

**8**

**ANÁLISIS, SIMULACIÓN Y  
RESULTADOS**



## 8.1 INTRODUCCIÓN. CASOS DE ESTUDIO PROPUESTOS

En este capítulo se procede a la aplicación de lo desarrollado principalmente en los tres capítulos anteriores. En el capítulo 5 se ha propuesto un modelo técnico para un sistema SOFC-TG alimentado por gases procedentes de la gasificación de residuos forestales, su aplicación en el modelo técnico, económico y geográfico global se formula y desarrolla en el capítulo 6, y el método propuesto para la resolución mediante el algoritmo PSO para codificación binaria en el capítulo 7.

Mediante numerosos supuestos y simulaciones se aborda el problema de la optimización de plantas de generación con sistemas SOFC-TG que aprovechan la biomasa forestal gasificada como combustible. No obstante, los procedimientos de cálculo desarrollados pueden ser aplicables a cualquier sistema que utilice biomasa residual dispersa sustituyendo el modelo técnico del sistema de generación.

La estructura de este capítulo es análoga a los casos de estudio propuestos que son los siguientes:

- 1) Optimización del tamaño o capacidad de una planta de generación, desde el punto de vista del inversor, utilizando el modelo simplificado desarrollado en el apartado 6.2 del capítulo 6. Se analizan diversos supuestos para distintas densidades de biomasa forestal utilizable.
- 2) Optimización de la capacidad de generación y ubicación de la planta, desde el punto de vista del inversor, para obtener la máxima rentabilidad económica. Para su resolución se utiliza la formulación desarrollada en el apartado 6.3 y el algoritmo PSO binario propuesto en el capítulo 7. Para esta parte se realizan varias simulaciones que se describen a continuación:

- Optimización del tamaño y situación de planta SOFC-TG con el algoritmo PSO. La función objetivo elegida es el Índice de Rentabilidad.
  - Ubicación óptima de planta SOFC-TG con la potencia limitada a 10 MW. El Valor Actual Neto, *VAN*, es la función a maximizar.
  - Ubicación óptima de planta SOFC-TG con la potencia limitada a 5 MW. Al igual que en el caso anterior es el *VAN* la función objetivo elegida.
  - Optimización del tamaño y situación de plantas con distintos sistemas de generación y sin límite de potencia. Estas simulaciones muestran la influencia del tipo de sistema elegido en los resultados obtenidos.
  - Ubicación óptima de distintos sistemas de generación con la potencia limitada a 5 MW. Tanto este apartado como el anterior sirven para establecer comparativas entre los sistemas empleados.
  - Influencia de la dimensión del problema para la optimización del tamaño y ubicación de la planta de generación. La dimensión del problema es sinónimo del número de parcelas de área constante en las que se divide la región de estudio. Se plantean tres casos, en cada uno de ellos la misma región se divide en un número de parcelas diferente. Para ello, la superficie de las parcelas toma un valor distinto en cada caso.
- 3) Análisis y optimización de planta desde el punto de vista de la empresa distribuidora de energía, según lo establecido en el apartado 6.4 del capítulo 6. El tamaño de planta se calcula para minimizar el coste ocasionado por las pérdidas de energía eléctrica en la red de distribución.
- 4) Optimización de la ubicación de una planta de 2 MW desde el punto de vista del inversor y utilizando restricciones técnicas de la red eléctrica. También se

realiza la optimización de la ubicación de una planta de 2 MW desde un punto de vista global para obtener la máxima rentabilidad total, teniendo en cuenta, de forma simultánea, los puntos de vista del inversor y de la compañía distribuidora. Estos últimos estudios se resuelven de acuerdo a lo desarrollado en los apartados 6.3, 6.4 y 6.5 del capítulo 6.

## 8.2 OPTIMIZACIÓN DEL TAMAÑO DE LA PLANTA UTILIZANDO EL MODELO SIMPLIFICADO

En este primer análisis se trata de estudiar la viabilidad económica de la instalación y funcionamiento de una planta de generación, desde el punto de vista del inversor y productor de energía eléctrica, optimizando su tamaño (o potencia eléctrica nominal). Al emplear el método simplificado visto en el capítulo 6 apartado 6.2, la ubicación de la planta no se evalúa.

Los valores de los parámetros que van a considerarse para realizar este primer análisis se detallan en la tabla 8.1 y 8.2. Estos valores se han estimado y/o proceden de [46, 53, 56, 65, 74, 82, 90, 94, 103, 127, 139, 160, 162, 166].

**Tabla 8.1: VALORES ESTÁNDAR CONSIDERADOS**

PARÁMETRO	VALOR
$V_{pc}$ (V)	0,70
$U_f$	0,80
$F$ (MAh/kmol)	0,0268
$R_p$	0,15
$\eta_{conv}$	0,95
$D$ (toneladas / km <sup>2</sup> año biomasa seca)	100-125-75
$U$	0,25
$dm$	1,50
$CRu$ (€ / ton)	40
$CTu$ (€ / ton km)	0,30
$COVu$ (€ / MWh)	10
$COF$ (€/año)	110000

**Tabla 8.1 (Continuación): VALORES ESTÁNDAR CONSIDERADOS**

<b>PARÁMETRO</b>	<b>VALOR</b>
$CMu$	0,03
$T$ (horas/año)	7500
$INu$ (€/MW)	3500000
$INF$ (€)	500000
$V_u$ (años)	15
$p_g$ (€/MWh)	118
$i$	0,06
$d$	0,08
$r_g$	0,04
$r_R$	0,06
$r_T$	0,08
$r_M$	0,04
$r_O$	0,04
$inc$	0,40-0,00

El valor de  $p_g$  es el precio de la energía eléctrica producida, inyectada a la red y, por tanto, vendida a la empresa, actualmente en España es el fijado por el Real Decreto 661/2007 para sistemas que utilizan la biomasa forestal como combustible [116]. El valor indicado de  $inc$  es el fijado actualmente para este tipo de sistemas en Andalucía (España), según la Orden de 11 de abril de 2007 [27].

Para este modelo se considera que las características y propiedades energéticas de los residuos forestales son idénticas en cualquier punto de recogida, es decir, la biomasa que se aprovecha es un solo tipo de residuo. No se va a describir el tipo de residuo ni su composición, sino la composición de los gases que se generan en el proceso de gasificación del residuo y, particularmente, de los gases que intervienen en las reacciones que se producen en el interior de la pila SOFC.

La tabla 8.2 muestra la composición del gas resultante de la gasificación por tonelada de residuo utilizado, así como las cantidades correspondientes de hidrógeno equivalente, el valor de  $R_{gas}$  y el Poder Calorífico Inferior,  $PCI$ .

**Tabla 8.2:** COMPOSICIÓN DEL GAS EN KMOLES POR TONELADA DE RESIDUO [140]

<i>Tipo de Residuo</i>	<i>Composición gases (kmoles/tonelada res.)</i>			<i>Parámetros aplic. kmoles/tonelada res.</i>		<i>PCI en (MWh/tonelada)</i>
	<i>H<sub>2</sub></i>	<i>CO</i>	<i>CH<sub>4</sub></i>	<i>H<sub>2</sub>eq</i>	<i>R<sub>gas</sub></i>	<i>PCI</i>
Residuo A	21	25	6,4	71,6	71,6	4

El valor de  $R_{gas}$  coincide con el de hidrógeno equivalente producido, ya que los valores indicados en la tabla 8.2 se refieren a cantidades por unidad de masa de residuo.

Partiendo de los valores indicados en las tablas 8.1 y 8.2, se van a analizar los siguientes supuestos considerando las variaciones que se indican en cada uno de ellos:

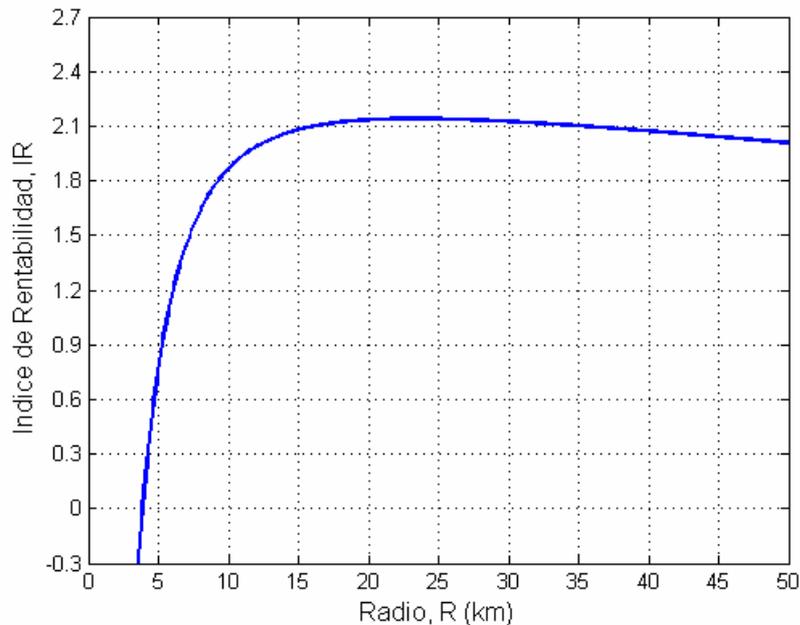
- 1a)  $D = 100$  toneladas / km<sup>2</sup> año de biomasa seca,  $inc = 0,40$ .
- 1b)  $D = 100$  toneladas / km<sup>2</sup> año de biomasa seca,  $inc = 0,00$ .
  
- 2a)  $D = 125$  toneladas / km<sup>2</sup> año de biomasa seca,  $inc = 0,40$ .
- 2b)  $D = 125$  toneladas / km<sup>2</sup> año de biomasa seca,  $inc = 0,00$ .
  
- 3a)  $D = 75$  toneladas / km<sup>2</sup> año de biomasa seca,  $inc = 0,40$ .
- 3b)  $D = 75$  toneladas / km<sup>2</sup> año de biomasa seca,  $inc = 0,00$ .
  
- 4)  $D = 100$  toneladas / km<sup>2</sup> año con  $p_g = 70$  €/MWh, precio de venta de la energía eléctrica producida, para sistemas que aprovechan la biomasa forestal, con la anterior normativa reguladora en España, Real Decreto 436/2004 [115].

### 8.2.1 Supuesto 1a) ( $D = 100$ toneladas/km<sup>2</sup>; $inc = 0,40$ )

La figura 8.1 muestra el Índice de Rentabilidad,  $IR$ , en función del Radio,  $R$ , con los parámetros indicados para este supuesto. El proyecto de inversión comienza a ser viable para  $R > 4$  km, es decir, cuando  $IR$  es mayor que cero. El radio que maximiza  $IR$  es 23,30 km,  $IR$  toma el valor de 2,14, la potencia eléctrica nominal,  $P_e$ , es de 13,64 MW y el valor actual neto,  $VAN$ , 54.620.000 €.

Para  $R = 10$  km la potencia eléctrica de generación es 2,51 MW.  $IR$  alcanza el valor de 1,87, y el  $VAN$  es de 9.169.000 €. Un radio de 10 km supone una superficie de producción (de donde se recogen los residuos forestales) de 314,16 km<sup>2</sup> (31.416 Ha). Deben de realizarse trabajos forestales en el área elegida para garantizar una densidad de biomasa  $D = 100$  toneladas / km<sup>2</sup>, es decir, una producción anual de 31.416 toneladas.

El período de retorno es de 5 años. Las figuras 8.2 y 8.3 representan  $IR$  y el  $VAN$  en función de  $P_e$  y  $R$ , respectivamente.



**Figura 8.1:** Índice de Rentabilidad en función del Radio.

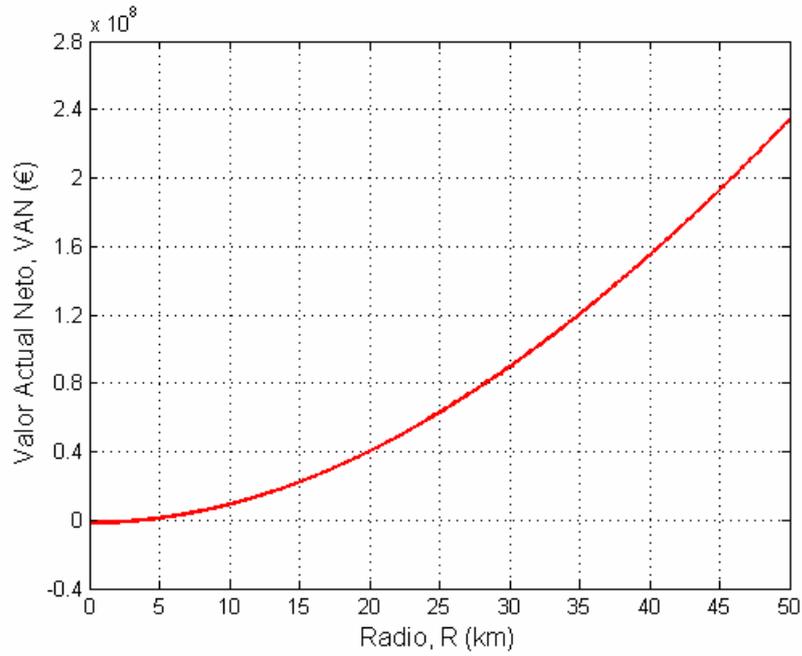


Figura 8.2: Valor Actual Neto en función del Radio.

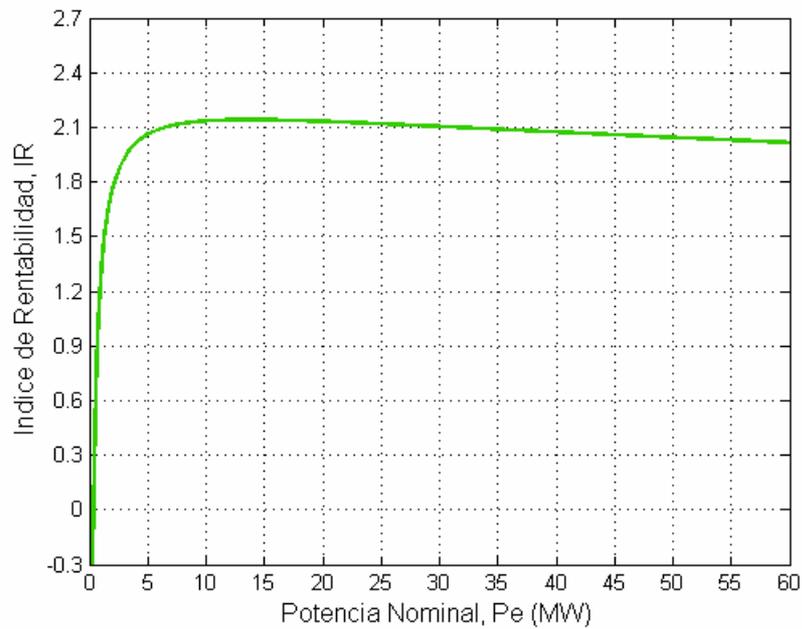


Figura 8.3: Índice de Rentabilidad en función de la Potencia Nominal.

