Optimización Multiobjetivo en la Planificación de Centrales Telefónicas

Carlos D. Almeida
Universidad Nacional de Asunción
Campus Universitario de San Lorenzo, Paraguay
Casilla de Correos 1439
cdad@ieee.org

Nilton Amarilla
Universidad Nacional de Asunción
Campus Universitario de San Lorenzo, Paraguay
Casilla de Correos 1439
dmantest@copaco.com.py

Benjamín Barán
Centro Nacional de Computación
Universidad Nacional de Asunción
Campus Universitario de San Lorenzo, Paraguay
Casilla de Correos 1439
bbaran@cba.com.py

Abstract

Planning the optimum location of an Telephone switching centers is a very complex calculation process in charge of specialists dedicated to that matter, who usually consider only one objective: to attend a given demand at the lowest possible cost. The conventional techniques of planning derive benefit from heuristics methods, to obtain the precise location of the telephone switching centers. Alternatively, the present work proposes the use of Multiobjective Evolutionary Algorithm in order to get the telephone switching centers with the best-compromised solution considering short, medium and large terms demand. To demonstrate the advantages of this new approach a design problem is considered. Experimental results with telephone switching center planning for the city of Asunción validate the present proposal, proving the quality, easiness and quickness to find good solutions.

Keywords: Telematics, Network Planning, Multiobjective Optimization, Evolutionary Algorithm**.**

Resumen

La planificación de la ubicación óptima de centrales telefónicas es un complejo proceso de cálculo, a cargo de especialistas que tradicionalmente consideran un solo objetivo: atender la demanda al menor costo. Las técnicas tradicionales de planificación utilizan métodos heurísticos de cálculo para la ubicación adecuada de estas centrales telefónicas. Alternativamente, el presente trabajo propone la utilización de Algoritmos Evolutivos Multiobjetivos para la planificación de centrales telefónicas a corto, mediano y largo plazo, demostrando que esta constituye una opción válida en la elaboración de propuestas, teniendo en cuenta la rapidez con que se pueden encontrar soluciones y la variedad y calidad de estas soluciones. Resultados experimentales con la planificación de centrales telefónicas para la ciudad de Asunción validan la presente propuesta.

Palabras claves: Telemática, Planificación de Redes, Optimización Multiobjetivo, Algoritmos Evolutivos.

Introducción

El vertiginoso crecimiento del consumo y variedad de los servicios de telecomunicaciones genera una necesidad cada vez mayor de implementar herramientas eficientes para la planificación de las redes de telecomunicaciones, a fin de minimizar los altos costos de inversión y mantenimiento. Básicamente, el problema a resolver consiste en calcular la cantidad de centrales necesarias para cubrir la demanda de un área y la correspondiente ubicación eficiente de las mismas, de forma a minimizar los costos basados en los datos de población, demanda de tráfico y costo de la infraestructura requerida para atender la demanda proyectada.

Actualmente, existen herramientas de planificación como PLANITU [12] que permiten realizar la planificación de centrales, calculando una ubicación de centrales que atiende a necesidades de telecomunicaciones. Esta herramienta convencional, resuelve el problema en cuestión proponiendo una única solución, calculada mediante métodos tradicionales basados en el álgebra lineal [12]. Este método es adecuado cuando se estudia la posibilidad de instalar una nueva central, pero no es eficiente cuando se esperan ubicar varias centrales, ya que se necesitaría muchísimo tiempo de procesamiento para analizar cada una de las posibles combinaciones, con el agravante de obtener resultados que no garantizan ser una solución óptima. Adicionalmente, herramientas existentes de planificación como PLANITU, tienen la restricción adicional de un costo muy elevado de adquisición y mantenimiento, lo que complica su utilización en instituciones sin suficientes recursos económicos.

Históricamente, este tipo de problemas, se ha intentado resolver por medio de programación lineal [13, 6], pero esta metodología presenta dificultades en su formulación. Así mismo, se ha intentado utilizar búsqueda exhaustiva, pero esto solo es posible para redes muy pequeñas, lo que dificulta su utilización práctica si se considera el tamaño de las actuales redes de telecomunicaciones [13]. Alternativamente, algoritmos "*Branch and Bound*" [4] eran también utilizados. Sin embargo, debido a la creciente complejidad del diseño de las redes de telecomunicaciones, se han desarrollado también varios algoritmos heurísticos [5] para solucionar grandes instancias del problema de ubicación de centrales. Dos aproximaciones heurísticas conocidos como "*ADD*" [10] y "*DROP*" [8] fueron usadas como algoritmos heurísticos para versiones de gran escala del problema en cuestión. Un intento más reciente de encontrar soluciones al referido problema, se basa en las ya conocidas técnicas de inteligencia artificial, conocidas como "*Tabu Search*" [9]. Esta técnica de "*Tabu Search*" es una aproximación heurística que facilita la derivación de varias alternativas de solución, tales como los algoritmos descendientes [11]. En todos estos casos, la solución encontrada minimiza una única función objetivo, como el costo de inversión para atender una demanda conocida. Sin embargo, no siempre la solución que atiende la demanda actual es la que minimizará los costos en el mediano o largo plazo. En consecuencia, este trabajo propone resolver el problema de planificación de centrales de telecomunicaciones considerando simultáneamente:

- la demanda actual (año 2002 para el problema de prueba),
- la demanda a mediano plazo (año 2004 en el referido problema de prueba) y
- la demanda a largo plazo (considerando el año 2007 para este trabajo, por falta de estimaciones suficientes para años posteriores).

