						1	131	135	5	8	8	1	2	-450	-0.1	14	20
						1	131	135	5	9	9	1	2	-450	-0.1	14	20
						1	131	135	5	15	15	1	2	-450	-0.1	14	20
						7	132	136	5	1	7	1	2	-450	-0.1	14	20
						3	133	137	5	25	27	1	2	-450	-0.1	14	20
19	487	6	5900	87	5670	4	133	141	9	28	31	1	3	-230	0	14	9
						5	136	144	9	16	20	1	3	-230	0	14	9
20	491	9	20150	320	20150	4	136	145	10	21	24	1	18	0	0	13	34
						1	136	145	10	8	8	1	18	0	0	13	34
						1	136	145	10	9	9	1	18	0	0	13	34
						1	136	145	10	15	15	1	18	0	0	13	34
						7	137	146	10	1	7	1	18	0	0	13	34
						3	138	147	10	25	27	1	18	0	0	13	34
						4	142	151	10	28	31	1	18	0	0	13	34
						5	145	154	10	16	20	1	18	0	0	13	34
						4	146	155	10	21	24	1	18	0	0	13	34
						1	146	155	10	8	8	1	18	0	0	13	34
21	495	8	4900	73	4200	1	146	148	3	9	9	1	15	-700	-0.1	14	20
						1	146	148	3	15	15	1	15	-700	-0.1	14	20
						7	147	149	3	1	7	1	15	-700	-0.1	14	20
						3	148	150	3	25	27	1	15	-700	-0.1	14	20
						1	149	151	3	9	9	1	15	-700	-0.1	14	20
						1	149	151	3	15	15	1	15	-700	-0.1	14	20
22	497	10	3900	67	3600	6	150	152	3	1	6	1	15	-700	-0.1	14	20
						1	150	152	3	7	7	1	22	-300	-0.1	12	20
						3	151	153	3	25	27	1	22	-300	-0.1	12	20
						4	152	154	3	28	31	1	22	-300	-0.1	12	20
						1	152	154	3	9	9	1	22	-300	-0.1	12	20
						1	152	154	3	15	15	1	22	-300	-0.1	12	20
						6	153	155	3	1	6	1	22	-300	-0.1	12	20
						1	153	155	3	7	7	1	22	-300	-0.1	12	20
						3	154	156	3	25	27	1	22	-300	-0.1	12	20
23	492	9	135884	2154	139100	5	155	261	107	16	20	1	9	3216	0	13	20
						4	155	261	107	28	31	1	9	3216	0	13	20
						1	155	261	107	9	9	1	9	3216	0	13	20
						1	155	261	107	15	15	1	9	3216	0	13	20
						4	156	262	107	21	24	1	9	3216	0	13	20
						1	156	262	107	8	8	1	9	3216	0	13	20
						4	156	262	107	1	4	1	9	3216	0	13	20
24	497	8	4900	73	4200	2	156	158	3	5	6	1	4	-700	-0.1	14	20
						1	156	158	3	7	7	1	4	-700	-0.1	14	20
						3	157	159	3	25	27	1	4	-700	-0.1	14	20
						2	159	161	3	5	6	1	4	-700	-0.1	14	20
						1	159	161	3	7	7	1	4	-700	-0.1	14	20
						3	160	162	3	25	27	1	4	-700	-0.1	14	20
						2	162	164	3	5	6	1	4	-700	-0.1	14	20
						1	162	164	3	7	7	1	4	-700	-0.1	14	20
						3	163	165	3	25	27	1	4	-700	-0.1	14	20
						2	165	167	3	5	6	1	4	-700	-0.1	14	20