### 8.2.2 Supuesto 1b) (D = 100 toneladas/km<sup>2</sup>; inc = 0,00)

En este caso,  $IR$  es mayor que cero para  $R > 5$  km. El radio óptimo sigue siendo de 23,30 km pero para un  $IR$  de 0,8843, con  $P_e$  igual a 13,64 MW y el  $VAN$  de 37.610.000 €.

Para  $R = 10$  km la potencia eléctrica de generación es 2,51 MW.  $IR$  alcanza el valor de 0,72, y el  $VAN$  es de 5.891.000 €.

El período de retorno es en este supuesto de 8 años.

Las figuras 8.4, 8.5 y 8.6 representan  $IR$ , el  $VAN$  e  $IR$  en función de  $R$ ,  $R$  y  $P_e$ , respectivamente.

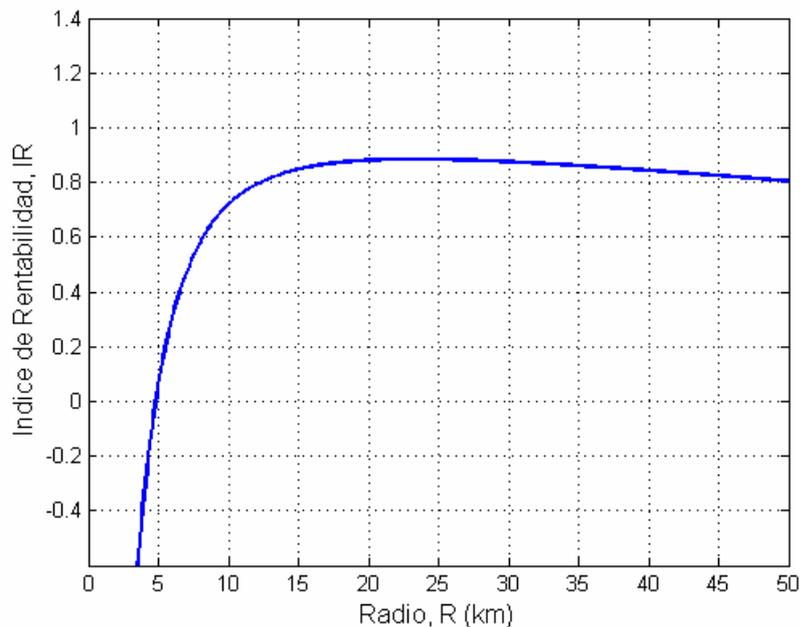


Figura 8.4: Índice de Rentabilidad en función del Radio, supuesto 1b).

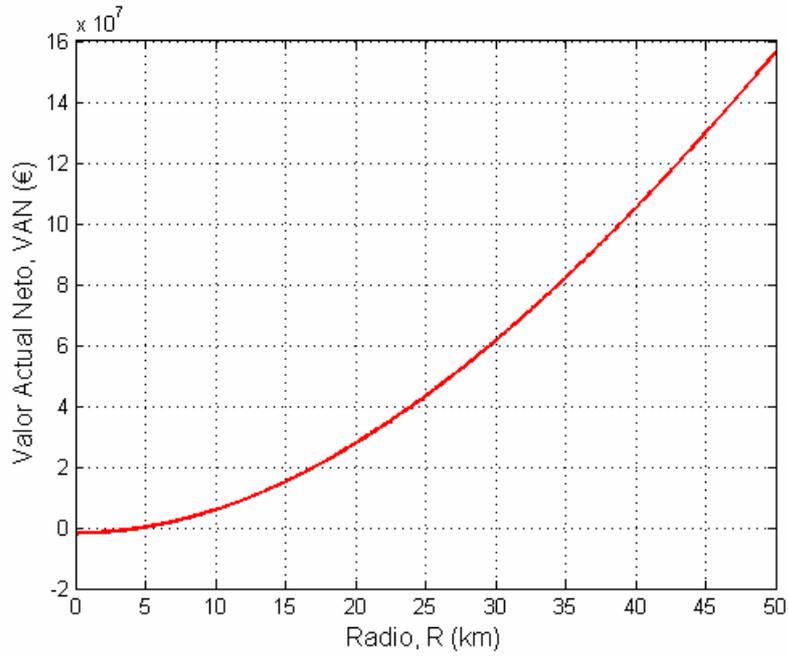


Figura 8.5: Valor Actual Neto en función del Radio (supuesto 1b).

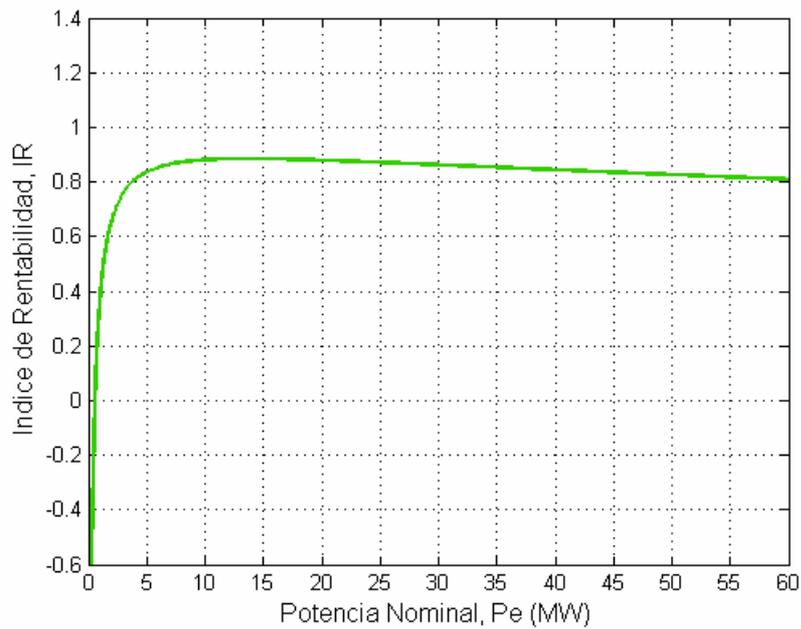


Figura 8.6: Índice de Rentabilidad en función de la Potencia Nominal (supuesto 1b).

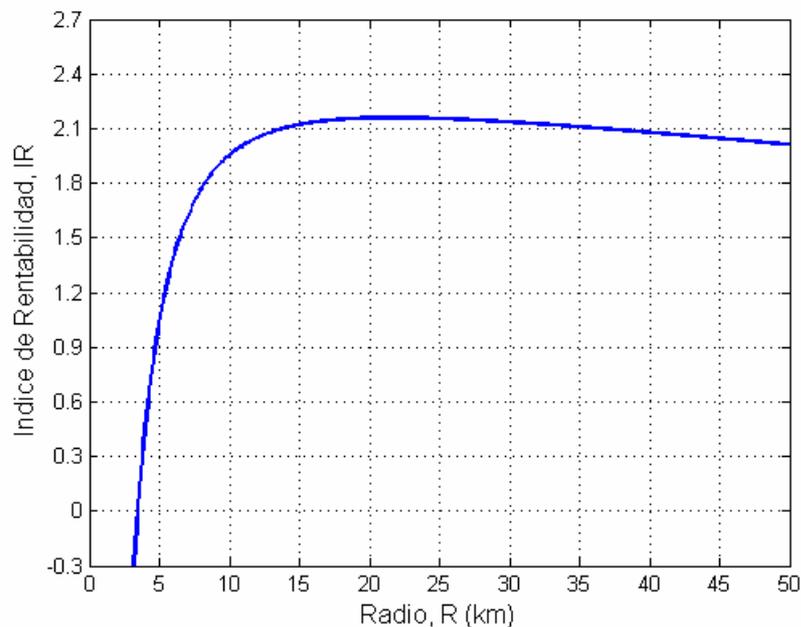
### 8.2.3 Supuesto 2a) ( $D = 125$ toneladas/km<sup>2</sup>; $inc = 0,40$ )

En este supuesto  $IR > 0$  para  $R > 3,50$  km. El radio que optimiza el Índice de Rentabilidad es 21,60 km,  $IR$  toma el valor de 2,16,  $P_e$  es igual a 14,66 MW y el valor actual neto,  $VAN$ , alcanza los 59.150.000 €.

Para  $R = 10$  km, la potencia eléctrica de generación es 3,14 MW,  $IR = 1,87$ , y el  $VAN$  es de 11.880.000 €.

La inversión se recupera en unos 5 años.

La figura 8.7 muestra la evolución del Índice de Rentabilidad en función del Radio:



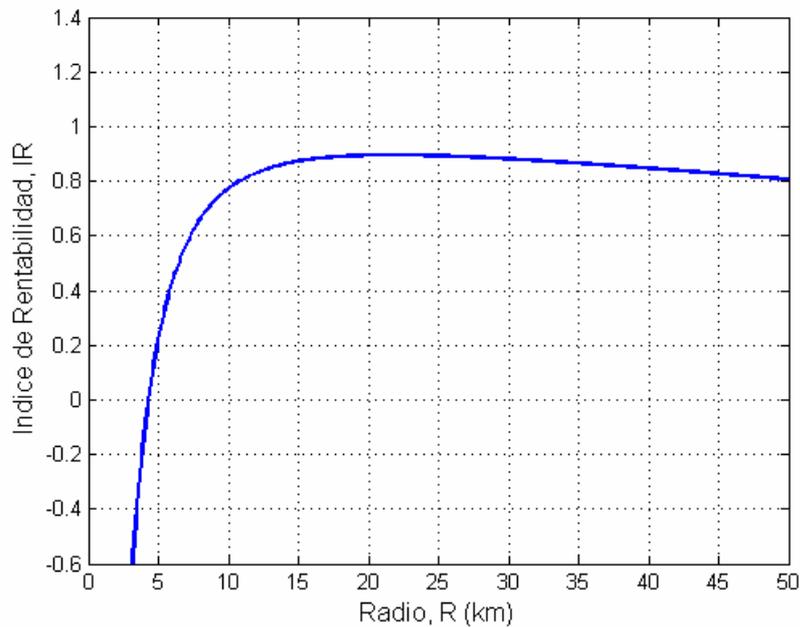
**Figura 8.7:** Índice de Rentabilidad representado en función del Radio (supuesto 2a).

### 8.2.4 Supuesto 2b) ( $D = 125$ toneladas/km<sup>2</sup>; $inc = 0,00$ )

En la figura 8.8 se representa el Índice de Rentabilidad en función del Radio considerando los valores correspondientes a este supuesto.  $IR$  es mayor que cero, y por tanto, el proyecto es viable, para  $R > 4.50$  km. El radio óptimo sigue siendo de 21,60 km, el  $IR$  máximo es de 0,90, con  $P_e = 14,66$  MW y el  $VAN$  es igual 40.890.000 €.

Para  $R = 10$  km,  $P_e = 2,51$  MW,  $IR = 1,87$ , y  $VAN = 7.826.000$  €. Evidentemente, los valores son superiores a los obtenidos en el supuesto 1b), ya que, a igualdad de superficie de producción se recogen más residuos con menos costes.

El período de retorno es en este supuesto de 8 años.



**Figura 8.8:** Índice de Rentabilidad en función del Radio (supuesto 2b).

### 8.2.5 Supuesto 3a) ( $D = 75$ toneladas/km<sup>2</sup>; $inc = 0,40$ )

El Índice de Rentabilidad evoluciona con respecto al Radio como se muestra en la figura 8.9, para una  $D = 75$  toneladas/km<sup>2</sup>. La viabilidad del proyecto se aprecia a partir de  $R > 4,50$  km. El  $IR$  máximo es de 2,11 y se obtiene con  $R = 25,60$  km. Para este radio  $P_e$  toma el valor de 13,64 MW y el  $VAN$  asciende a 48.890.000 €.

La potencia nominal de generación es de 1,89 MW para  $R = 10$  km,  $IR$  es igual a 1,72, y el  $VAN$  es 6.459.000 €.

El período de retorno de la inversión es de 5 años.

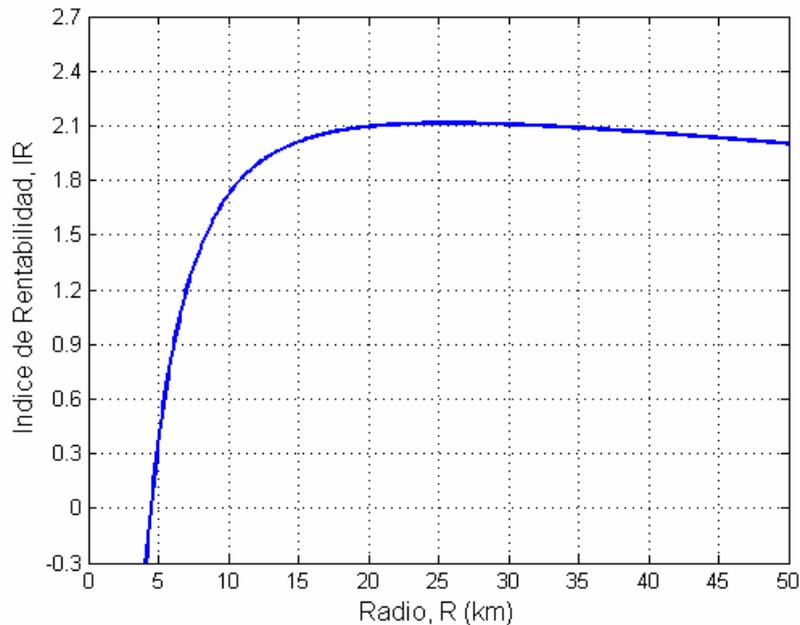


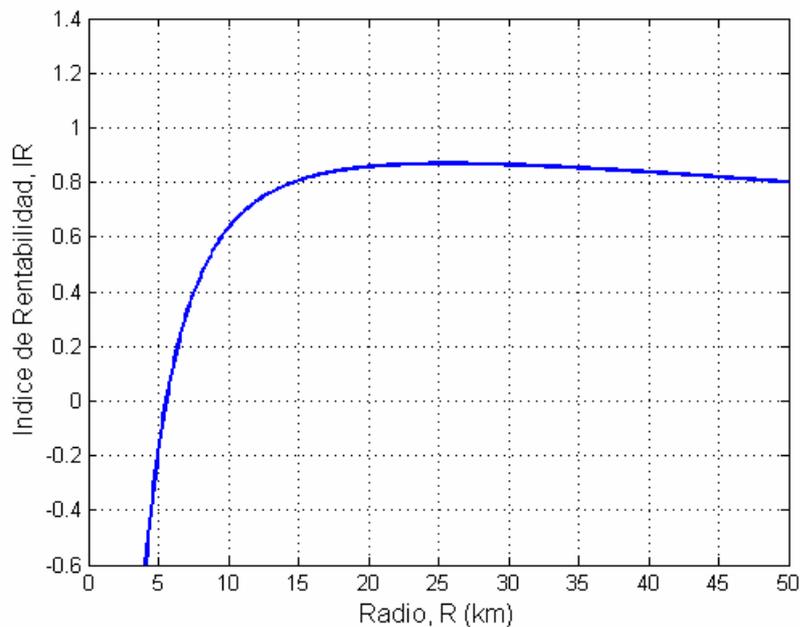
Figura 8.9: Índice de Rentabilidad en función del Radio (supuesto 3a).