En consecuencia, debido a la imposibilidad de los métodos tradicionales de realizar la optimización simultanea de varios objetivos en la búsqueda de soluciones, el presente trabajo propone utilizar Algoritmos Evolutivos Multiobjetivos que permitan encontrar soluciones al problema de referencia, optimizando todos los objetivos propuestos, al mismo tiempo. A diferencia de la solución mono-objetivo, la solución multiobjetivo es un conjunto de soluciones Pareto que contiene a todas las soluciones de compromiso, obtenidas al considerar simultáneamente todas las funciones objetivos. En consecuencia, el planificador responsable de la toma de decisiones obtiene un abanico de posibilidades óptimas, en el sentido Pareto, para elegir la solución que mejor se adecue a sus necesidades. Una importante ventaja de esta metodología es que los tiempos de corridas de estos algoritmos evolutivos son considerablemente más cortos que los requeridos para calcular un conjunto similar de soluciones Pareto, utilizando repetidamente los métodos tradicionales arriba citados. El presente trabajo, propone la optimización de las redes de telecomunicaciones utilizando un Algoritmo Evolutivo Multiobjetivo. En particular, se utilizará el *Strength Pareto Evolutionary Algorithm* - SPEA 2, por su reconocida eficiencia en la búsqueda de soluciones multiobjetivo [14].

Este trabajo está organizado de la siguiente manera: En la sección 1 se formula matemáticamente el problema, exponiendo algunos conceptos relativos a la optimización multiobjetivo, el método utilizado para ubicar las centrales, y el problema de prueba. En la sección 2, se describe el Algoritmo Evolutivo Multiobjetivo propuesto. En la sección 3 se presentan los resultados experimentales obtenidos y su interpretación. Finalmente, se concluye el trabajo en la sección 4.

1. Formulación matemática del problema

En esta sección se define algunos conceptos relativos a la optimización Multiobjetivo, se resume el procedimiento realizado para encontrar estas soluciones y se presenta el problema de prueba.

1.1. Optimización Multiobjetivo

El problema de optimización Multiobjetivo tratado en este trabajo se define de la siguiente forma [2,3]:

Minimizar $\quad \boldsymbol{y} = \boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}) = (f_1(\boldsymbol{x}), f_2(\boldsymbol{x}), f_3(\boldsymbol{x}))$ **(1)**

donde $\quad \boldsymbol{x} = (x_1, x_2, \ldots, x_i, \ldots, x_n) \in \boldsymbol{X} \subset \boldsymbol{N}^n$ representa el vector de decisión;

$\boldsymbol{y} = (y_1, y_2, y_3) = \boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}) \in \boldsymbol{Y} \subset \boldsymbol{N}^3$ representa el vector de objetivos;

n ... número máximo de centrales;

m ... número máximo de cuadrículas en que se divide el área en estudio;

x_i ... designa la ubicación de una central dentro del área en estudio $(0 \leq x_i \leq m)$;

y_i ... representa la inversión acumulada hasta el año considerado.

Cabe recordar que en un contexto multiobjetivo [2] se dice que un vector objetivo $\boldsymbol{y}$ domina a otro $\boldsymbol{y'}$ sí y solo sí

$y_i \leq y_i', \ \forall i$, y además, $y_j < y_j'$ para por lo menos un j.

Una solución $\boldsymbol{x}^* \in \boldsymbol{X}$ es Pareto óptima si no existe otra $\boldsymbol{x} \in \boldsymbol{X}$ tal que $\boldsymbol{y} = \boldsymbol{f}(\boldsymbol{x})$ domine a $\boldsymbol{y}^* = \boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}^*)$. El conjunto de todas las soluciones Pareto óptimas es denominado conjunto Pareto óptimo $\boldsymbol{P}$ $(\boldsymbol{P} \subseteq \boldsymbol{X})$, y su imagen, Frente Pareto $\boldsymbol{FP}$ $(\boldsymbol{FP} \subseteq \boldsymbol{Y})$.

1.2. Ubicación óptima de centrales y Problema de Prueba

El problema de la ubicación óptima de centrales consiste en encontrar el número óptimo de centrales telefónicas, y la mejor ubicación de dichas centrales en un área de estudios (típicamente una ciudad determinada, Asunción para este trabajo), de forma a minimizar el costo acumulado de inversión a corto, mediano y largo plazo.

El área de la ciudad a ser atendida se divide en m cuadrículas de por ejemplo 10 a 500 m de lado. A cada una de éstas cuadrículas se le asigna un valor de fila y columna, conformando una matriz. A cada elemento de esta matriz se asocian dos valores: *Población*, que es la cantidad de habitantes que hay en cada cuadrícula, y *Costo del Terreno* (por metro cuadrado). Los datos de población y terrenos se obtienen a partir de datos oficiales disponibles sobre el área en estudio, que para el presente trabajo, será la ciudad de Asunción, capital de la República del Paraguay [7].