\* Configuración de tanques # Prioridad

**Cuadro 3. Solución con el menor número de ciclos** (continúa en la siguiente página)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
Demanda					Programación										Variación		Moldes por barra	Platos en inventario
					Pares	Ciclos				Platos		*	#					
						No.	Tipo	Talla	Pares	Platos	Platos			de	a	Total	de	a
25	492	10	146360	2513	150000	1	165	264	100	7	7	1	17	3640	0	12	25	
						3	166	265	100	25	27	1	17	3640	0	12	25	
						2	168	267	100	5	6	1	17	3640	0	12	25	
						5	262	361	100	16	20	1	17	3640	0	12	25	
						4	262	361	100	28	31	1	17	3640	0	12	25	
						1	262	361	100	9	9	1	17	3640	0	12	25	
						1	262	361	100	15	15	1	17	3640	0	12	25	
						4	263	362	100	21	24	1	17	3640	0	12	25	
						1	263	362	100	8	8	1	17	3640	0	12	25	
						3	263	362	100	1	3	1	17	3640	0	12	25	
26	497	9	3700	59	4030	1	263	264	2	4	4	1	21	330	0.1	13	34	
						1	265	266	2	7	7	1	21	330	0.1	13	34	
						1	265	266	2	4	4	1	21	330	0.1	13	34	
						3	266	267	2	25	27	1	21	330	0.1	13	34	
						1	267	268	2	7	7	1	21	330	0.1	13	34	
						1	267	268	2	4	4	1	21	330	0.1	13	34	
						2	268	269	2	5	6	1	21	330	0.1	13	34	
						3	268	269	2	25	27	1	21	330	0.1	13	34	
						1	269	270	2	7	7	1	21	330	0.1	13	34	
						1	269	270	2	4	4	1	21	330	0.1	13	34	
						2	270	271	2	5	6	1	21	330	0.1	13	34	
						3	270	271	2	25	27	1	21	330	0.1	13	34	
						1	271	272	2	7	7	1	21	330	0.1	13	34	
						1	271	272	2	4	4	1	21	330	0.1	13	34	
						2	272	273	2	5	6	1	21	330	0.1	13	34	
						3	272	273	2	25	27	1	21	330	0.1	13	34	
						1	273	274	2	7	7	1	21	330	0.1	13	34	
						1	273	274	2	4	4	1	21	330	0.1	13	34	
						2	274	275	2	5	6	1	21	330	0.1	13	34	
27	492	8	73964	1089	75600	3	274	363	90	25	27	1	12	1636	0	14	12	
						1	275	364	90	7	7	1	12	1636	0	14	12	
						1	275	364	90	4	4	1	12	1636	0	14	12	
						2	276	365	90	5	6	1	12	1636	0	14	12	
						5	279	368	90	10	14	1	12	1636	0	14	12	
28	495	7	4600	68	5040	5	362	365	4	16	20	1	1	440	0.1	14	18	
						4	362	365	4	28	31	1	1	440	0.1	14	18	
						1	362	365	4	9	9	1	1	440	0.1	14	18	
						1	362	365	4	15	15	1	1	440	0.1	14	18	
						4	363	366	4	21	24	1	1	440	0.1	14	18	
						1	363	366	4	8	8	1	1	440	0.1	14	18	
						2	363	366	4	1	2	1	1	440	0.1	14	18	

\* Configuración de tanques # Prioridad

**Cuadro 3. Solución con el menor número de ciclos** (continúa de la página anterior)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
Demanda					Programación										Variación		Moldes por barra	Platos en inventario
					Pares	Ciclos				Platos		*	#					
						No.	Tipo	Talla	Pares	Platos	Platos			De	a	Total	de	a
1	485	9	114696	1818	116870	31	1	58	58	1	31	0	7	2174	0	13	34	
2	485	7	4536	67	5040	18	59	62	4	1	18	0	17	504	0.1	14	18	
3	485	11	15768	361	16065	7	59	109	51	19	25	0	19	297	0	9	7	
4	485	10	48960	841	50400	6	59	100	42	26	31	0	8	1440	0	12	20	
						14	63	104	42	1	14	0	8	1440	0	12	20	
5	485	6	6696	99	6930	4	63	73	11	15	18	0	6	234	0	14	9	
						4	74	84	11	15	18	0	6	234	0	14	9	
						1	85	95	11	15	15	0	6	234	0	14	9	
6	485	8	5760	85	5600	3	85	88	4	16	18	0	13	-160	0	14	20	
						3	89	92	4	16	18	0	13	-160	0	14	20	
						3	93	96	4	16	18	0	13	-160	0	14	20	
						1	96	99	4	15	15	0	13	-160	0	14	20	
						3	97	100	4	16	18	0	13	-160	0	14	20	
						1	100	103	4	15	15	0	13	-160	0	14	20	