### 8.2.6 Supuesto 3b) ( $D = 75$ toneladas/km<sup>2</sup>; $inc = 0,00$ )

En este caso,  $IR$  es mayor que cero para  $R > 5$  km. El radio óptimo es el mismo que en 3a), 25,60 km, pero con un  $IR$  de 0,87, con  $P_e$  igual a 12,35 MW y el  $VAN$  de 33.470.000 €. El período de retorno es de 8 años.

Para  $R = 10$  km,  $P_e = 1,89$  MW.  $IR$  alcanza el valor de 0,63, y el  $VAN$  es igual a 3.957.000 €. Para este radio, y en este supuesto se alcanza el período de retorno más alto de todos los casos analizados, 9 años.

La figura 8.10 representa la evolución de  $IR$  en función de  $R$ .



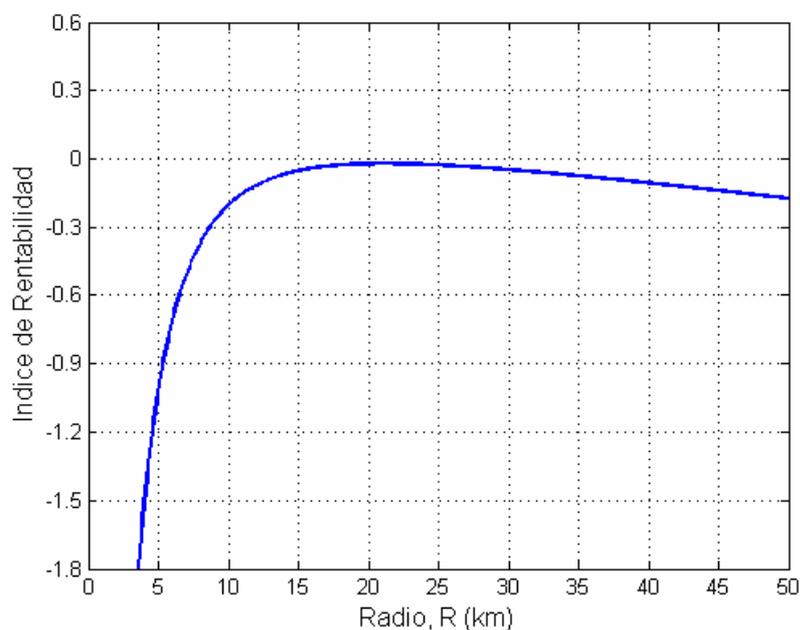
**Figura 8.10:** Índice de Rentabilidad en función del Radio (supuesto 3b).

### 8.2.7 Supuesto 4)

$D = 100$  toneladas/km<sup>2</sup>año con  $p_g = 70$  €/MWh (según RD 436/2004).

Este supuesto sirve para manifestar la necesidad que había de aumentar las primas establecidas anteriormente en el Real Decreto 436/2004 [115] que hacían prácticamente inviables todos los sistemas de generación eléctrica con biomasa, y especialmente, los que utilizaban residuos agrícolas o forestales.

En la figuras 8.11 se observa que el proyecto no es viable para  $inc=0,40$ . Cuando el incentivo a la inversión es del 50 % ( $inc=0,50$ ) se obtiene una reducida viabilidad positiva, tal y como se ve en la figura 8.12.



**Figura 8.11:** IR en función de R (supuesto 4 e incentivos del 40 %).

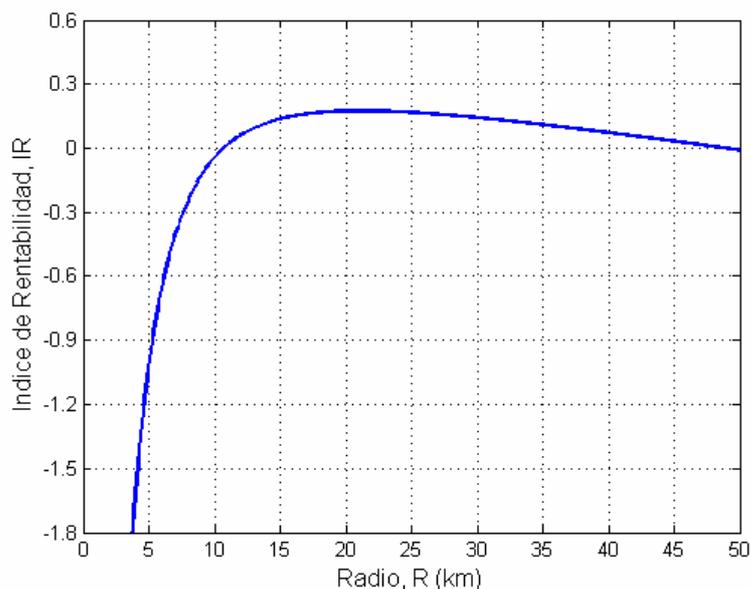


Figura 8.12: IR en función de R (supuesto 4 e incentivos del 50 %).

## 8.2.8 Observaciones y conclusiones

A continuación se realizan una serie conclusiones que se obtienen mediante la observación de los resultados y gráficas anteriores:

- Para un sistema SOFC-TG la óptima potencia de generación estaría comprendida entre 10 y 15 MW, con un radio de acción de entre 20 y 25 km y áreas de recogida de biomasa de entre 1250 y 2000 km<sup>2</sup>. Los proyectos empiezan a ser viables cuando el radio de acción supera los 5 km y la potencia de generación de 1 MW.
- Las primas que se contemplan actualmente en la legislación española, Real Decreto 661/2007, para la producción de energía en régimen especial, son imprescindibles para la decisión de invertir en una planta de generación que utiliza como combustible la biomasa. En los supuestos planteados, el IR está por encima de 2,0 en inversiones que con incentivos (40 %) y en poco menos de 0,9 cuando no se reciben incentivos.

- Con la anterior normativa, Real Decreto 436/2007, los proyectos de aprovechamiento de la biomasa residual dispersa (agrícola o forestal) eran prácticamente inviables. Para obtener alguna rentabilidad se requería una elevada suma de incentivos a la inversión y condiciones técnicas y económicas muy favorables.

### **8.3 OPTIMIZACIÓN DE UNA PLANTA SOFC-TG APLICANDO EL ALGORITMO PSO BINARIO**

La descripción del problema se realiza en el apartado 6.3 del capítulo 6. Se pretende ubicar y dimensionar una planta SOFC-TG que aprovecha los residuos forestales como combustible. Para ello, se parte de una región de  $Q$  parcelas de una determinada superficie y cuya vegetación predominante es la forestal. En este mapa se debe de situar la planta y seleccionar las  $K$  parcelas que optimizan tanto el tamaño como la ubicación. Las parcelas presentan entre ellas características diferentes.

Las variables que definen cada parcela se obtienen de bases de datos o sistemas de Información Geográfica (SIG). Son las siguientes:

- $S_i$ : Superficie de la parcela  $i$  [ $km^2$ ].
- $U_i$ : Coeficiente de utilización de la parcela  $i$ . Se aplica a la biomasa potencial para obtener la biomasa utilizable.
- $D_i$ : Densidad neta de biomasa utilizable que se recoge de la parcela  $i$  [ $toneladas/(km^2 año)$ ].
- $PCI_i$ : Poder Calorífico Inferior de la biomasa obtenida en la parcela  $i$  [ $MWh/tonelada$ ].

- $L_{LE}$ : Longitud de la línea eléctrica a construir para conectar la planta de generación con la red de distribución [km].
- $dist(p,i)$ : Distancia entre la parcela  $i$  y la parcela  $p$  [km].
- $CRu_i$ : Coste unitario de recogida de la biomasa en la parcela  $i$  [€/tonelada].
- $R_{gas,i}$ : Cantidad de kilo-moles de gas combustible (hidrógeno equivalente) que se produce con una tonelada de residuo procedente de la parcela  $i$  [kmoles/tonelada]. Esta variable depende directamente del tipo y composición del residuo existente en la parcela  $i$ .

El algoritmo PSO que se va emplear, se propone y desarrolla en el capítulo 7. Para su aplicación se deben de definir:

- El número de partículas que forman la nube,  $P$ .
- El número de bits de cada partícula,  $N$ .
- El número de iteraciones que debe ejecutarse el algoritmo,  $t_{max}$ .
- Probabilidad inercial máxima y mínima.

### 8.3.1 Datos de partida. Región 1

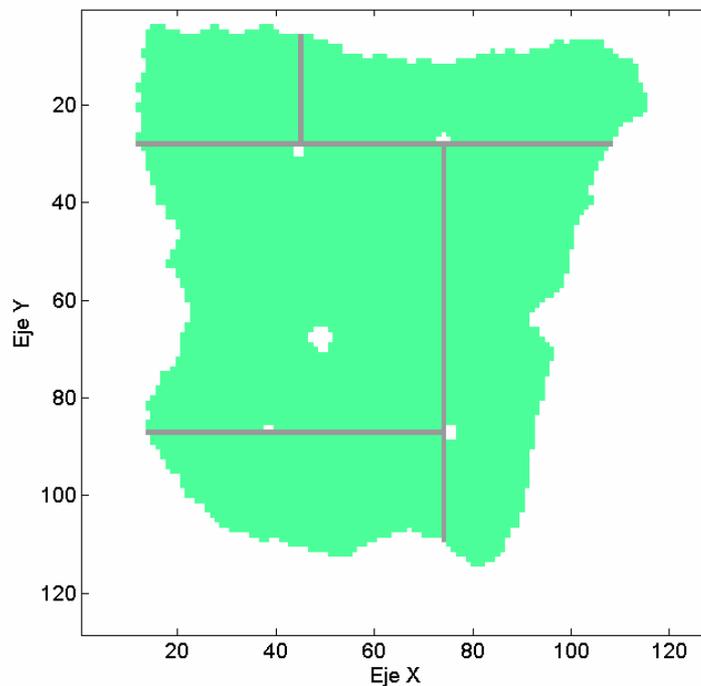
Para la aplicación del método propuesto, se parte de una región integrada en una rejilla de  $128 \times 128 = 16384$  celdas. La región está dividida en 8394 parcelas, cada parcela equivale a una celda de la rejilla. La superficie total de la región es de 16788 km<sup>2</sup> y la superficie de cada parcela,  $S_i$ , es constante y toma el valor de 2 km<sup>2</sup>. Las variables  $U_i$ ,  $D_i$ ,  $PCI_i$ ,  $R_{gas,i}$ ,  $L_{LE}$ ,  $dist(p,i)$  y  $CRu_i$  adoptan diferentes valores para cada una de las parcelas.

La región y las características de cada parcela no se corresponden con ningún caso real. Las figuras que se presentan a continuación (figuras 8.13, 8.14, 8.15, 8.16,

8.17 y 8.18) dejan entrever que la resolución del problema es bastante compleja y no da lugar a la intuición de la mejor solución por simple observación, debido al gran número de factores que intervienen. Además, el mapa presenta una gran variabilidad geográfica de los parámetros pero con valores muy parejos que dan lugar a numerosos máximos locales. Por ello, existen varias posibles soluciones que ofrecen resultados muy similares y que dificultan, más si cabe, la búsqueda de la mejor solución con técnicas metaheurísticas.

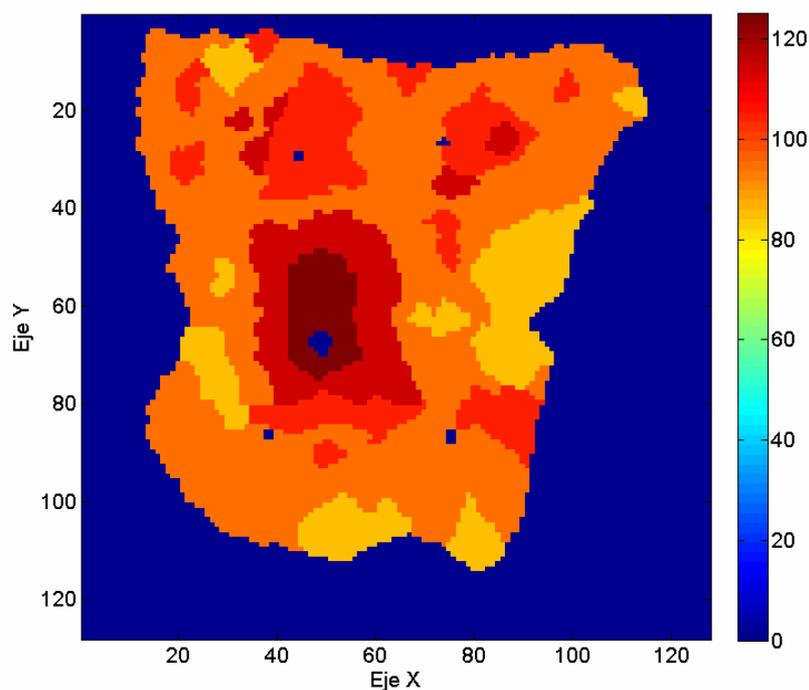
La posición de cada parcela viene dada en función de los componentes X e Y. La situación y sentido de los ejes X e Y son los mismos en todas las figuras. El criterio utilizado es que la parcela (1, 1) se corresponde con la situada en el extremo superior izquierdo.

La figura 8.13 presenta la región 1, así como las líneas eléctricas disponibles para la conexión de la planta de generación.



**Figura 8.13:** Región 1 con líneas eléctricas.

Asimismo, la figura 8.14 muestra la cantidad media de residuos forestales por unidad de superficie que se producen cada año. El mapa refleja los valores que toma  $D_i$  en cada una de las parcelas.



**Figura 8.14:** Región 1 - Potencial de residuos forestales (toneladas de biomasa seca / km<sup>2</sup> año).

El potencial energético de la biomasa disponible medido en MWh/año se representa en la figura 8.15 en función de  $S_i$ ,  $D_i$  y  $PCI_i$ . La figura 8.16 muestra el potencial energético de la biomasa utilizable, en este caso, los parámetros que intervienen son  $S_i$ ,  $D_i$ ,  $PCI_i$  y  $U_i$ .

Posteriormente, en la figura 8.17 se representa el valor del coste de recogida de la biomasa,  $CRu_i$ . Y en la figura 8.18 se muestra la distribución del tipo de residuo generado y aprovechable en la región considerada.