De esta forma, obtenemos una matriz $\boldsymbol{M} \in \boldsymbol{N}^{mx4}$ con una fila por cada una de las m cuadrículas válidas y 4 columnas con información por cuadrícula, de:

- 1ª columna: fila para su ubicación en el mapa;
- 2ª columna: columna para su ubicación en el mapa;
- 3ª columna: población actual (dato utilizado para estimar demanda);
- 4ª columna: costo del terreno.

Debido a que el plano del área en estudio tiene en general una figura geométrica irregular, muchas cuadrículas caen fuera de los límites de la ciudad o en zonas no habitadas, con ríos, lagos o montañas. Por lo tanto, utilizando técnicas de matrices esparzas, a todas las cuadrículas que quedan fuera de la ciudad se les asigna un indicador de cuadrícula no válida (*flag*) y no se las cuenta entre las m cuadrículas válidas.

El costo de implementación de una central de telecomunicaciones es calculado de la siguiente forma:

$$y_i = \sum_{j=1}^{6} c_j(\boldsymbol{x}) \qquad \ldots\ i=1,\,2,\,3 \tag{2}$$

donde:

$c_1(\boldsymbol{x})$: costo total de planta externa, definidas por el vector de decisión $\boldsymbol{x}$;

$c_2(\boldsymbol{x})$: costos de terrenos donde serán instaladas las centrales;

$c_3(\boldsymbol{x})$: costos de edificios donde serán instaladas las centrales;

$c_4(\boldsymbol{x})$: costos de ingeniería que conlleva la instalación de las centrales;

$c_5(\boldsymbol{x})$: costos de equipos de conmutación;

$c_6(\boldsymbol{x})$: costos de equipos de transmisión entre las centrales definidas por $\boldsymbol{x}$.

Para la evaluación del costo de planta externa $c_1(\boldsymbol{x})$, se calcula las distancias de cada abonado a la central más cercana, conforme se ilustra en el siguiente ejemplo.

Problema de Prueba

Como problema de prueba para ejemplificar la presente propuesta se escogió el diseño de la planta externa de una empresa de telefonía básica para la ciudad de Asunción, dada la disponibilidad de datos para la misma [7]. La Figura 1 representa el plano cuadriculado de la ciudad de Asunción, con los contornos indicando los elementos válidos de la matriz. Para este ejemplo, existen m = 499 cuadrículas válidas.

	Columnas																													
Filas	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**	**15**	**16**	**17**	**18**	**19**	**20**	**21**	**22**	**23**	**24**	**25**	**26**	**27**	**28**	**29**	**30**
1																				1	2	3	4	5						
2																			6	7	8	9	10	11	12	13				
3																		14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24		
4																	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38
5															39	40	41	42	43	44	45	46	47	**48**	49	50	51	52	53	54
6														55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
7														72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	
8														88	89	90	91	**92**	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	
9														104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118		
10														119	120	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132			
11					133	134						135	136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150			
12			151	152	153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165	166	167	168	169	170	171	172	173	174	175			
13		176	177	178	179	180	181	182	183	184	185	186	187	**188**	189	190	191	192	193	194	195	196	197	198	199	200	201			
14		202	203	204	205	206	207	208	209	210	211	212	213	214	215	216	217	218	219	220	221	222	223	224	225	226	227			
15	228	229	230	231	**232**	233	234	235	236	237	238	239	240	241	242	243	244	245	246	247	248	249	**250**	251	252	253	254			
16	255	256	257	258	259	260	261	262	263	264	265	266	267	268	269	270	271	272	273	274	275	276	277	278	279	280	281			
17	282	283	284	285	286	287	288	289	290	291	292	293	294	295	296	297	298	299	300	301	302	303	304	305	306	307	308			
18		309	310	311	312	313	314	315	316	317	318	**319**	320	321	322	323	324	325	326	327	328	329	330	331	332	333				
19		334	335	336	337	338	339	340	341	342	343	344	345	346	347	348	349	350	351	352	353	354	355	356	357					
20	358	359	360	361	362	363	364	365	366	367	368	369	370	371	372	373	374	375	376	377	378	379	380	381	382					
21	383	384	385	386	387	388	389	**390**	391	392	393	394	395	396	397	398	399	400	401	402	403	404	405	406						
22		407	408	409	410	411	412	413	414	415	416	417		418	419	420	421	422	**423**	424	425	426	427	428						
23			429	430	431	432	433	434	435	436	437			438	439	440	441	442	443	444	445	446	447							
24				448	449	450	451	452	453	454	455				456	457	458	459	460	461	462									
25					463	464	465	466	467	468						469	470	471	472	473										
26						474	475	476	477								478	479	480											
27						481	482	483	484									485												
28						486	487	488																						
29						489	490	491																						
30						492	493	494																						
31						495	496	497																						
32							498	499																						

Figura 1: Ejemplo de división en cuadrículas de la ciudad de Asunción. Este plano indica los contornos que contienen los 499 elementos válidos de la matriz. Además, se observa un ejemplo de ubicación de 8 centrales con sus respectivas áreas de servicio.