\* Configuración de tanques # Prioridad

**Cuadro 4. Solución con la mayor entrega** (continúa en la siguiente página)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
Demanda					Programación										Variación		Moldes por barra	Platos en inventario
					Ciclos					Platos		*	#					
					No.	Tipo	Talla	Pares	Platos	Pares	Platos			De	A	Total	de	a
7	495	10	1100	19	1140	6	101	104	4	26	31	0	13	-160	0	14	20	
8	495	6	12300	181	12600	19	110	110	1	1	19	1	13	40	0	12	20	
9	495	7	4600	68	5040	3	110	113	4	29	31	1	1	440	0.1	14	18	
						15	111	114	4	1	15	1	1	440	0.1	14	18	
10	495	8	4900	73	4200	4	111	113	3	16	19	1	15	-700	-0.1	14	20	
						3	114	116	3	29	31	1	15	-700	-0.1	14	20	
						4	114	116	3	16	19	1	15	-700	-0.1	14	20	
						9	115	117	3	1	9	1	15	-700	-0.1	14	20	
11	491	6	1350	20	1260	9	130	131	2	1	9	2	18	-90	-0.1	14	9	
12	492	9	135884	2154	139100	20	130	236	107	10	29	2	9	3216	0	13	20	
13	487	6	5900	87	5670	2	130	138	9	30	31	2	3	-230	0	14	9	
						7	132	140	9	1	7	2	3	-230	0	14	9	
14	491	8	7450	110	7000	2	132	136	5	8	9	2	2	-450	-0.1	14	20	
						2	137	141	5	8	9	2	2	-450	-0.1	14	20	
						2	139	143	5	30	31	2	2	-450	-0.1	14	20	
						7	141	145	5	1	7	2	2	-450	-0.1	14	20	
						2	142	146	5	8	9	2	2	-450	-0.1	14	20	
						2	144	148	5	30	31	2	2	-450	-0.1	14	20	
						3	146	150	5	1	3	2	2	-450	-0.1	14	20	
15	497	8	4900	73	4200	4	146	148	3	4	7	2	4	-700	-0.1	14	20	
						2	147	149	3	8	9	2	4	-700	-0.1	14	20	
						2	149	151	3	30	31	2	4	-700	-0.1	14	20	
						4	149	151	3	4	7	2	4	-700	-0.1	14	20	
						2	150	152	3	8	9	2	4	-700	-0.1	14	20	
						3	151	153	3	1	3	2	4	-700	-0.1	14	20	
						2	152	154	3	30	31	2	4	-700	-0.1	14	20	
						1	152	154	3	4	4	2	4	-700	-0.1	14	20	
16	490	11	5328	122	5355	3	152	168	17	5	7	2	19	27	0	9	7	
						2	153	169	17	8	9	2	19	27	0	9	7	
						2	154	170	17	1	2	2	19	27	0	9	7	
17	492	8	73964	1089	75600	1	154	243	90	3	3	2	12	1636	0	14	12	
						2	155	244	90	30	31	2	12	1636	0	14	12	
						1	155	244	90	4	4	2	12	1636	0	14	12	
						3	169	258	90	5	7	2	12	1636	0	14	12	
						2	170	259	90	8	9	2	12	1636	0	14	12	
						2	171	260	90	1	2	2	12	1636	0	14	12	
18	487	11	3744	86	3780	7	237	248	12	11	17	2	16	36	0	9	7	
19	492	11	4704	108	4500	10	237	246	10	18	27	2	10	-204	0	9	10	
20	497	7	1000	15	1050	2	237	237	1	28	29	2	14	50	0.1	14	18	
						2	238	238	1	28	29	2	14	50	0.1	14	18	
						2	239	239	1	28	29	2	14	50	0.1	14	18	
						2	240	240	1	28	29	2	14	50	0.1	14	18	
						2	241	241	1	28	29	2	14	50	0.1	14	18	
						2	242	242	1	28	29	2	14	50	0.1	14	18	
						2	243	243	1	28	29	2	14	50	0.1	14	18	
						1	244	244	1	3	3	2	14	50	0.1	14	18	
21	492	7	55092	811	56700	2	244	405	162	28	29	2	20	1608	0	14	5	
						2	245	406	162	30	31	2	20	1608	0	14	5	
						1	245	406	162	4	4	2	20	1608	0	14	5	
22	491	7	650	10	700	1	245	245	1	3	3	2	5	50	0.1	14	18	
						1	246	246	1	3	3	2	5	50	0.1	14	18	
						8	247	247	1	18	25	2	5	50	0.1	14	18	
23	490	9	4248	68	4030	2	247	248	2	26	27	2	12	-218	-0.1	13	34	
						1	247	248	2	3	3	2	12	-218	-0.1	13	34	
						8	248	249	2	18	25	2	12	-218	-0.1	13	34	
						7	249	250	2	11	17	2	12	-218	-0.1	13	34	
						2	249	250	2	26	27	2	12	-218	-0.1	13	34	
						1	249	250	2	3	3	2	12	-218	-0.1	13	34	
						8	250	251	2	18	25	2	12	-218	-0.1	13	34	
						2	251	252	2	11	12	2	12	-218	-0.1	13	34	
24	491	9	20150	320	20150	5	251	260	10	13	17	2	18	0	0	13	34	
						2	251	260	10	26	27	2	18	0	0	13	34	
						1	251	260	10	3	3	2	18	0	0	13	34	
						8	252	261	10	18	25	2	18	0	0	13	34	
						2	253	262	10	11	12	2	18	0	0	13	34	
						3	259	268	10	5	7	2	18	0	0	13	34	
						2	260	269	10	8	9	2	18	0	0	13	34	
						2	261	270	10	1	2	2	18	0	0	13	34	
						5	261	270	10	13	17	2	18	0	0	13	34	
						1	261	270	10	26	26	2	18	0	0	13	34	