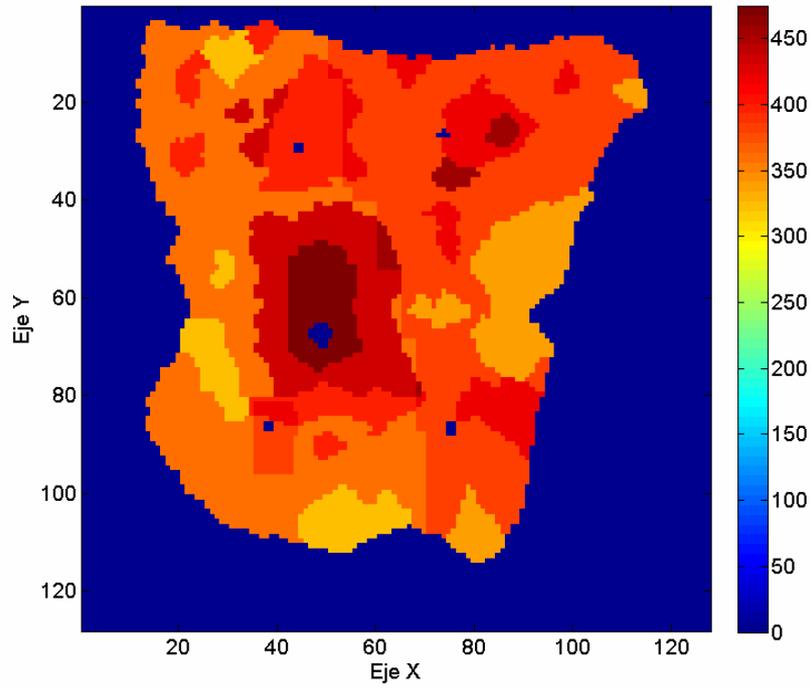


Figura 8.15: Región 1 - Potencial energético de la biomasa disponible (MWh / año)

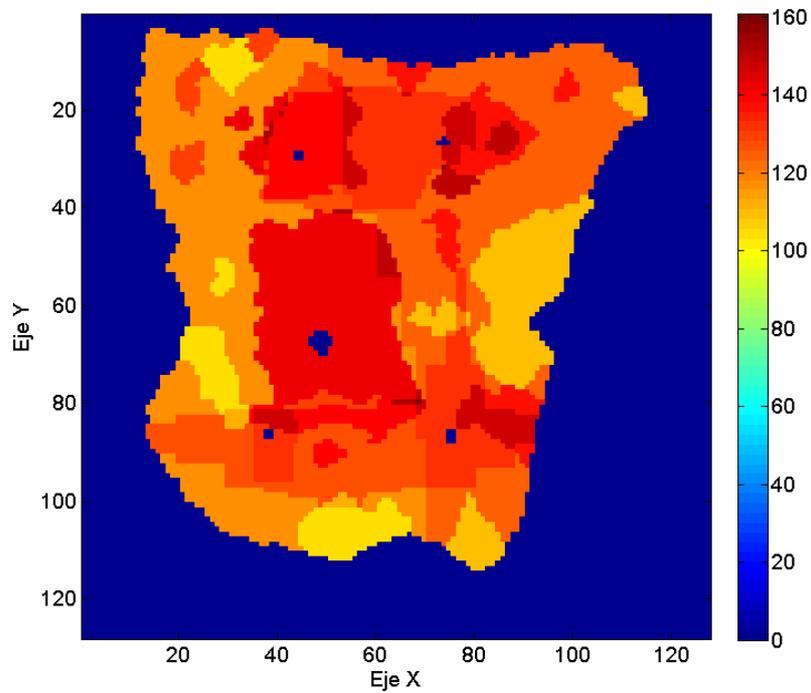


Figura 8.16: Región 1 - Potencial energético de la biomasa utilizable (MWh / año)

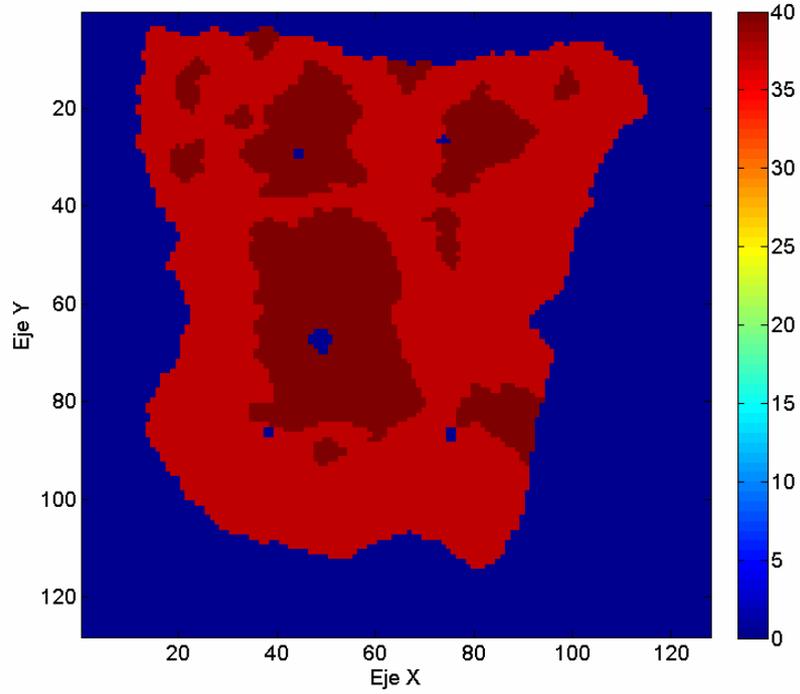


Figura 8.17: Región 1 - Coste de recogida de la biomasa (€/tonelada).

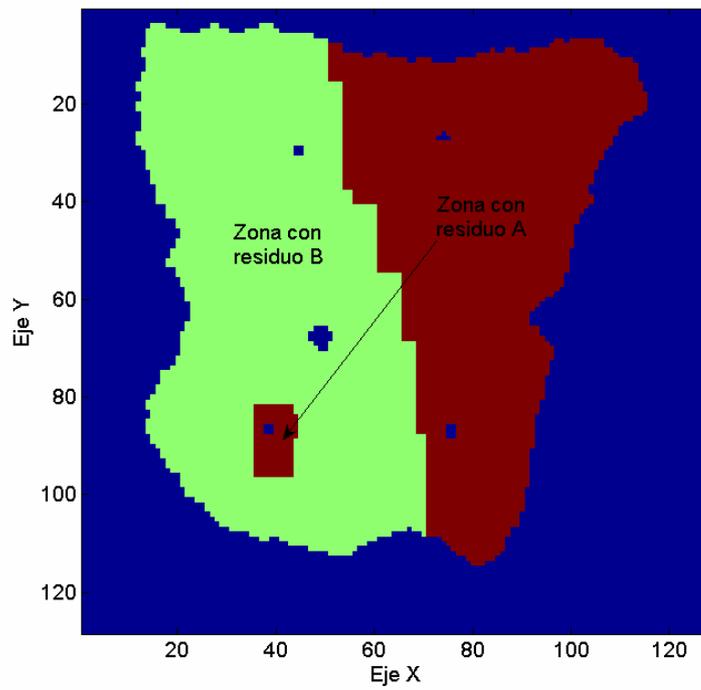


Figura 8.18: Región 1 – Distribución del tipo de residuos generados en la región.

Los tipos de residuos que se presentan en la figura 8.18 se definen por la composición de los gases que se generan en su gasificación que es dependiente de la composición y de las propiedades energéticas del residuo. La tabla 8.3 muestra la composición del gas resultante de la gasificación por tonelada de residuo utilizado, así como las cantidades correspondientes de hidrógeno equivalente y el valor de  $R_{gas,i}$ .

**Tabla 8.3:** COMPOSICIÓN DEL GAS EN KMOLES POR TONELADA DE RESIDUO [140]

<i>Tipo de Residuo</i>	<i>Composición gases (kmoles/tonelada res.)</i>			<i>Parámetros aplic. kmoles/tonelada res.</i>		<i>PCI en (MWh/tonelada)</i>
	$H_2$	$CO$	$CH_4$	$H_2eq$	$R_{gas,i}$	$PCI_i$
Residuo A	21	25	6,4	71,6	71,6	4
Residuo B	20	24	6	68	68	3,8

Además de los datos característicos de cada parcela que permiten representar con varias figuras la región considerada, para la optimización del problema, se necesitan otra serie de parámetros que son independientes de las parcelas elegidas. Estos parámetros se especifican en la tabla 8.4 [46, 53, 56, 65, 74, 82, 90, 94, 103, 127, 139, 160, 162, 166]:

**Tabla 8.4:** VALORES ESTÁNDAR INDEPENDIENTES DE LAS PARCELAS ELEGIDAS

PARÁMETRO	VALOR	PARÁMETRO	VALOR
$V_{pc}$ (V)	0,70	$C_L$ (€ / km)	30000
$U_f$	0,80	$V_u$ (años)	15
$F$ (MAh/kmol)	0,0268	$p_g$ (€/MWh)	118
$R_p$	0,15	$i$	0,06
$\eta_{conv}$	0,95	$d$	0,08
$CTu$ (€/ ton km)	0,30	$r_g$	0,04
$COV_u$ (€ / MWh)	10	$r_R$	0,06
$COF$ (€/año)	110000	$r_T$	0,08
$CMu$	0,03	$r_M$	0,04
$T$ (horas/año)	7500	$r_O$	0,04
$INu$ (€/MW)	3500000	$inc$	0,40
$INF$ (€)	500000		

En cuanto a los parámetros de funcionamiento que necesita el algoritmo PSO propuesto se adoptan los siguientes:

- El número de partículas,  $P$ , que componen la nube está comprendido entre 30 y 50.
- El número de iteraciones,  $t_{max}$ , se establece en 60.
- La probabilidad inicial es 0,5 y la probabilidad final se toma 0,001.

Algunas de las simulaciones que se van a llevar a cabo se van a realizar utilizando el algoritmo genético descrito en el apéndice II, con el objeto de contrastar los resultados y establecer comparativas entre métodos. En este caso, los parámetros necesarios para el funcionamiento del algoritmo genético, AG, son:

- El número de partículas,  $P$ , que componen la población está comprendido entre 30 y 50.
- El número de iteraciones,  $t_{max}$ , se establece en 60.
- El índice de selección,  $IS$ , es igual a 0,8.
- La probabilidad de mutación inicial se fija en 0,1 y la final en 0,001.

Los valores de estos parámetros, necesarios para el funcionamiento de los algoritmos, se han elegido después de realizar varias pruebas previas a las simulaciones que se van a suceder en este capítulo.

### **8.3.2 Optimización del tamaño y situación de planta SOFC-TG en región 1**

En esta primera simulación se pretende determinar tanto el tamaño, como la ubicación óptima que maximizan la rentabilidad de la inversión. El Índice de Rentabilidad,  $IR$ , es la función objetivo escogida.

Para la codificación de la partícula se recurre a lo establecido en el apartado 7.4 del capítulo 7. La posición de la partícula tiene tres componentes: coordenada X, coordenada Y, y la apotema de la región cuadrada que determina la superficie de suministro de biomasa. El número total de bits que se utiliza para la codificación en binario de cada partícula viene determinado por la ecuación 7.1, por tanto:

$$N = \log_2 128 + \log_2 128 + \log_2 64$$

$$N = 7 + 7 + 6 = 20 \text{ bits}$$

En este primer caso se va a calcular la solución mediante la aplicación de tres algoritmos:

- 1) El algoritmo PSO propuesto en el capítulo 7.
- 2) El algoritmo PSO para codificación binaria de Afshinmanesh [2] que es en el que se basa nuestra propuesta.
- 3) Una versión conocida de algoritmos genéticos que nos sirva de referencia y de comparativa para los resultados obtenidos.

Cada método se ejecuta 10 veces con el objeto de alcanzar un mínimo de rigor estadístico en los resultados y poder analizar la robustez, eficacia y eficiencia de cada algoritmo.

### **8.3.2.1 Optimización del tamaño y ubicación de la planta utilizando el algoritmo PSO propuesto (SIM01)**

Para esta primera simulación ( $P = 30$  y  $t_{max} = 60$ ), denominada SIM01, y después de realizar 10 ejecuciones, los resultados obtenidos se describen en la tabla 8.5. En la tabla 8.6 se indica la mejor solución encontrada que es la misma para todas las ejecuciones y en la tabla 8.7 se muestra el valor medio de la función objetivo ( $IR$ ), el valor máximo y la desviación típica o estándar.

Tabla 8.5: RESULTADOS SIMULACIÓN SIM01

Nº	IR	VAN (10 <sup>6</sup> €)	UBICACIÓN	AREA (km <sup>2</sup> )	P <sub>e</sub> (MW)
1	2,21	55,79	(66, 28)	1242,00	13,47
2	2,21	55,79	(66, 28)	1242,00	13,47
3	2,21	55,79	(66, 28)	1242,00	13,47
4	2,21	55,79	(66, 28)	1242,00	13,47
5	2,21	55,79	(66, 28)	1242,00	13,47
6	2,21	55,79	(66, 28)	1242,00	13,47
7	2,21	55,79	(66, 28)	1242,00	13,47
8	2,21	55,79	(66, 28)	1242,00	13,47
9	2,21	55,79	(66, 28)	1242,00	13,47
10	2,21	55,79	(66, 28)	1242,00	13,47

Tabla 8.6: MEJOR RESULTADO SIMULACIÓN SIM01

VARIABLE	VALOR
<i>SITUACIÓN DELA PLANTA</i>	(66, 28)
<i>SUPERFICIE RECOGIDA BIOMASA (km<sup>2</sup>)</i>	1242,00
<i>INDICE DE RENTABILIDAD, IR</i>	2,21
<i>VALOR ACTUAL NETO, VAN (10<sup>6</sup> € = M€)</i>	55,79
<i>POTENCIA ELECTRICA, P<sub>e</sub> (MW)</i>	13,57

Tabla 8.7: ESTADÍSTICAS SIMULACIÓN SIM01

VARIABLE	VALOR
<i>MEDIA</i>	2,21
<i>SOLUCIÓN ÓPTIMA</i>	2,21
<i>DESVIACIÓN TÍPICA</i>	0,0000

Los resultados obtenidos guardan bastante similitud con los cálculos realizados con el método simplificado aplicado en el apartado 8.2.

En esta simulación la robustez del algoritmo es total, ya que las soluciones obtenidas coinciden en las 10 ejecuciones. La situación de la planta y la superficie de extracción de los residuos forestales se representan en la figura 8.19. La evolución media de las 10 ejecuciones de la función objetivo, *IR*, en función del número de iteraciones realizadas se representa en la figura 8.20. Se observa que se alcanza el valor máximo en aproximadamente 30 iteraciones.

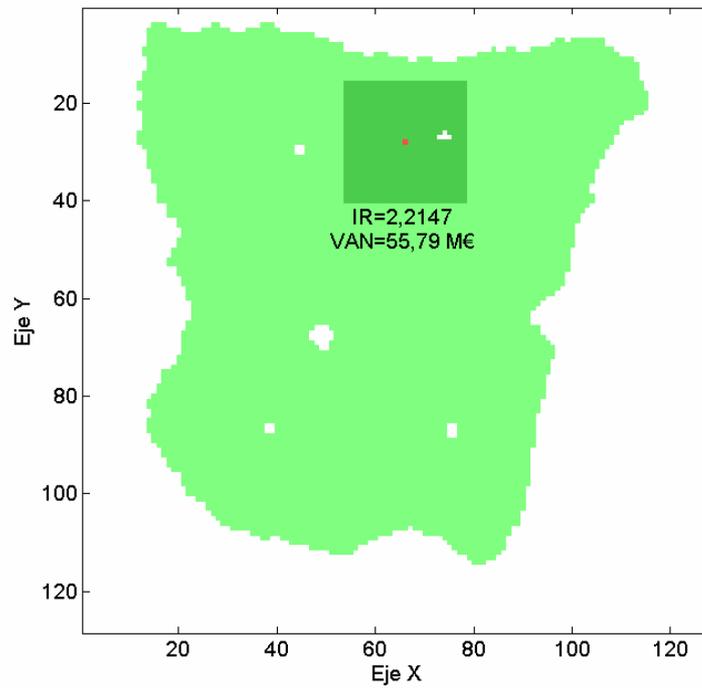


Figura 8.19: SIM01 - Ubicación de planta y área de extracción de biomasa óptima.