El vector de decisión para este ejemplo, al adoptar un número máximo de n = 14 centrales, será:

$$\boldsymbol{x} = (0, 0, 0, 0, 0, 0, 48, 92, 188, 232, 250, 319, 390, 423)$$

donde se observa que de las 14 centrales posibles, esta solución utiliza solo 8 centrales, ubicadas en las posiciones 48, 92, 188, 232, 250, 319, 390, y 423. Puede notarse además que el vector de decisión $\boldsymbol{x}$ tiene sus elementos x_i

ordenados en forma creciente, lo que facilita detectar soluciones similares donde las centrales se encuentran simplemente permutadas.

Las cuadrículas que formarán parte del área de servicio de una central, son aquellas que tienen el costo mínimo de conexión cuando conectadas a esta central. Cada una de estas cuadrículas, denotadas en adelante x_t, atiende la condición: $1 \leq x_t \leq m$. A cada cuadrícula x_t van asociados dos valores que representan sus coordenadas (X_t, Y_t) en una matriz de 32 filas por 30 columnas. El cálculo del costo de conectar los abonados que están en una cuadrícula x_t a una central, se realiza conforme a:

$$c_{it} = d_t \times p \times (|X_i - X_t| + |Y_i - Y_t| + 1) \quad \textbf{(3)}$$

donde:

c_{it}	costo de conectar los abonados pertenecientes a la cuadrícula x_t a la central x_i;
d_t	cantidad de abonados de la cuadrícula x_t;
p	costo de planta externa por unidad de longitud, por cada abonado;
(X_i, Y_i) ...	coordenadas de la central x_i;
(X_t, Y_t) ...	coordenadas de la cuadrícula x_t.

El área de servicio de cada central contiene aquellas cuadrículas con menores distancias a dicha central, de forma a minimizar el costo de planta externa $c_1(\boldsymbol{x})$. Por lo tanto, el costo total de planta externa, para el ejemplo considerado, se calcula conforme:

$$c_1(\boldsymbol{x}) = \sum_{i=1}^{n} \sum_{t=1}^{m} c_{it} \cdot h_{it} \quad \textbf{(4)}$$

$$h_{it} = \begin{cases} 1 & \text{si el sitio } x_t \text{ está conectado a la central } x_i \\ 0 & \text{caso contrario} \end{cases}$$

Se asume que cada sitio x_t puede estar conectado a una sola central x_i, por lo tanto:

$$\sum_{i=1}^{n} h_{it} = 1 \quad x_t = 1, 2, ..., m \quad \textbf{(5)}$$

El costo del terreno es el producto del costo por m^2 y el área del edificio de la central, conforme:

$$c_2(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^{n} q_i x g_i x w_i \quad \textbf{(6)}$$

q_i ...	área en m^2 a ser ocupada por la central x_i.
g_i ...	costo del terreno por m^2 en la cuadrícula x_i.

$$w_i = \begin{cases} 1 & \text{si la central está en el sitio } x_i \\ 0 & \text{caso contrario} \end{cases}$$

Los demás costos de la ecuación (2), se calcularon de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} c_3(\boldsymbol{x}) &= \sum_{i=1}^{n} c_e \times w_i \\ c_4(\boldsymbol{x}) &= \sum_{i=1}^{n} c_{ing} \times w_i \\ c_5(\boldsymbol{x}) &= \sum_{t=1}^{m} c_{eq} \times d_t \\ c_6(\boldsymbol{x}) &= \frac{c_{tr} \times k \times (k-1)}{2} \\ k &= \sum_{i=1}^{n} w_i \end{aligned} \quad \textbf{(7)}$$

donde:

c_e .... costo de construcción del edificio de la central;

c_{ing} .... costo de la ingeniería de planificación de centrales;

c_{eq} .... costo de los equipamientos de la central, por abonado;

c_{tr} ... costo de los equipamientos de transmisión;

k ... cantidad de centrales ($k \leq n$);

d_t ... demanda telefónica de la cuadrícula x_t;

En consecuencia, el problema principal a ser resuelto consiste en encontrar la cantidad de centrales y la ubicación óptima de estas centrales en el área de estudio, de la cual se conocen todos los datos relativos a la matriz **M** arriba definida. Si existen m sitios posibles, existen claramente 2^m alternativas de ubicación de centrales. Aún, si se restringe la atención para ubicar n centrales en m sitios, el número de alternativas de ubicación de centrales es todavía:

$$\binom{m}{n} = \frac{m!}{(m-n)!\,n!} \qquad \textbf{(8)}$$

En el ejemplo de la Figura 1, para 499 cuadrículas válidas y 14 centrales, existen unas $5{,}66 \times 10^{26}$ alternativas de ubicación de centrales.

El problema propuesto en el presente trabajo, permite encontrar soluciones Pareto que minimicen los costos acumulados a corto, mediano y largo plazo, de un conjunto de alternativas de ubicación de centrales, considerando los diferentes valores posibles del número k de centrales ($k \leq n$). El espacio de búsqueda del problema propuesto, es entonces:

$$\sum_{i=1}^{n} \binom{m}{i} \qquad \textbf{(9)}$$

en otras palabras, el método a ser utilizado en el presente trabajo debe posibilitar la obtención de un conjunto de soluciones Pareto óptimas, estableciendo la cantidad y la ubicación óptima de estas centrales.