\* Configuración de tanques # Prioridad

### Cuadro 4. Solución con la mayor entrega (continúa en la siguiente página)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
Demanda					Programación										Variación		Moldes por barra	Platos en inventario
					Ciclos					Platos		*	#					
					No.	Tipo	Talla	Pares	Platos	Pares	Platos			de	a	Total	de	a
25	490	10	2160	38	2400	1	261	262	2	27	27	2	11	240	0.1	12	20	
						1	261	262	2	3	3	2	11	240	0.1	12	20	
						8	262	263	2	18	25	2	11	240	0.1	12	20	
						2	263	264	2	11	12	2	11	240	0.1	12	20	
						1	263	264	2	27	27	2	11	240	0.1	12	20	
						1	263	264	2	3	3	2	11	240	0.1	12	20	
						6	264	265	2	18	23	2	11	240	0.1	12	20	
26	492	10	146360	2513	150000	2	264	363	100	24	25	2	17	3640	0	12	25	
						2	265	364	100	11	12	2	17	3640	0	12	25	
						1	265	364	100	27	27	2	17	3640	0	12	25	
						1	265	364	100	3	3	2	17	3640	0	12	25	
						6	266	365	100	18	23	2	17	3640	0	12	25	
						3	269	368	100	5	7	2	17	3640	0	12	25	
						2	270	369	100	8	9	2	17	3640	0	12	25	
						2	271	370	100	1	2	2	17	3640	0	12	25	
						5	271	370	100	13	17	2	17	3640	0	12	25	
						1	271	370	100	26	26	2	17	3640	0	12	25	
27	497	9	3700	59	4030	1	327	328	2	10	10	2	21	330	0.1	13	34	
						1	329	330	2	10	10	2	21	330	0.1	13	34	
						1	331	332	2	10	10	2	21	330	0.1	13	34	
						1	333	334	2	10	10	2	21	330	0.1	13	34	
						1	335	336	2	10	10	2	21	330	0.1	13	34	
						1	337	338	2	10	10	2	21	330	0.1	13	34	
						1	339	340	2	10	10	2	21	330	0.1	13	34	
						1	341	342	2	10	10	2	21	330	0.1	13	34	
						1	343	344	2	10	10	2	21	330	0.1	13	34	
						1	345	346	2	10	10	2	21	330	0.1	13	34	
						1	347	348	2	10	10	2	21	330	0.1	13	34	
						1	349	350	2	10	10	2	21	330	0.1	13	34	
						1	351	352	2	10	10	2	21	330	0.1	13	34	
						1	353	354	2	10	10	2	21	330	0.1	13	34	
						1	355	356	2	10	10	2	21	330	0.1	13	34	
						1	357	358	2	10	10	2	21	330	0.1	13	34	
						1	359	360	2	10	10	2	21	330	0.1	13	34	
						1	361	362	2	10	10	2	21	330	0.1	13	34	
						1	363	364	2	10	10	2	21	330	0.1	13	34	
						2	364	365	2	24	25	2	21	330	0.1	13	34	
						2	365	366	2	11	12	2	21	330	0.1	13	34	
						1	365	366	2	27	27	2	21	330	0.1	13	34	
						1	365	366	2	3	3	2	21	330	0.1	13	34	
						1	365	366	2	10	10	2	21	330	0.1	13	34	
						5	366	367	2	18	22	2	21	330	0.1	13	34	
28	497	10	3900	67	3600	1	366	368	3	23	23	2	22	-300	-0.1	12	20	
						2	366	368	3	24	25	2	22	-300	-0.1	12	20	
						2	367	369	3	11	12	2	22	-300	-0.1	12	20	
						1	367	369	3	27	27	2	22	-300	-0.1	12	20	
						1	367	369	3	3	3	2	22	-300	-0.1	12	20	
						1	367	369	3	10	10	2	22	-300	-0.1	12	20	
						5	368	370	3	18	22	2	22	-300	-0.1	12	20	
						3	369	371	3	5	7	2	22	-300	-0.1	12	20	
						1	369	371	3	23	23	2	22	-300	-0.1	12	20	
						2	369	371	3	24	25	2	22	-300	-0.1	12	20	
						1	370	372	3	8	8	2	22	-300	-0.1	12	20	