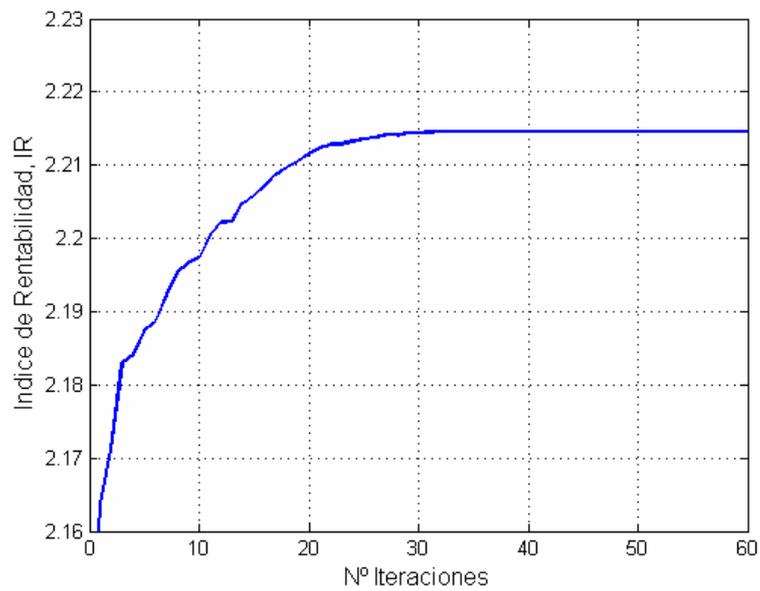


Figura 8.20: SIM01 - Evolución del Índice de Rentabilidad en función del número de iteraciones.

### 8.3.2.2 Optimización del tamaño y ubicación de la planta utilizando el algoritmo PSO versión de Afshinmanesh (SIM02)

En esta simulación se utiliza el algoritmo PSO versión de Afshinmanesh detallado en el apartado 3.5.3 del capítulo 3 ( $P = 30$  y  $t_{max} = 60$ ). Tras realizar 10 ejecuciones se obtiene los resultados que se describen en las tablas 8.8, 8.9 y 8.10:

**Tabla 8.8:** RESULTADOS SIMULACIÓN SIM02

Nº	IR	VAN ( $10^6$ €)	UBICACIÓN	AREA ( $km^2$ )	$P_e$ (MW)
1	2,20	63,98	(74, 30)	1450,00	15,54
2	2,21	55,79	(66, 28)	1242,00	13,47
3	2,19	60,18	(77, 44)	1458,00	14,65
4	2,18	64,65	(80, 53)	1654,00	15,77
5	2,20	55,23	(73, 28)	1242,00	13,40
6	2,20	63,71	(72, 32)	1450,00	15,49
7	2,21	55,79	(66, 28)	1242,00	13,47
8	2,19	52,69	(73, 45)	1250,00	12,82
9	2,20	62,07	(74, 41)	1458,00	15,10
10	2,20	63,55	(74, 33)	1450,00	15,45

**Tabla 8.9:** MEJOR RESULTADO SIMULACIÓN SIM02

VARIABLE	VALOR
SITUACIÓN DELA PLANTA	(66, 28)
SUPERFICIE RECOGIDA BIOMASA ( $km^2$ )	1242,00
INDICE DE RENTABILIDAD, IR	2,21
VALOR ACTUAL NETO, VAN ( $10^6$ € = M€)	55,79
POTENCIA ELECTRICA, $P_e$ (MW)	13,57

**Tabla 8.10:** ESTADÍSTICAS SIMULACIÓN SIM02

VARIABLE	VALOR
MEDIA	2,20
SOLUCIÓN ÓPTIMA	2,21
DESVIACIÓN TÍPICA	0,0094

En este caso, se observa que el nivel de robustez del algoritmo es bajo, no por los resultados de la función objetivo que son muy parecidos, sino por las ubicaciones que guardan cierta similitud pero no coinciden en ninguna ejecución. No obstante, la

convergencia media a la mejor solución que se obtiene se alcanza en pocas iteraciones, aproximadamente en 20. En la figura 8.21 se representa la evolución media de  $IR$ :

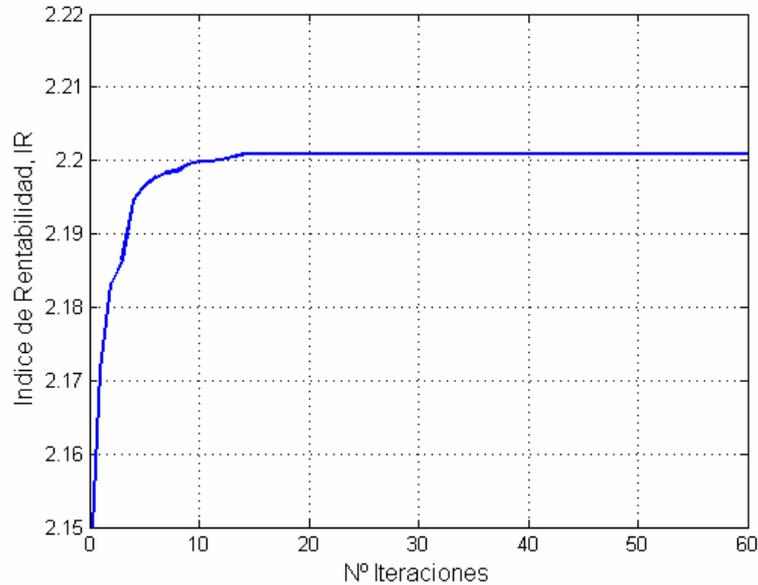


Figura 8.21: SIM02 - Evolución del Índice de Rentabilidad en función del número de iteraciones.

### 8.3.2.3 Optimización del tamaño y ubicación de la planta utilizando algoritmos genéticos, AG (SIM03)

En esta simulación se utiliza la versión de algoritmos genéticos, AG, que se describe en el apéndice II. Se eligen  $P = 36$  y  $t_{max} = 60$ . De nuevo se efectúan 10 ejecuciones y los resultados obtenidos se describen en las tablas 8.11, 8.12 y 8.13:

Tabla 8.11: RESULTADOS SIMULACIÓN SIM03

Nº	IR	VAN (10 <sup>6</sup> €)	UBICACIÓN	AREA (km <sup>2</sup> )	P <sub>e</sub> (MW)
1	2,20	63,99	(73, 29)	1450,00	15,55
2	2,20	62,47	(74, 38)	1450,00	15,20
3	2,20	62,96	(74, 36)	1450,00	15,31
4	2,21	55,52	(69, 28)	1242,00	13,41
5	2,20	73,24	(75, 28)	1674,00	17,84
6	2,19	54,32	(68, 23)	1228,00	13,19
7	2,21	55,44	(67, 30)	1242,00	13,42
8	2,20	63,55	(74, 33)	1450,00	15,45
9	2,21	47,07	(63, 28)	1052,00	11,36
10	2,21	47,07	(63, 28)	1052,00	11,36

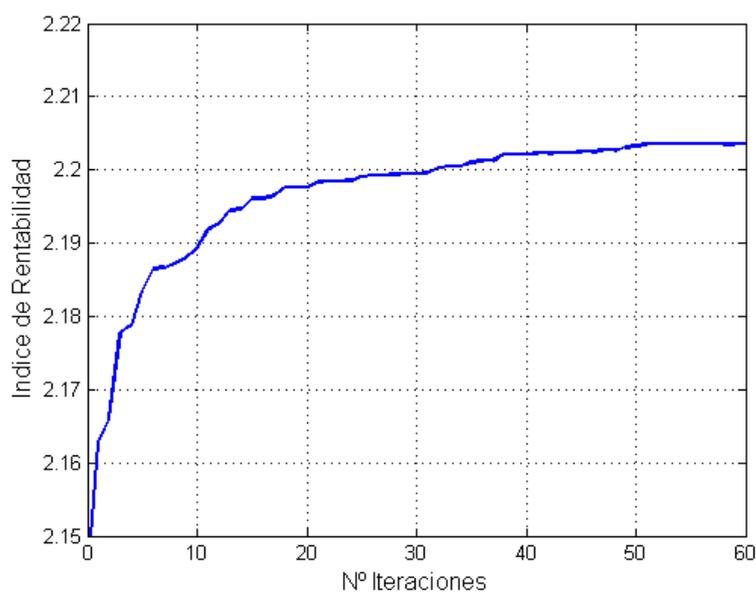
**Tabla 8.12:** MEJOR RESULTADO SIMULACIÓN SIM03

VARIABLE	VALOR
<i>SITUACIÓN DELA PLANTA</i>	(69, 28)
<i>SUPERFICIE RECOGIDA BIOMASA (km<sup>2</sup>)</i>	1242,00
<i>INDICE DE RENTABILIDAD, IR</i>	2,21
<i>VALOR ACTUAL NETO, VAN (10<sup>6</sup> € = M€)</i>	55,52
<i>POTENCIA ELECTRICA, P<sub>e</sub> (MW)</i>	13,41

**Tabla 8.13:** ESTADÍSTICAS SIMULACIÓN SIM03

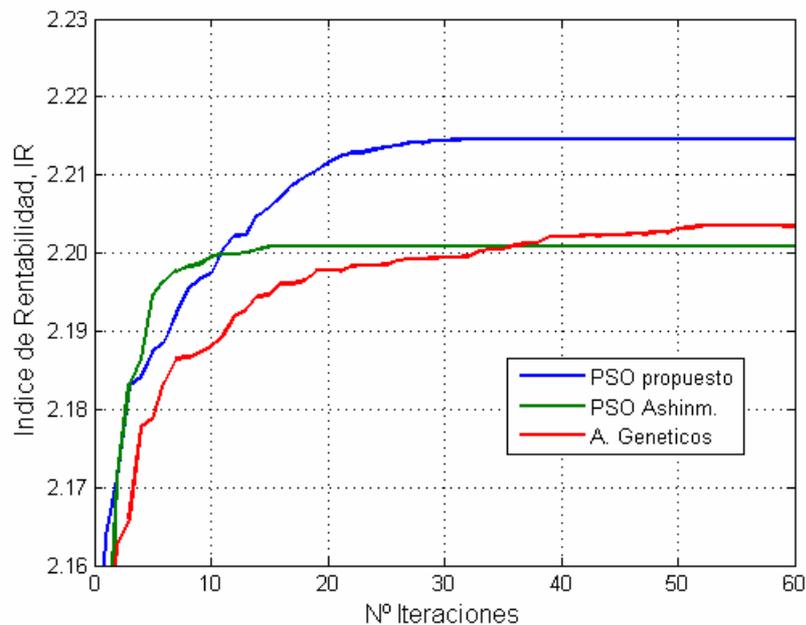
VARIABLE	VALOR
<i>MEDIA</i>	2,20
<i>SOLUCIÓN ÓPTIMA</i>	2,21
<i>DESVIACIÓN TÍPICA</i>	0,0062

En esta simulación se alcanzan de media soluciones mejores que en SIM02. Las ubicaciones que se consiguen están todas muy próximas. Sin embargo, el algoritmo necesita muchas más iteraciones para converger a la mejor solución. En la figura 8.22 se representa la evolución de la función objetivo, *IR*, en función del número de iteraciones realizadas. Se observa que se necesitan unas 50 iteraciones de media para alcanzar el valor máximo.

**Figura 8.22:** SIM03 - Evolución del Índice de Rentabilidad en función del número de iteraciones.

### 8.3.2.4 Observaciones y conclusiones relativas a los tres algoritmos

El algoritmo PSO utilizado en SIM01 es muy parecido al utilizado en SIM02, con la salvedad de que se ha incorporado un término inercial. Este factor provoca que en las primeras iteraciones el algoritmo explore intensamente en todo el espacio de búsqueda de forma prácticamente aleatoria y, conforme avanza el número de iteraciones, el algoritmo busca de forma ordenada en función del aprendizaje y experiencia que ha adquirido en las primeras iteraciones. Se gana en exploración inicial que redundará en una mayor experiencia en las iteraciones finales, pero se pierde algo de convergencia.



**Figura 8.23:** Evolución del Índice de Rentabilidad para los tres algoritmos.

Como se observa en la figura 8.23 la pendiente inicial de la curva de la evolución de estos dos algoritmos es prácticamente la misma, pero en SIM02 no se alcanzan las mejores soluciones debido a que en el inicio el algoritmo explora menos, su resultado se basa en la aleatoriedad de las soluciones encontradas en el comienzo y a partir de entonces se deja llevar por los valores obtenidos de *mejorpos<sub>i</sub>* y *mejorpos<sub>g</sub>*, no obstante, la convergencia en la obtención del valor de *IR* es mayor. Las soluciones encontradas en SIM02 son todas muy parecidas y se puede hablar de un cierto nivel de

robustez en los valores de  $IR$ , pero si se analiza las ubicaciones de la planta obtenidas no se alcanza ningún resultado igual aunque, eso sí, son todos parecidos. Para mejorar los resultados con el algoritmo de Afshinmanesh se tendría que recurrir a un mayor número de partículas pero esto supondría aumentar el tiempo de ejecución.

El algoritmo PSO propuesto refina más la solución debido a su mayor exploración inicial y alcanza una mayor eficacia, y robustez aunque necesita unas 30 iteraciones. La robustez de los resultados en este caso es del 100 %.

Por último, el algoritmo genético AG utilizado en SIM03 consigue obtener buenas soluciones de  $IR$  y con localizaciones geográficas muy parecidas. La evolución de  $IR$  en SIM03 con AG manifiesta la gran complejidad del problema y la dificultad que presenta el algoritmo para alcanzar buenas soluciones. La eficacia de este algoritmo se puede considerar buena pero necesita de bastantes más iteraciones que los otros dos algoritmos para converger a una buena solución.

El tiempo de ejecución de los algoritmos viene dado por el número de evaluaciones completas que han realizado. En la tabla 8.14 se observa que el AG necesita bastantes más evaluaciones que los algoritmos PSO utilizados. Éstos realizan las mismas evaluaciones pero en estas condiciones los resultados son mejores con el PSO propuesto.

**Tabla 8.14:** NÚMERO DE EVALUACIONES DE LA FUNCIÓN OBJETIVO

TÉCNICA	NÚMERO DE EVALUACIONES
<i>PSO PROPUESTO</i>	$P \cdot t_{\max} = 30 \cdot 60 = 1800$
<i>PSO AFSHINMANESH</i>	$P \cdot t_{\max} = 30 \cdot 60 = 1800$
<i>ALGORITMO GÉNÉTICO</i>	$[P \cdot IS/2] \cdot 2 \cdot t_{\max} = [36 \cdot 0.8/2] \cdot 2 \cdot 60 = 1728$

En esta tabla  $P$  denota el número de partículas,  $t_{\max}$  es el número de iteraciones y  $IS$  es el índice de selección del AG. Como se puede comprobar se han escogido valores que producen un número de evaluaciones similar en los tres algoritmos utilizados.