Los valores de las matrices, datos, y diagramas utilizados en los resultados experimentales presentados están disponibles en [1].

2. Algoritmo Evolutivo Propuesto

El algoritmo evolutivo propuesto es el SPEA 2 cuya eficiencia en la búsqueda de soluciones se caracteriza por la obtención de soluciones Pareto óptimas y la diversidad de las mismas sobre el Frente Pareto. Este algoritmo utiliza una estrategia de asignación de fitness que incorpora información de densidad a fin de evitar la pérdida de posibles soluciones óptimas [14]. El operador de truncamiento elimina aquellos individuos que están muy pegados unos a otros de forma a no perder puntos valiosos de la frontera y asegurar de esta forma que las soluciones encontradas en el frente Pareto, sean regularmente distribuidas. El proceso de encontrar los individuos no dominados en el archivo y la población, está basado en el concepto de dominancia Pareto. Cada vez que un individuo no dominado es encontrado, el mismo es comparado con los no dominados ya existentes en el archivo, y si el mismo es una solución, el individuo hallado es insertado en el archivo. Para esclarecer el procedimiento de aplicación del SPEA 2 en la planificación de centrales, a continuación se presenta un esquema de utilización del referido algoritmo.

2.1. Representación de soluciones y población inicial

Para la aplicación de los Algoritmos Evolutivos Multiobjetivos propuestos en el problema de prueba, cada individuo $x = (x_1, x_2, ..., x_i, ..., x_n)$ fue codificado usando un arreglo de números enteros x_i, tal que $0 \leq x_i \leq m$ $(m=499)$. En la figura 1, donde se representa el plano cuadriculado de Asunción, se puede apreciar los 499 valores no nulos de la matriz utilizada para los cálculos de costos de cada vector de decisión. La población inicial, cuyo tamaño se denotará como "*nind*" (número de individuos), es generada por un algoritmo heurístico de inicialización, en donde "*nmax*" indica el número máximo de centrales para cada vector de decisión. Este algoritmo genera una población inicial en forma *inteligente* de manera a obtener individuos que se aproximen razonablemente al conjunto de soluciones Pareto óptimas buscadas, minimizar de esta forma los tiempos de corridas. Para cada individuo de la población, se realiza un sorteo para saber cuantas centrales tendrá esa solución, y se ubican las centrales de tal forma a que las mismas esten ubicadas en los centros de demandas a fin de minimizar los costos de conexión de los abonadosa a su central correspondiente. El algoritmo heurístico de inicio de la población se describe a continuación.

Algoritmo heurístico de inicialización de la población inicial.
Leer parámetros: *nind, nmax*
Ordenar matriz de población de acuerdo al número de habitantes
Para *in*=1 hasta *nind*
    Generar un número aleatorio N entre 6 y *nmax*
    Dividir la población total en N partes: *parte=poblacion.total/N*
    Para i=1 hasta N
        Elegir punto x_i aleatoriamente entre las 5 ubicaciones más pobladas
        Hallar distancia euclidiana de x_i a todas las ubicaciones de la matriz de población
        Ordenar las distancias obtenidas de menor a mayor
        poblacion = 0
        Mientras *poblacion* es menor o igual a *parte*
            Sumar a *poblacion* la población de las ubicaciones más próximas a x_i
        Fin Mientras
        Eliminar de la matriz de población las ubicaciones que se agregaron a *poblacion*
        Hallar el centro geométrico P_i de todas las ubicaciones que se agregaron a *poblacion*
        Hacer $x_i=P_i$
    Fin Para
    Si $N < nmax$
        $x_i=0$ para todo i que no contiene una central (esto es, $N+1 \leq i \leq nmax$)
    Fin Si
Fin Para
Eliminar centrales repetidas de cada individuo de la población inicial y ordenar centrales en orden creciente

Pseudocódigo 1: Algoritmo Heurístico de generación de la población inicial.

2.2. Evaluación de soluciones y función fitness

En la evaluación de la función fitness, se utilizaron los conceptos de dominancia Pareto definidos en la sección 1.1 en un contexto de minimización de funciones objetivos. De esta forma, cada vector de decisión es comparado con otro a través de las funciones objetivos de dichos vectores, de tal forma a determinar si un individuo i domina a otro individuo j. La función fitness(x) fue implementada conforme a lo especificado por el SPEA 2 de Zitzler [14].

Los valores de fitness calculados mediante este algoritmo, son utilizados en la selección de los individuos que pasarán a formar parte del archivo que contiene a los mejores individuos de la población. El referido algoritmo asigna a los individuos no dominados un fitness menor a 1, en cuanto que a los individuos dominados se les asigna un fitness mayor o igual a 1, con lo que todos los individuos tienen diferentes valores de fitness.

2.3. Selección

Se denomina como *selección de ambiente* [14] a la acción de completar con los mejores individuos de cada generación, una población externa denominada archivo. El tamaño del archivo es fijo y no varía durante las corridas del algoritmo. Inicialmente, todos los individuos no dominados, cuyos fitness son menores que uno, son copiados al archivo de la siguiente generación $\overline{P}_{t+1} = \{i \mid i \in P_t + \overline{P_t} \wedge F(i) < 1\}$. Si la cantidad de individuos no dominados es igual al tamaño establecido para dicho archivo $(|\overline{P}_{t+1}| = \overline{N})$, el paso de selección del ambiente está completo. Caso contrario, existen dos posibilidades:

1) la cantidad de individuos no dominados es menor que el tamaño establecido para el archivo $(|\overline{P}_{t+1}| < \overline{N})$, o
2) la cantidad de no dominados es mayor que el tamaño fijado para el archivo $(|\overline{P}_{t+1}| > \overline{N})$.