\* Configuración de tanques # Prioridad

#### Cuadro 4. Solución con la mayor entrega (continúa de la página anterior)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
Demanda					Programación										Variación		Moldes por Barra	Platos en inventario
					Ciclos					Platos		*	#					
					No.	Tipo	Talla	Pares	Platos	Pares	Platos			de	a	Total	de	a
1	485	10	48960	841	50400	20	1	42	42	1	20	0	8	1440	0	12	20	
2	485	11	15768	361	16065	7	1	51	51	21	27	0	19	297	0	9	7	
3	485	8	5760	85	5600	4	1	4	4	28	31	0	13	-160	0	14	20	
						4	5	8	4	28	31	0	13	-160	0	14	20	
						4	9	12	4	28	31	0	13	-160	0	14	20	
						4	13	16	4	28	31	0	13	-160	0	14	20	
						4	17	20	4	28	31	0	13	-160	0	14	20	

\* Configuración de tanques # Prioridad

#### Cuadro 5. Solución con el menor número de ciclos y la mayor entrega (continúa en la siguiente página)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
Demanda					Programación										Variación		Moldes por barra	Platos en inventario
					Ciclos					Platos		*	#					
No.	Tipo	Talla	Pares	Platos	Pares	Platos	de	a	Total	de	a			pares		%		
4	485	6	6696	99	6930	4	21	31	11	28	31	0	6	234	0	14	9	
						4	32	42	11	28	31	0	6	234	0	14	9	
						1	43	53	11	1	1	0	6	234	0	14	9	
5	485	7	4536	67	5040	18	43	46	4	2	19	0	17	504	0.1	14	18	
6	485	9	114696	1818	116870	1	43	100	58	20	20	0	7	2174	0	13	34	
						4	43	100	58	28	31	0	7	2174	0	13	34	
						18	47	104	58	2	19	0	7	2174	0	13	34	
						7	52	109	58	21	27	0	7	2174	0	13	34	
						1	54	111	58	1	1	0	7	2174	0	13	34	
						18	112	115	4	1	18	1	1	440	0.1	14	18	
7	495	7	4600	68	5040	9	112	131	20	19	27	1	12	300	0	14	9	
8	495	6	12300	181	12600	4	112	114	3	28	31	1	15	-700	-0.1	14	20	
9	495	8	4900	73	4200	4	115	117	3	28	31	1	15	-700	-0.1	14	20	
						12	116	118	3	1	12	1	15	-700	-0.1	14	20	
10	495	10	1100	19	1140	6	116	116	1	13	18	1	13	40	0	12	20	
						6	117	117	1	13	18	1	13	40	0	12	20	
						4	118	118	1	28	31	1	13	40	0	12	20	
						3	118	118	1	13	15	1	13	40	0	12	20	
11	492	7	55092	811	56700	5	132	293	162	1	5	2	20	1608	0	14	5	
12	492	9	135884	2154	139100	20	132	238	107	6	25	2	9	3216	0	13	20	
13	491	8	7450	110	7000	6	132	136	5	26	31	2	2	-450	-0.1	14	20	
						6	137	141	5	26	31	2	2	-450	-0.1	14	20	
						6	142	146	5	26	31	2	2	-450	-0.1	14	20	