### **8.3.3 Ubicación óptima de planta en región 1 limitando la potencia**

Continuando con las simulaciones y el análisis de los resultados que se obtienen, en este apartado se plantea el cálculo de la ubicación óptima de la planta pero limitando la potencia de generación a 10 y 5 MW. A priori, los resultados no deben de coincidir con los obtenidos en el apartado anterior, ya que al limitar la potencia se modifica el área de extracción de la biomasa.

En cada uno de estos casos planteados se utilizan como técnicas el algoritmo PSO propuesto y el algoritmo genético para posteriormente realizar valoraciones y comparativas.

#### **8.3.3.1 *Ubicación óptima de planta SOFC-TG en región 1 para una potencia máxima de 10 MW (SIM04)***

El objetivo de la siguiente simulación es el de calcular la ubicación óptima de la planta en la región anteriormente definida imponiendo una restricción, la potencia eléctrica de generación se limita a 10 MW, o lo que es lo mismo, se limita el valor de la inversión inicial. En este caso, la función que cobra especial importancia es el Valor Actual neto,  $VAN$ , y por tanto, es la función seleccionada para su optimización.  $IR$  pierde su idoneidad al limitarse la inversión.

Se establecen:  $P = 40$ ,  $N = 20$ , N° Iteraciones = 60. El número de partículas se incrementa con respecto al anterior para conseguir mayor eficiencia, ya que, para la función elegida,  $VAN$ , y el espacio de búsqueda considerado, se presentan numerosos máximos locales con valores muy parejos.

Utilizando el algoritmo PSO propuesto y una vez realizadas 10 ejecuciones, se obtienen los resultados que se indican en las tablas 8.15, 8.16 y 8.17:

Tabla 8.15: RESULTADOS SIMULACIÓN SIM04 CON PSO

Nº	VAN (10 <sup>6</sup> €)	IR	UBICACIÓN	AREA (km <sup>2</sup> )	P <sub>e</sub> (MW)
1	41,09	2,10	(97, 27)	992,00	9,99
2	40,93	2,18	(96, 30)	992,00	9,97
3	41,09	2,19	(97, 27)	992,00	9,99
4	40,92	2,18	(98, 25)	992,00	9,97
5	40,59	2,13	(88, 45)	1054,00	9,97
6	41,09	2,19	(97, 27)	992,00	9,99
7	41,04	2,17	(81, 66)	1052,00	9,99
8	41,09	2,19	(97, 27)	992,00	9,99
9	41,02	2,17	(80, 63)	1058,00	9,98
10	41,09	2,19	(97, 27)	992,00	9,99

Tabla 8.16: MEJOR RESULTADO SIMULACIÓN SIM04 CON PSO

VARIABLE	VALOR
VALOR ACTUAL NETO, VAN (10 <sup>6</sup> € = M€)	41,09
SITUACIÓN DE LA PLANTA	(97, 27)
SUPERFICIE RECOGIDA BIOMASA (km <sup>2</sup> )	992,00
INDICE DE RENTABILIDAD, IR	2,19
POTENCIA ELECTRICA, P <sub>e</sub> (MW)	9,99

Tabla 8.17: ESTADÍSTICAS SIMULACIÓN SIM04 CON PSO

VARIABLE	VALOR
VALOR MEDIO DEL VAN	41,00 M€
VAN ÓPTIMO	41,09 M€
DESVIACIÓN TÍPICA	0,015 M€

En la figura 8.24 viene representada la posición de la planta y el área de extracción de la biomasa residual. Observando los resultados que se muestran en las tablas 8.15, 8.16 y 8.17, se percibe que la búsqueda resulta más compleja y el nivel de robustez del algoritmo no es elevado (50 %), aunque los valores alcanzados de la función objetivo y la ubicación de la planta son muy similares. La desviación típica es mínima y la convergencia media a la mejor solución se alcanza en poco menos de 40 iteraciones, tal y como se observa en la figura 8.25 en la que se representa la evolución media del VAN en función del número de iteraciones.

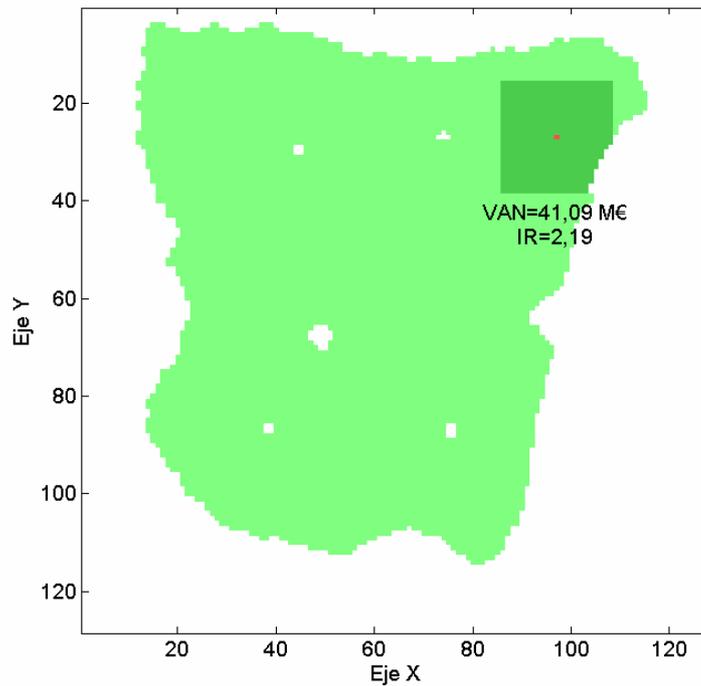


Figura 8.24: SIM04 - Ubicación de planta óptima para  $P_e \leq 10$  MW.

Para la simulación con algoritmos genéticos, AG, se eligen  $P = 50$  y  $t_{max} = 60$ . De nuevo se efectúan 10 ejecuciones y los resultados obtenidos se describen en las siguientes tablas:

Tabla 8.18: RESULTADOS SIMULACIÓN SIM04 CON AG

Nº	VAN (10 <sup>6</sup> €)	IR	UBICACIÓN	AREA (km <sup>2</sup> )	P <sub>e</sub> (MW)
1	40,77	2,18	(72, 98)	1010,00	9,93
2	40,68	2,14	(85, 49)	1054,00	9,98
3	40,44	2,16	(81, 60)	1052,00	9,87
4	40,49	2,16	(100, 21)	992,00	9,89
5	40,75	2,19	(77, 99)	998,00	9,89
6	40,53	2,14	(91, 18)	970,00	9,99
7	40,74	2,18	(78, 99)	996,00	9,90
8	40,69	2,14	(86, 48)	1056,00	9,99
9	40,79	2,19	(101, 28)	1004,00	9,94
10	40,48	2,14	(83, 19)	942,00	9,96

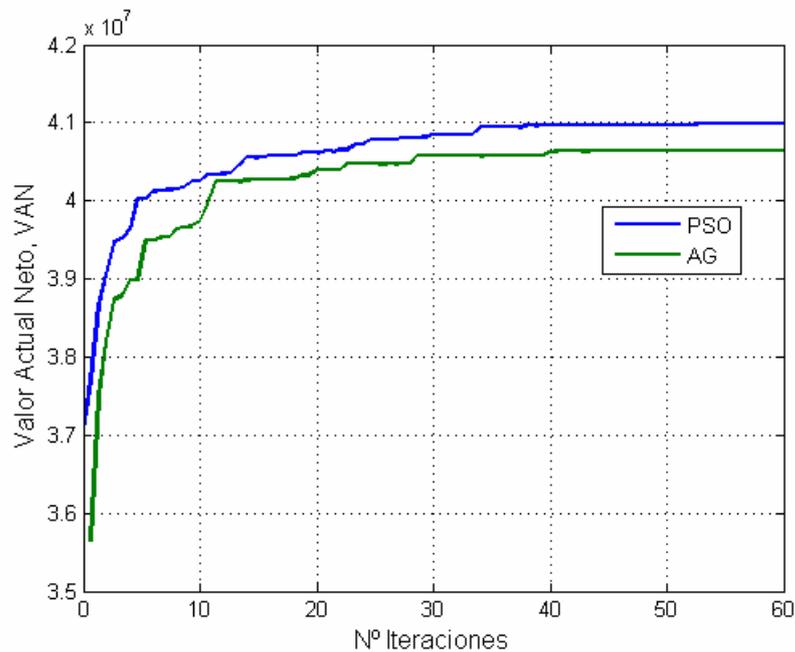
**Tabla 8.19:** MEJOR RESULTADO SIMULACIÓN SIM04 CON AG

VARIABLE	VALOR
VALOR ACTUAL NETO, VAN ( $10^6 \text{ €} = \text{M€}$ )	40,79
SITUACIÓN DE LA PLANTA	(101, 28)
SUPERFICIE RECOGIDA BIOMASA ( $\text{km}^2$ )	1004,00
INDICE DE RENTABILIDAD, IR	2,19
POTENCIA ELECTRICA, $P_e$ (MW)	9,94

**Tabla 8.20:** ESTADÍSTICAS SIMULACIÓN SIM04 CON AG

VARIABLE	VALOR
VALOR MEDIO DEL VAN	40,64 M€
VAN ÓPTIMO	40,79 M€
DESVIACIÓN TÍPICA	0,014 M€

Como se observa en las tablas 8.18, 8.19 y 8.20 el nivel de robustez y la eficacia del algoritmo AG son bastantes más bajas que las obtenidas mediante PSO. En este caso los resultados del VAN son parecidos pero con algo más de disparidad. La evolución, media de las 10 ejecuciones, de la función objetivo, VAN, se muestra también en la figura 8.25, la mejor solución se alcanza en algo más de 40 iteraciones.

**Figura 8.25:** SIM04 - Evolución del VAN en función del número de iteraciones ( $P_e \leq 10$  MW).

En la tabla 8.21 se observa que el número de evaluaciones realizadas por los dos algoritmos es el mismo.

**Tabla 8.21:** NÚMERO DE EVALUACIONES DE LA FUNCIÓN OBJETIVO SIM04

TÉCNICA	NÚMERO DE EVALUACIONES
PSO PROPUESTO	$P \cdot t_{\max} = 40 \cdot 60 = 2400$
ALGORITMO GÉNÉTICO	$[P \cdot IS/2] \cdot 2 \cdot t_{\max} = [50 \cdot 0.8/2] \cdot 2 \cdot 60 = 2400$

### 8.3.3.2 Ubicación óptima de planta SOFC-TG en región 1 para una potencia máxima de 5 MW (SIM05)

En esta simulación se persigue calcular la ubicación óptima de la planta en la región 1 limitando la potencia eléctrica de generación a 5 MW. La función objetivo elegida es el Valor Actual neto, VAN. Al igual que en el caso anterior, se establecen,  $P = 40$ ,  $N = 20$ , N° Iteraciones = 60.

Utilizando el algoritmo PSO propuesto y una vez realizadas 10 ejecuciones se obtienen los siguientes resultados:

**Tabla 8.22:** RESULTADOS SIMULACIÓN SIM05 CON PSO

N°	VAN (10 <sup>6</sup> €)	IR	UBICACIÓN	AREA (km <sup>2</sup> )	P <sub>e</sub> (MW)
1	19,77	2,12	(61, 28)	450,00	4,89
2	19,72	2,07	(83, 29)	450,00	4,98
3	19,77	2,12	(61, 28)	450,00	4,89
4	19,77	2,12	(61, 28)	450,00	4,89
5	19,77	2,12	(61, 28)	450,00	4,89
6	19,77	2,12	(61, 28)	450,00	4,89
7	19,77	2,12	(61, 28)	450,00	4,89
8	19,77	2,12	(61, 28)	450,00	4,89
9	19,77	2,12	(61, 28)	450,00	4,89
10	19,77	2,12	(61, 28)	450,00	4,89

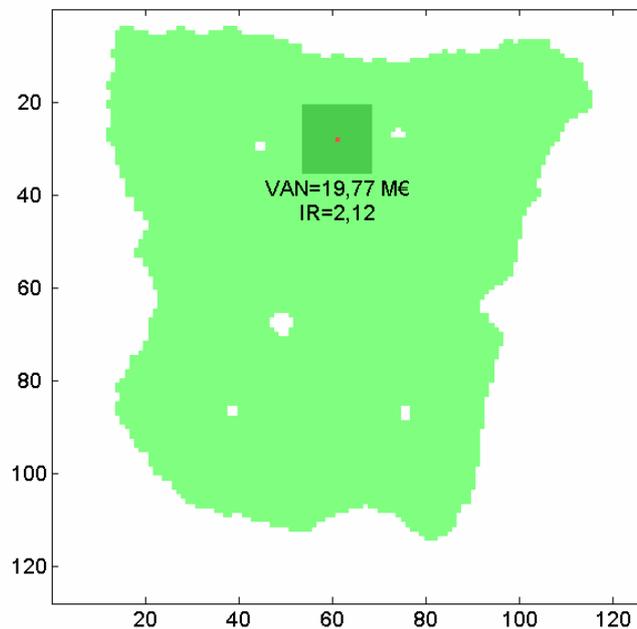
**Tabla 8.23:** MEJOR RESULTADO SIMULACIÓN SIM05 CON PSO

VARIABLE	VALOR
VALOR ACTUAL NETO, VAN ( $10^6 \text{ €} = \text{M€}$ )	19,77
SITUACIÓN DE LA PLANTA	(61, 28)
SUPERFICIE RECOGIDA BIOMASA ( $\text{km}^2$ )	450,00
INDICE DE RENTABILIDAD, IR	2,12
POTENCIA ELECTRICA, $P_e$ (MW)	4,89

**Tabla 8.24:** ESTADÍSTICAS SIMULACIÓN SIM05 CON PSO

VARIABLE	VALOR
VALOR MEDIO DEL VAN	19,77 M€
VAN OPTIMO	19,77 M€
DESVIACIÓN TÍPICA	0,0016 M€

La figura 8.26 muestra la solución encontrada con la aplicación del algoritmo. Se observa la posición que adopta la planta, en el centro de una superficie rectangular de la que se extrae la biomasa residual.