En el primer caso, se completa el archivo con los mejores $(\overline{N} - |\overline{P}_{t+1}|)$ individuos dominados en el archivo y la población de la generación anterior *t*. Esto es implementado ordenando el multiconjunto $P_t + \overline{P}_t$ de acuerdo a los valores de fitness y copiando a $\overline{P}_{t+1}$ los primeros $\overline{N} - |\overline{P}_{t+1}|$ individuos i con fitness $F(i) \geq 1$. En el segundo caso, cuando el tamaño del conjunto de no dominados es mayor a $\overline{N}$, un operador de truncamiento remueve iterativamente los individuos de $\overline{P}_{t+1}$ hasta que el conjunto de no dominados sea igual al tamaño establecido para el archivo $|\overline{P}_{t+1}| = \overline{N}$. Este operador de truncamiento garantiza que puntos valiosos de la frontera no sean perdidos, y lo realiza de la siguiente forma: el individuo que tiene la menor distancia euclidiana a otro individuo es desechado en cada iteración. En caso de igualdad con otros individuos, se desempata considerando la segunda menor distancia del individuo a ser removido, y así sucesivamente.

2.4. Pseudocódigo del Algoritmo Evolutivo Multiobjetivo propuesto SPEA 2

En las corridas realizadas del algoritmo SPEA 2 se utilizaron los siguientes parámetros:

- Tamaño de la población (nind) = 100.
- Número máximo de centrales (nmax) = 14 a 20.
- Tamaño del archivo de no dominados (nptrue) = 100.
- Número máximo de generaciones (ngen) = 1000 a 3000.
- Probabilidad de cruzamiento (pc) = 0,7 a 0,9.
- Probabilidad de mutación (pm) = 0,1 a 0,3.

A continuación, se presenta el Pseudocódigo del algoritmo Multiobjetivo utilizado:

```
Programa principal SPEA 2
Leer los parámetros del SPEA 2: nind, nmax, ngen, pm, pc, nptrue
Generar una población usando el algoritmo heurístico (Pseudocódigo 1)
Generar un archivo vacío (conjunto externo)
Para gen=1 hasta ngen
        Eliminar centrales repetidas del individuo
        Evaluar funciones objetivo de cada individuo de la población
        Asignar fitness a cada individuo de la población y del archivo
        Calcular todos los individuos no dominados de la población y el archivo
        Actualizar el archivo con los individuos no dominados
        Si el tamaño del archivo es mayor que nptrue
                Reducir el tamaño del archivo con el operador de truncamiento
        Caso contrario
                Si el tamaño del archivo es menor que nptrue
                    Copiar los mejores individuos dominados del archivo y la población con fitness ≥ 1 al
                    archivo de la nueva generación hasta que el tamaño del archivo sea igual a nptrue
                Fin Si
        Si gen es menor que ngen
            Realizar torneo binario para seleccionar los individuos del archivo que formarán parte del
            conjunto de emparejamientos
            Realizar cruzamiento y mutación del conjunto de emparejamientos
            Actualizar la población del resultado del conjunto de emparejamientos
        Fin Si
        Incrementar contador de generaciones (gen=gen + 1)
Fin Para
Salvar el archivo (conjunto de no dominados)
```

Pseudocódigo 2: Algoritmo SPEA 2 implementado.

3. Resultados experimentales

Las soluciones obtenidas para el problema de prueba son presentadas en la tabla 1. Las mismas fueron obtenidas mediante sucesivas corridas del algoritmo SPEA 2, luego de haber descartado otros algoritmos evolutivos que no lograron el nivel de desempeño obtenido con el SPEA 2.

En la tabla 1 se puede apreciar que la mejor solución para el año base 2002 es la número 1, que utiliza 8 centrales. Para el año 2004, la mejor solución es la número 10 que requiere de 11 centrales, mientras que para el año 2007, la cantidad óptima de centrales es de 14 (solución número 19). Claramente, los tres objetivos conflictuan entre sí por lo que el planificador deberá decidir cual es la mejor relación de compromiso entre su inversión a corto plazo y el costo que podrá llegar a tener la red a mediano y largo plazo. Es interesante enfatizar que al utilizar un algoritmo evolutivo multiobjetivo, el planificador no solo encuentra las mejores soluciones para cada objetivo, sino toda la gama de soluciones de compromiso Pareto óptimas entre estos objetivos, por lo que se facilita la toma de decisión conciente.