						2	147	151	5	26	27	2	2	-450	-0.1	14	20	
14	492	11	4704	108	4500	4	147	156	10	28	31	2	10	-204	0	9	10	
						2	152	161	10	26	27	2	10	-204	0	9	10	
						4	157	166	10	28	31	2	10	-204	0	9	10	
15	497	8	4900	73	4200	2	162	164	3	26	27	2	4	-700	-0.1	14	20	
						2	165	167	3	26	27	2	4	-700	-0.1	14	20	
						4	167	169	3	28	31	2	4	-700	-0.1	14	20	
						2	168	170	3	26	27	2	4	-700	-0.1	14	20	
						4	170	172	3	28	31	2	4	-700	-0.1	14	20	
						2	171	173	3	26	27	2	4	-700	-0.1	14	20	
						4	173	175	3	28	31	2	4	-700	-0.1	14	20	
16	487	6	5900	87	5670	2	174	182	9	26	27	2	3	-230	0	14	9	
						4	176	184	9	28	31	2	3	-230	0	14	9	
						2	183	191	9	26	27	2	3	-230	0	14	9	
						1	185	193	9	28	28	2	3	-230	0	14	9	
17	492	10	146360	2513	150000	3	185	284	100	29	31	2	17	3640	0	12	25	
						2	192	291	100	26	27	2	17	3640	0	12	25	
						1	194	293	100	28	28	2	17	3640	0	12	25	
						19	239	338	100	6	24	2	17	3640	0	12	25	
18	492	8	73964	1089	75600	1	239	328	90	25	25	2	12	1636	0	14	12	
						3	285	374	90	29	31	2	12	1636	0	14	12	
						2	292	381	90	26	27	2	12	1636	0	14	12	
						5	294	383	90	1	5	2	12	1636	0	14	12	
						1	294	383	90	28	28	2	12	1636	0	14	12	
19	497	7	1000	15	1050	1	329	329	1	25	25	2	14	50	0.1	14	18	
						1	330	330	1	25	25	2	14	50	0.1	14	18	
						1	331	331	1	25	25	2	14	50	0.1	14	18	
						1	332	332	1	25	25	2	14	50	0.1	14	18	
						1	333	333	1	25	25	2	14	50	0.1	14	18	
						1	334	334	1	25	25	2	14	50	0.1	14	18	
						1	335	335	1	25	25	2	14	50	0.1	14	18	
						1	336	336	1	25	25	2	14	50	0.1	14	18	
						1	337	337	1	25	25	2	14	50	0.1	14	18	
						1	338	338	1	25	25	2	14	50	0.1	14	18	
						5	339	339	1	6	10	2	14	50	0.1	14	18	
20	491	6	1350	20	1260	9	339	340	2	11	19	2	18	-90	-0.1	14	9	
21	491	7	650	10	700	5	339	339	1	20	24	2	5	50	0.1	14	18	
						1	339	339	1	25	25	2	5	50	0.1	14	18	
						4	340	340	1	6	9	2	5	50	0.1	14	18	
22	490	11	5328	122	5355	1	340	356	17	10	10	2	19	27	0	9	7	
						5	340	356	17	20	24	2	19	27	0	9	7	
						1	340	356	17	25	25	2	19	27	0	9	7	
23	490	10	2160	38	2400	9	341	342	2	11	19	2	11	240	0.1	12	20	
						4	341	342	2	6	9	2	11	240	0.1	12	20	
						7	343	344	2	11	17	2	11	240	0.1	12	20	
24	487	11	3744	86	3780	2	343	354	12	18	19	2	16	36	0	9	7	
						4	343	354	12	6	9	2	16	36	0	9	7	