**Figura 8.26:** SIM05 - Ubicación de planta óptima para  $P_e \leq 5$  MW.

Empleando el algoritmo genético con  $P = 50$  y  $t_{max} = 60$ , los resultados que se obtienen se reflejan en las tablas que se muestran a continuación:

**Tabla 8.25:** RESULTADOS SIMULACIÓN SIM05 CON AG

Nº	VAN (10 <sup>6</sup> €)	IR	UBICACIÓN	AREA (km <sup>2</sup> )	P <sub>e</sub> (MW)
1	19,71	2,08	(80, 28)	442,00	4,98
2	19,77	2,12	(61, 28)	450,00	4,89
3	19,77	2,12	(61, 28)	450,00	4,89
4	19,77	2,12	(61, 28)	450,00	4,89
5	19,77	2,12	(61, 28)	450,00	4,89
6	19,77	2,12	(61, 28)	450,00	4,89
7	19,77	2,12	(61, 28)	450,00	4,89
8	19,77	2,11	(59, 28)	450,00	4,92
9	19,77	2,12	(61, 28)	450,00	4,89
10	19,77	2,12	(61, 28)	450,00	4,89

**Tabla 8.26:** MEJOR RESULTADO SIMULACIÓN SIM05 CON AG

VARIABLE	VALOR
VALOR ACTUAL NETO, VAN (10 <sup>6</sup> € = M€)	19,77
SITUACIÓN DELA PLANTA	(61, 28)
SUPERFICIE RECOGIDA BIOMASA (km <sup>2</sup> )	450,00
INDICE DE RENTABILIDAD, IR	2,12
POTENCIA ELECTRICA, P <sub>e</sub> (MW)	4,89

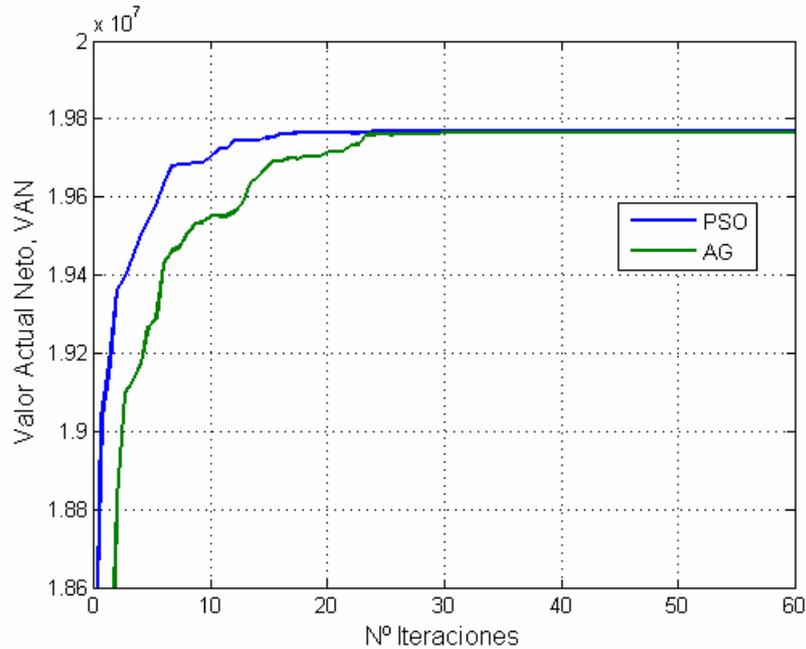
**Tabla 8.27:** ESTADÍSTICAS SIMULACIÓN SIM05 CON AG

VARIABLE	VALOR
VALOR MEDIO DEL VAN	19,77 M€
VAN OPTIMO	19,77 M€
DESVIACIÓN TÍPICA	0,0019 M€

En esta simulación los resultados obtenidos por los dos algoritmos, PSO y AG, son muy similares si se comparan las tablas 8.22, 8.23 y 8.24 con las tablas 8.25, 8.26 y 8.27. La robustez alcanzada por los dos algoritmos es la misma, próxima al 100 %, y las mejores soluciones coinciden en ambos casos.

La figura 8.27 muestra la evolución media (después de 10 ejecuciones) de la función objetivo, VAN, con respecto al número de iteraciones y para los dos algoritmos.

Se observa en las pendientes de las gráficas que el algoritmo PSO posee una mayor convergencia que el AG, sin embargo, a partir de las 25 iteraciones los resultados se equiparan.



**Figura 8.27:** SIM05 - Evolución del VAN en función del número de iteraciones ( $P_e \leq 10$  MW).

Al igual que en la simulación SIM04, el número de evaluaciones que realiza cada algoritmo es el mismo, tal y como se indica en la tabla 8.28:

**Tabla 8.28:** NÚMERO DE EVALUACIONES DE LA FUNCIÓN OBJETIVO

TÉCNICA	NÚMERO DE EVALUACIONES
PSO PROPUESTO	$P \cdot t_{\max} = 40 \cdot 60 = 2400$
ALGORITMO GÉNÉTICO	$[P \cdot IS/2] \cdot 2 \cdot t_{\max} = [50 \cdot 0.8/2] \cdot 2 \cdot 60 = 2400$

### 8.3.3.3 Observaciones y conclusiones

Una vez expuestos los resultados de las simulaciones SIM04 y SIM05 en las que se limita la potencia de generación de la planta SOFC-TG a 10 y 5 MW, respectivamente, se concluye lo siguiente:

- Se comprueba lo que se ha anticipado al comienzo del apartado 8.3.3, los resultados no coinciden cuando la potencia de la planta se limita a diferentes valores, ya que esto provoca la modificación del área de suministro de la biomasa forestal residual.
- La robustez y eficiencia del algoritmo utilizado depende de la complejidad del problema y de la existencia y distribución de máximos locales. Las dimensiones del área de suministro de biomasa influyen en el resultado, por ello, para esta región la resolución de SIM04 resulta más compleja que SIM05.
- Con el algoritmo PSO se obtienen siempre iguales o mejores resultados. Éstos son mejores siempre en la simulación SIM04, en SIM05 se alcanzan resultados óptimos con ambos algoritmos pero en este caso PSO lo consigue en menos iteraciones.
- A medida que la complejidad del problema aumenta las diferencias entre los resultados alcanzados por PSO y AG para tiempos de ejecución similares son mayores.

#### **8.3.4 Influencia de la dimensión del problema o número de parcelas para la optimización del tamaño y situación de planta SOFC-TG en región 1.**

En este apartado se plantean una serie de simulaciones que pretenden experimentar sobre la influencia que tiene en este tipo de problemas el número de parcelas en las que se divide la región considerada. La superficie total de la región siempre es la misma.

A primera vista, sin proceder a la simulación, se puede advertir lo siguiente:

- La precisión del resultado final depende del número de parcelas considerado o dimensión del problema. A menor número de parcelas se obtiene menor precisión. Debido al tratamiento binario del problema, el número de celdas que conforman la rejilla donde se encuentra la región representada debe de ser  $2^{L_x+L_y}$ . Donde  $L_x$  y  $L_y$  son los tamaños máximos en el eje X y eje Y de la rejilla. De ahí que se planteen 3 opciones de resolución para una misma región con una superficie total determinada:
  - Mapa de 64 x 64 parcelas, con  $S_i = 8 \text{ km}^2$ .
  - Mapa de 128 x 128 parcelas, con  $S_i = 2 \text{ km}^2$ .
  - Mapa de 256 x 256 parcelas, con  $S_i = 0,5 \text{ km}^2$ .
  
- El tiempo de ejecución se incrementa considerablemente con mayor número de parcelas, debido, a que la dimensión del problema es función del número de bits que definen la posición de una partícula. Aplicando la ecuación 7.1 el número de bits,  $N$ , que se obtiene para cada supuesto es el siguiente:
  - Rejilla de 64 x 64 celdas:  

$$N = \log_2 64 + \log_2 64 + \log_2 32 = 6 + 6 + 5 = 17 \text{ bits}$$
  - Rejilla de 128 x 128 celdas:  

$$N = \log_2 128 + \log_2 128 + \log_2 64 = 7 + 7 + 6 = 20 \text{ bits}$$
  - Rejilla de 256 x 256 celdas:  

$$N = \log_2 256 + \log_2 256 + \log_2 128 = 8 + 8 + 7 = 23 \text{ bits}$$

La diferencia entre cada uno de los supuestos es de 3 y 6 bits. Esta diferencia se traduce en, con respecto a una rejilla de 128 x128, que el tiempo de ejecución es 8 ( $2^3$ ) veces menor considerando una rejilla de 64 x 64 y 8 veces mayor considerando una rejilla de 256x256 celdas.

El planteamiento inicial del problema interviene substancialmente en la toma de decisión de, entre otras:

- La geometría de las parcelas consideradas.
- Definición de la geometría de la solución que se busca.
- La información de las parcelas disponible.
- La precisión del resultado que se persigue.

#### 8.3.4.1 Optimización de IR en región 1 considerando rejilla de 128x128 (SIM06)

Considerando que  $P = 30$ ,  $N = 20$ , N° Iteraciones = 60. Los resultados de esta simulación (SIM06) se presentan en la tabla 8.29 y son idénticos a los que se exponen en el apartado 8.3.2.1 y en la tabla 8.6. El valor de IR queda definido por cuatro decimales para precisar y diferenciar los resultados obtenidos:

**Tabla 8.29:** RESULTADOS SIMULACIÓN SIM06

<b>VARIABLE</b>	<b>VALOR</b>
<i>SITUACIÓN DELA PLANTA</i>	(66, 28)
<i>SUPERFICIE RECOGIDA BIOMASA (km<sup>2</sup>)</i>	1242,00
<i>INDICE DE RENTABILIDAD, IR</i>	2,2147
<i>VALOR ACTUAL NETO, VAN (10<sup>6</sup> € = M€)</i>	55,79
<i>POTENCIA ELECTRICA, P<sub>e</sub> (MW)</i>	13,47

La figura 8.28 muestra la ubicación óptima y la superficie de donde se aprovecha la biomasa forestal. La función objetivo, IR, converge a su valor máximo en poco más de 30 iteraciones. Su evolución se observa en la figura 8.29.

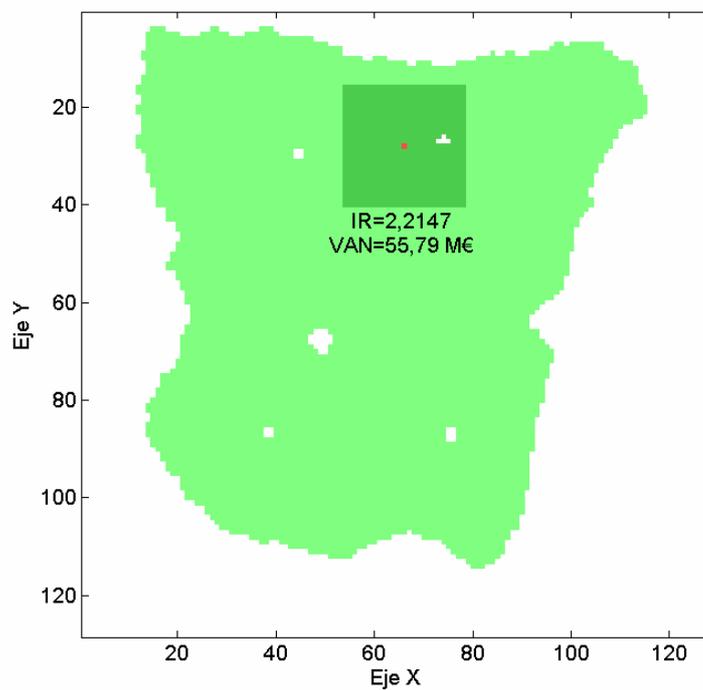


Figura 8.28: SIM06 - Ubicación de planta y superficie de extracción óptima.

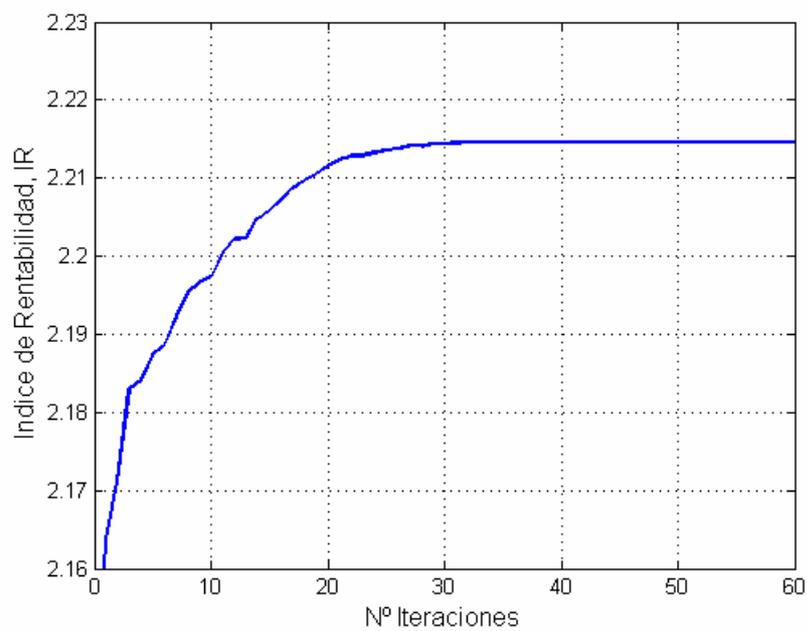


Figura 8.29: SIM06 - Evolución de IR en función del número de iteraciones.

### 8.3.4.2 Optimización de IR en región 1 considerando rejilla de 256x256 (SIM07)

En este caso la dimensión de la partícula aumenta a 23 bits,  $N = 23$ . Este valor incrementa la complejidad del problema y la pérdida de eficiencia. Aumentando el número de partículas que componen la nube,  $P = 40$ , se mejora la convergencia del algoritmo, pero crece, más si cabe, la dimensión del problema. La tabla 8.30 detalla los resultados de esta simulación (SIM07) después de 60 iteraciones:

Tabla 8.30: RESULTADOS SIMULACIÓN SIM07

VARIABLE	VALOR
SITUACIÓN DELA PLANTA	(131, 56)
SUPERFICIE RECOGIDA BIOMASA ( $km^2$ )	1192,50
INDICE DE RENTABILIDAD, IR	2,2149
VALOR ACTUAL NETO, VAN ( $10^6 \text{ €} = \text{M€}$ )	53,60
POTENCIA ELECTRICA, $P_e$ (MW)	12,93

La figura 8.30 muestra la ubicación óptima y la superficie de donde se aprovecha la biomasa forestal.