Cabe mencionar que la solución efectivamente implementada para la ciudad de Asunción no es una solución Pareto óptima, y de hecho conlleva un costo mucho mayor que cualquiera de las soluciones calculadas con la metodología propuesta, sin importar cual de las 3 funciones objetivos se considere. En efecto, a la fecha existen en la ciudad de Asunción 8 centrales telefónicas, por lo que resulta razonable compararla con la solución número 1 de la Tabla 1 que también utiliza 8 centrales. Como consecuencia de esta comparación se puede notar que el costo de la infraestructura existente es al menos 4 % superior a la referida solución número 1, considerando el año base 2002. Esto es, la solución aquí propuesta hubiese representado un ahorro del orden de los cuatro millones de dólares a la inversión que fuera realizada para atender la demanda correspondiente al año 2002.

	Tabla de valores de soluciones no dominadas encontradas														**Costos en US$**		
Solución	**Vector de decisión**														**Año 2002**	**Año 2004**	**Año 2007**
1	0	0	0	0	0	0	48	92	188	232	250	319	390	423	103.685.700	5.162.463	12.765.596
2	0	0	0	0	0	32	91	128	185	232	304	321	390	423	103.884.860	5.163.835	12.753.748
3	0	0	0	0	0	49	94	163	232	250	265	372	390	424	103.890.330	5.160.239	12.745.146
4	0	0	0	0	0	49	94	163	232	250	265	321	390	423	103.910.600	5.160.081	12.744.893
5	0	0	0	0	0	49	93	189	232	250	265	372	390	424	103.918.700	5.159.084	12.742.180
6	0	0	0	0	32	76	147	163	232	265	303	347	390	443	104.040.180	5.155.810	12.718.956
7	0	0	0	0	32	92	147	163	232	265	303	347	390	443	104.047.160	5.154.795	12.716.454
8	0	0	0	32	76	147	180	189	258	292	303	372	390	443	104.550.300	5.155.748	12.703.861
9	0	0	0	32	92	147	180	189	258	292	303	372	390	443	104.557.280	5.154.733	12.701.359
10	0	0	0	32	92	147	189	207	258	292	303	372	390	443	104.638.420	5.154.383	12.700.554
11	0	0	32	76	147	180	189	258	292	303	364	372	435	443	105.229.590	5.156.761	12.691.531
12	0	0	32	92	147	180	189	258	292	303	364	372	435	443	105.236.570	5.155.746	12.689.029
13	0	0	32	92	147	189	207	258	292	303	364	372	435	443	105.338.540	5.155.729	12.689.055
14	0	32	76	147	163	180	258	274	292	305	364	372	435	443	106.080.390	5.158.318	12.680.680
15	0	32	92	147	163	180	258	274	292	305	364	372	435	443	106.087.370	5.157.303	12.678.178
16	0	32	92	147	163	208	231	246	293	330	363	372	414	443	106.414.660	5.157.066	12.678.038
17	32	76	147	163	180	258	274	292	305	364	372	379	435	443	107.152.020	5.162.245	12.675.595
18	32	92	147	163	180	258	274	292	305	364	372	379	435	443	107.159.000	5.161.230	12.673.093
19	32	92	147	163	180	246	258	292	305	364	372	379	435	443	107.162.610	5.160.889	12.672.366
Red Nacional	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**109**	**204**	**208**	**274**	**288**	**293**	**398**	**436**	**107.760.000**	**5.219.810**	**12.908.475**

Tabla 1: Tabla de soluciones no dominadas encontradas.

Dado que en la metodología propuesta existen varias soluciones no dominadas entre sí, y a fin de simplificar la tarea del planificador, se presenta en la Figura 2 una sugerencia pragmática para elegir una de entre todas las soluciones Pareto óptima. La idea is traer a *valor presente* las inversiones a mediano y largo plazo de forma a tener un único objetivo que permita comparar todas las alternativas de solución encontradas por el planificador, en el tradicional contexto mono-objetivo. En la Figura 2 puede notarse que en la simplificación propuesta, el número óptimo de centrales es 8, lo que coincide con el número existente de centrales en la ciudad de Asunción.

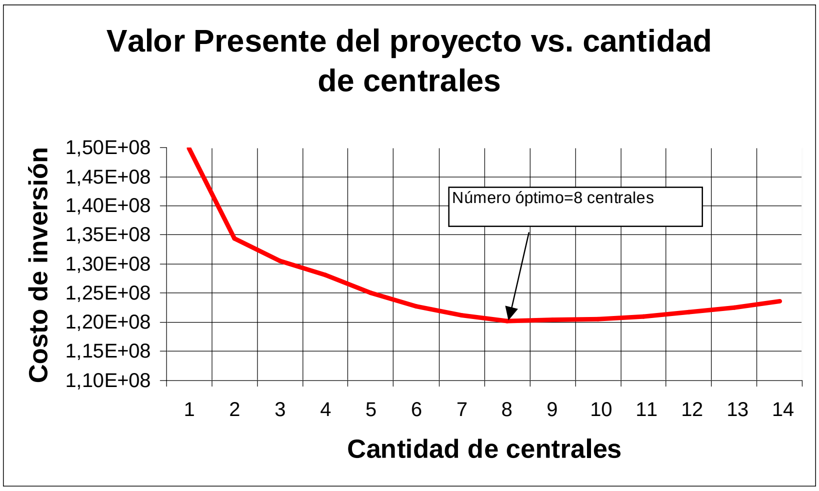

Figura 2: Este diagrama muestra el costo de inversión en función de la cantidad de centrales. Se observa el número óptimo de centrales que es igual a 8.