\* Configuración de tanques # Prioridad

**Cuadro 5. Solución con el menor número de ciclos y la mayor entrega** (continúa en la siguiente página)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18						
Demanda					Programación									Variación		Moldes por Barra	Platos en inventario						
					Ciclos					Platos													
No.	Tipo	Talla	Pares	Platos	Pares	Platos	de	a	Total	de	a	*	#	pares	%								
25	490	9	4248	68	4030	1	345	356	12	11	11	2	16	36	0	9	7						
						6	345	346	2	12	17	2	12	-218	-0.1	13	34						
						6	347	348	2	12	17	2	12	-218	-0.1	13	34						
						6	349	350	2	12	17	2	12	-218	-0.1	13	34						
						6	351	352	2	12	17	2	12	-218	-0.1	13	34						
						6	353	354	2	12	17	2	12	-218	-0.1	13	34						
26	491	9	20150	320	20150	1	355	356	2	18	18	2	12	-218	-0.1	13	34						
						1	355	364	10	19	19	2	18	0	0	13	34						
						4	355	364	10	6	9	2	18	0	0	13	34						
						6	355	364	10	12	17	2	18	0	0	13	34						
						1	357	366	10	10	10	2	18	0	0	13	34						
						5	357	366	10	20	24	2	18	0	0	13	34						
						1	357	366	10	25	25	2	18	0	0	13	34						
						1	357	366	10	11	11	2	18	0	0	13	34						
						1	357	366	10	18	18	2	18	0	0	13	34						
						1	365	374	10	19	19	2	18	0	0	13	34						
						4	365	374	10	6	9	2	18	0	0	13	34						
						6	365	374	10	12	17	2	18	0	0	13	34						
						27	497	9	3700	59	4030	1	367	368	2	10	10	2	21	330	0.1	13	34
												5	367	368	2	20	24	2	21	330	0.1	13	34
1	367	368	2	25	25							2	21	330	0.1	13	34						
1	367	368	2	11	11							2	21	330	0.1	13	34						
1	367	368	2	18	18							2	21	330	0.1	13	34						
1	369	370	2	10	10							2	21	330	0.1	13	34						
5	369	370	2	20	24							2	21	330	0.1	13	34						
1	369	370	2	25	25							2	21	330	0.1	13	34						
1	369	370	2	11	11							2	21	330	0.1	13	34						
1	369	370	2	18	18							2	21	330	0.1	13	34						
1	371	372	2	10	10							2	21	330	0.1	13	34						
5	371	372	2	20	24							2	21	330	0.1	13	34						
1	371	372	2	25	25							2	21	330	0.1	13	34						
1	371	372	2	11	11							2	21	330	0.1	13	34						
1	371	372	2	18	18							2	21	330	0.1	13	34						
1	373	374	2	10	10							2	21	330	0.1	13	34						
3	373	374	2	20	22							2	21	330	0.1	13	34						
28	497	10	3900	67	3600							2	373	375	3	23	24	2	22	-300	-0.1	12	20
												1	373	375	3	25	25	2	22	-300	-0.1	12	20
												1	373	375	3	11	11	2	22	-300	-0.1	12	20
						1	373	375	3	18	18	2	22	-300	-0.1	12	20						
						3	375	377	3	29	31	2	22	-300	-0.1	12	20						
						1	375	377	3	19	19	2	22	-300	-0.1	12	20						
						4	375	377	3	6	9	2	22	-300	-0.1	12	20						
						6	375	377	3	12	17	2	22	-300	-0.1	12	20						
						1	375	377	3	10	10	2	22	-300	-0.1	12	20						

\* Configuración de tanques # Prioridad

**Cuadro 5. Solución con el menor número de ciclos y la mayor entrega** (continúa de la página anterior)

### Conclusiones y trabajo futuro

Una ventaja importante derivada de la estimación del Frente de Pareto es la identificación de las tres mejores soluciones ya mostradas, lo cual no podría haberse logrado de otra forma. En un artículo anterior Ramírez et al.<sup>1</sup> muestran una solución con el menor número de ciclos posible, la cual fue de 409 siendo que ahora se encontró una con 368 ciclos. En relación al tiempo que consumieron las corridas, debe tomarse en cuenta que los grupos de corridas son independientes entre sí, por lo que el AG puede correrse en paralelo en más de un procesador, reduciendo así significativamente el tiempo real requerido (en este caso se utilizó una computadora de escritorio Pentium(R) D, 3.00 GHz y 0.99 GB de RAM y una portátil Pentium(R) 2.66 GHz y 240 MB de RAM). El tiempo promedio por grupo de corridas fue de 5 horas y 29 minutos.

Por otro lado, el número de veces que hay que cambiar la configuración de los tanques se muestra en la columna 13 (cuadros 3, 4 y 5) siendo el último número que se muestra más uno el número de configuraciones distintas de tanques. Como trabajo futuro puede considerarse minimizar este número como un tercer objetivo en conflicto. Así mismo, reducir

los tiempos del procesador es un aspecto importante, lo cual podría lograrse utilizando otras técnicas tales como las estrategias evolutivas.

Finalmente, existen otras restricciones del caso real, cuyo impacto en las soluciones ya conocidas, habría que evaluar, principalmente en cuanto a factibilidad se refiere.

## Referencias

- <sup>1</sup> S. M. Ramírez, X. Jiménez López, M. L. Arteaga y K. L. Contreras, "Aplicación de un Algoritmo Genético Simple con Reparación en un Caso Real de Planeación de Producción Discreta: Fase I". *Revista de la Ingeniería Industrial (academiajournals.com)*, Vol. 3, No. 1, 2009.
- <sup>2</sup> A. Zhou, Q. Shan, Y. Jin, and E. Tsang, "A Model-Based Evolutionary Algorithm for Bi-objective Optimization". In *Proceedings of the Congress on Evolutionary Computation (CEC)*, pages 2568-2575, 2005, IEEE Press.
- <sup>3</sup> M. Laumanns, L. Thiele, K. Deb, and E. Zitzler, "Combining Convergence and Diversity in Evolutionary Multiobjective Optimization". *Evolutionary Computation*, Vol. 10, No. 3, pages 263-282, 2002.
- <sup>4</sup> K. Deb and S. Jain, "Running Performance Metrics for Evolutionary Multi-objective Optimization". Technical Report 2002004, Kanpur Genetic Algorithms Laboratory (KanGal), Indian Institute of Technology, Kanpur, India, 2002.
- <sup>5</sup> J. E. Fieldsend, R. M. Everson, and S. Singh, "Using Unconstrained Elite Archives for Multi-objective". *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, Vol. 7, No. 1, pages 305-323, 2001.
- <sup>6</sup> M. Farina, "A Minimal Cost Hybrid Strategy for Pareto Optimal Front Approximation". *Evolutionary Optimization*, Vol. 3, No. 1, pages 41-52, 2001.
- <sup>7</sup> A. E. Eiben, R. Hinterding, and Z. Michalewicz, "Parameter Control in Evolutionary Algorithms". *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, Vol. 13, No. 1, pages 124-141, 2000.
- <sup>8</sup> Y. Jin, M. Olhofer, and B. Sendhoff, "Managing Approximate Models in Evolutionary Aerodynamic Design Optimization". In *Proceedings of IEEE Congress on Evolutionary Computation*, pages 592-599, 2001, IEEE Press.
- <sup>9</sup> T. Beielstein, C. P. Ewald, and S. Markon, "Optimal elevator Group Control by Evolution Strategies". In *Proceedings 2003 Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO'03)*, pages 1963-1974, 2003, Springer.
- <sup>10</sup> E. Mezura-Montes and C. A. Coello-Coello, "A Simple Multimembered Evolution Strategy to Solve Constrained Optimization Problems". *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, Vol. 9, No. 1, pages 1-17, 2003.
- <sup>11</sup> Y. Jin, T. Okabe, and B. Sendhoff, "Adapting Weighted Aggregation for Multiobjective Evolution Strategies". In *Proceedings of First International Conference on Evolutionary Multi-Criterion Optimization. Lecture notes in Computer Science*, pages 96-110, 2001, Springer.