4. Conclusiones

La utilización de Algoritmos Evolutivos Multiobjetivos en la resolución de problemas de ubicación de centrales de telecomunicaciones, presenta un enfoque inédito en la planificación de redes de telefonía básica, proporcionando una herramienta computacional que permite obtener un conjunto de soluciones Pareto óptimas, considerando todos los aspectos que se quieran optimizar de manera simultanea, a diferencia de los métodos heurísticos tradicionales que simplemente proporcionan soluciones puntuales [12], apelando a procesos iterativos para contemplar todos los aspectos de la red que se quiere diseñar, con la consecuente demora en el diseño.

Con el presente trabajo, se nota que la utilización de algoritmos evolutivos Multiobjetivos como el SPEA2, proporciona al planificador de redes un conjunto de soluciones Pareto óptimas para la correcta ubicación de las centrales, de forma a minimizar los costos iniciales de inversión y las inversiones de expansión a mediano y a largo plazo. Conforme con los resultados obtenidos en este trabajo, se puede aseverar que las soluciones distribuidas sobre el frente Pareto son en su mayoría dominantes con respecto a las soluciones efectivamente implementadas por empresas del área que se limitaron a utilizar herramientas tradicionales de cómputo en sus estudios de planificación. De hecho, en las pruebas realizadas, las soluciones obtenidas con el SPEA2 superaron claramente a las obtenidas por otros métodos tradicionales.

En definitiva, se puede afirmar que el empleo de algoritmos evolutivos Multiobjetivos para la planificación, dimensionamiento y optimización de redes de telecomunicaciones, ofrece una perspectiva más amplia y eficiente que permite a los planificadores decidir entre un conjunto de soluciones óptimas, manejando los diversos aspectos de la red que se consideren necesarios para minimizar los costos en juego.

Cabe destacar que la metodología adoptada para resolver el problema de ubicación de centrales es fácilmente adaptable a otros problemas similares. Por ejemplo, dado una cantidad de centrales existentes en un área, se puede calcular donde agregar nuevas centrales.

Sobre la base de los resultados obtenidos, se puede utilizar la metodología propuesta para mejorar: la planificación de redes de telecomunicaciones, ubicación de estaciones bases para telefonía celular, o en general, ubicar de manera óptima centros de atendimiento de diversos servicios, como cadenas de comida rápidas, supermercados, etc. La simplicidad de la metodología propuesta, para un problema tan complejo, alienta a mirar con optimismo la realización de futuros trabajos en el área, así como nuevas aplicaciones.

Referencias

[1] Almeida C., Amarilla N. y Barán B.: *Reporte Técnico 01/2003*. Centro Nacional de Computación, Universidad Nacional de Asunción. San Lorenzo, Paraguay. Marzo, 2003.

[2] Arroyo J. e Armentano V.: Um Algoritmo Genético para Problemas de Otimização Combinatoria Multiobjetivo, *XXXIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*. Campos do Jordao – SP. Noviembre, 2001.

[3] Barán B. and Duarte S.: Multiobjective Network Design Optimization using Parallel Evolutionary Algorithms. Centro Nacional de Computación, Universidad Nacional de Asunción. San Lorenzo, Paraguay. Agosto 2002.

[4] Bellman R. E. and Dreyfus S. E.: *Applied Dynamic Programming*. Princeton University Press, Princeton, NJ, 1962.

[5] Boorstyn R. R. and Frank H.: "Large-Scale Network Topological Optimization". *IEEE Transactions on Communications*, Vol. COM-25, No. 1, Enero 1977.

[6] Cooper L. and Steinberg D.: *Methods and Applications of Linear Programming*. Saunders, Philadephia, 1974.

[7] Dirección General de Estadísticas: Encuestas y Censos: *Sistema Estadístico Nacional*, CD de población y viviendas. Paraguay. 1997.

[8] Feldman E., Lehner F. A., and Ray T. L.: "Warehouse Locations Under Continuous Economies of Scale", *Management Science*, Vol. 12, Mayo 1966, pp. 670-684.

[9] Glover F., Laguna M., Taillard E., and Werra D. De: *Tabu Search*, special issues of *Annals of Operations*

Research, Vol. 41, No. 1-4. J. C. Baltzer Science Publishers, Basel, Switzerland, 1993.

[10] Kuehn A. A. and Hamburger M. J.: “A Heuristic Program for Locating Warehouses”, *Management Science*, Vol. 9, 1963, pp. 643-666.

[11] Marquardt D. W.: “An Algorithm for Least Squares Estimation of Non-Linear Parameters”, *SIAM Journal*, Vol. II, No. 2, 1963, pp. 431-441.

[12] PLANITU, UIT: *Programas de Planificación de Redes, Vol. 1*, Documentación Básica, Edición Preliminar, Junio 1984. http://www.itu.int.

[7] Robertazzi T. G.: Planning Telecommunication Networks, *IEEE Press*, IEEE Communications Society. 1998.

[14] Zitzler E., Laumanns M., and Thiele L.: SPEA 2: Improving The Strength Pareto Evolutionary Algorithms, *Technical Report 103*, Computer Engineering and Networks Laboratory, Swiss Federal Institute of Technology. Zurich, Switzerland, Mayo 2001.