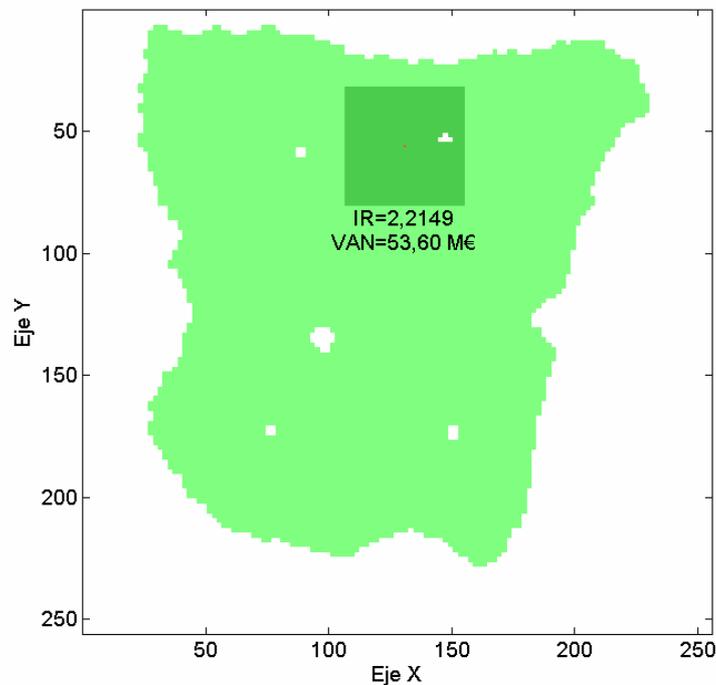
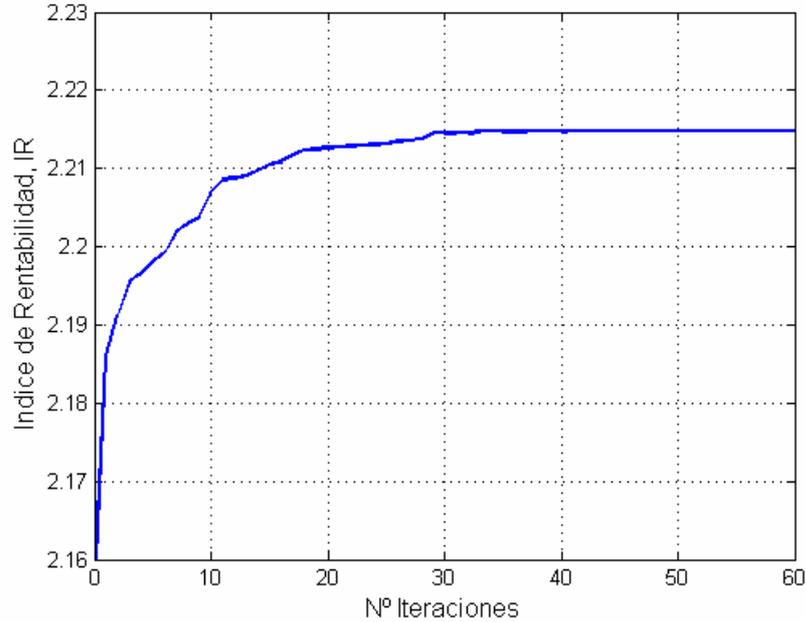


Figura 8.30: SIM07 - Ubicación de planta y superficie de extracción óptima.

La evolución de  $IR$  se muestra en la figura 8.31. En poco más de 30 iteraciones converge el algoritmo al valor máximo.



**Figura 8.31:** SIM07 - Evolución de  $IR$  en función del número de iteraciones.

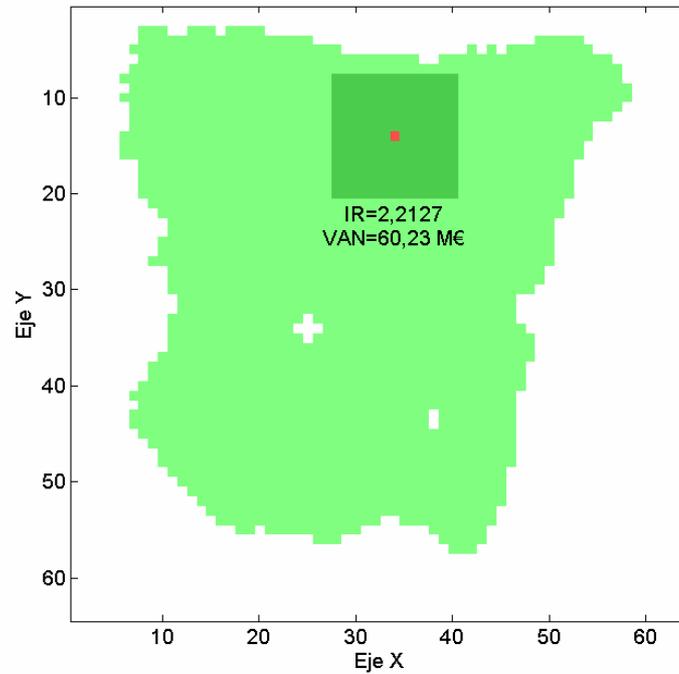
### 8.3.4.3 Optimización de $IR$ en región 1 considerando rejilla de 64x64 (SIM08)

Para este tercer supuesto la complejidad del problema disminuye considerablemente,  $N = 17$ . No obstante, el algoritmo se ejecuta para 60 iteraciones y el número de partículas se mantiene en 30. Los resultados de esta simulación (SIM08) vienen dados en la tabla 8.31:

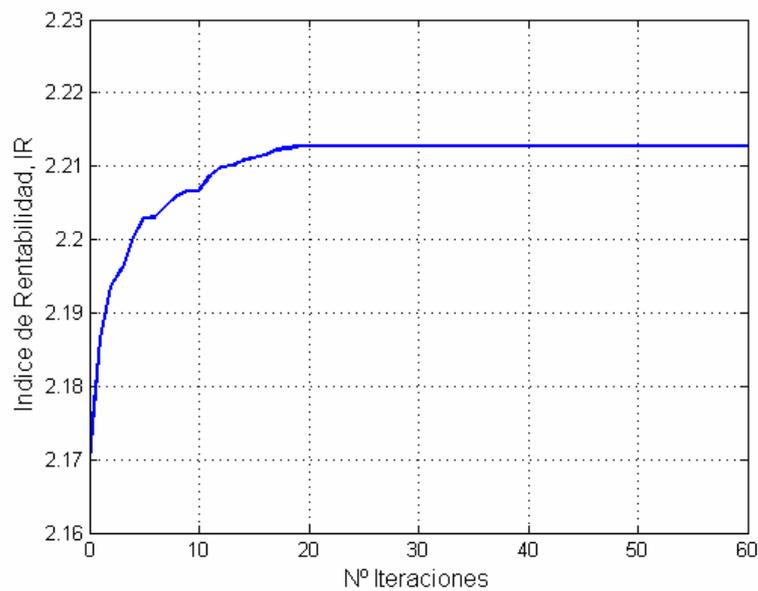
**Tabla 8.31:** RESULTADOS SIMULACIÓN SIM08

VARIABLE	VALOR
<i>SITUACIÓN DELA PLANTA</i>	(34, 14)
<i>SUPERFICIE RECOGIDA BIOMASA (km<sup>2</sup>)</i>	1352,00
<i>INDICE DE RENTABILIDAD, IR</i>	2,2127
<i>VALOR ACTUAL NETO, VAN (10<sup>6</sup> € = M€)</i>	60,23
<i>POTENCIA ELECTRICA, P<sub>e</sub> (MW)</i>	14,57

La figura 8.32 muestra la ubicación óptima y la superficie de donde se aprovecha la biomasa forestal. *IR* alcanza su valor máximo en unas de 20 iteraciones, tal y como se observa en la figura 8.33.



**Figura 8.32:** SIM08 - Ubicación de planta y superficie de extracción óptima.

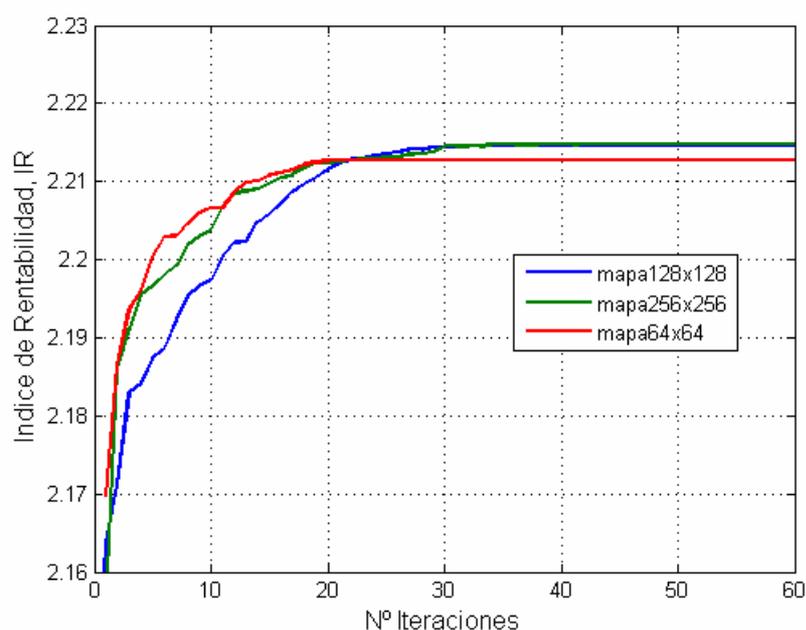


**Figura 8.33:** SIM08 - Evolución de *IR* en función del número de iteraciones.

### 8.3.4.4 Observaciones y conclusiones

Los resultados que se obtienen son muy parecidos en los tres casos. Utilizando una rejilla de 256x256 parcelas la solución difiere muy poco de la que se obtiene con una rejilla de 128x128, pero se incrementa notablemente el tiempo de ejecución (8 veces).

La robustez del algoritmo después de 10 simulaciones es del 100 % para los tres casos. En la figura 8.34 se observa como la pendiente de la curva que representa la evolución de  $IR$  es más suave para el caso con 256x256, es decir, la solución tarda más en alcanzarse (aproximadamente 35 iteraciones) que cuando se utilizan 64x64, en este caso la pendiente es más brusca y se alcanza la solución óptima en 20 iteraciones.



**Figura 8.34:** Evolución de  $IR$  en función del número de iteraciones (SIM06, SIM07, SIM08).

Con una rejilla de 128x128, la mejor solución se logra en una media de 30 iteraciones y el resultado difiere muy poco del alcanzado con una rejilla de 256x256 parcelas (0,001 %). Por tanto, con espacios de búsqueda no superiores a 128x128 (dimensión del problema o representación de partícula no superior a 20) se produce un

gran equilibrio entre la precisión de la solución y el tiempo de ejecución necesario para obtenerla.

Rejillas de 64x64 parcelas son idóneas para la optimización de regiones pequeñas, en aproximaciones o cuando no se requiere una elevada exactitud en los resultados. El tiempo de ejecución es relativamente reducido.

Para todos los casos las mejoras con respecto a la optimización mediante técnicas exactas son notables y, especialmente, cuando es mayor la dimensión del problema.

### **8.3.5 Comparación de 3 sistemas de generación. Optimización del tamaño y situación de planta en región 1**

En este apartado se optimiza el tamaño y situación de una planta para tres tipos de sistemas de generación diferentes:

- 1) Pila SOFC con turbina de gas (SOFC-TG).
- 2) Turbina de gas (TG).
- 3) Motor de combustión de gas (MCG).

La función objetivo elegida es de nuevo el índice de rentabilidad,  $IR$ . Con esta simulación se pretende comprobar la influencia del tipo de sistema en la ubicación y potencia óptima de la planta.

En esta Tesis no se ha desarrollado ningún modelo técnico de la turbina de gas y el motor de combustión de gas alimentado por biomasa residual gasificada. Por ello, para obtener la energía eléctrica anual generada en estos dos sistemas se recurre a la ecuación (8.1):

$$E_G = \sum_{i=1}^K [S_i \cdot D_i \cdot U_i \cdot PCI_i] \cdot \eta_{global} \quad (8.1)$$

Los valores específicos para cada sistema se exponen en la tabla 8.32 [46, 53, 56, 90]. El resto de valores utilizados son comunes y se corresponden con los fijados en la tabla 8.4.

**Tabla 8.32: VALORES ESPECÍFICOS DE LOS 3 SISTEMAS**

SOFC-TG		TURBINA DE GAS		MOTOR GAS	
$COVu$ (€/MWh)	10	$COVu$ (€/MWh)	10	$COVu$ (€/MWh)	15
$INu$ (€/MW)	3500000	$INu$ (€/MW)	2500000	$INu$ (€/MW)	1500000
$V_u$ (años)	15	$V_u$ (años)	15	$V_u$ (años)	12
		$\eta_{global}$	0,30	$\eta_{global}$	0,20

Para esta propuesta y los tres sistemas indicados se adopta:  $P = 30$ ,  $N = 20$ ,  $N^\circ$  Iteraciones = 60.

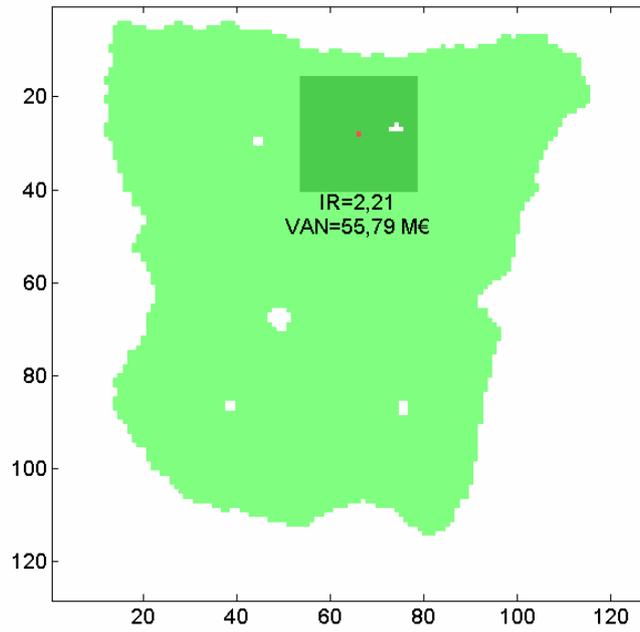
### 8.3.5.1 Optimización de IR para sistema SOFC-TG en región 1 (SIM09)

Los resultados de esta simulación (SIM09) vienen dados en la tabla 8.33:

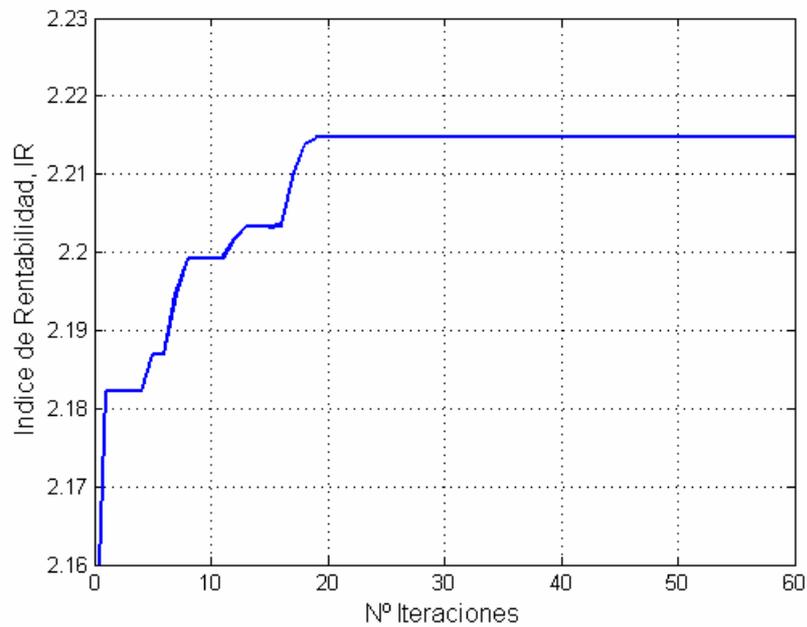
**Tabla 8.33: RESULTADOS SIMULACIÓN SIM09**

VARIABLE	VALOR
SITUACIÓN DELA PLANTA	(66, 28)
SUPERFICIE RECOGIDA BIOMASA ( $km^2$ )	1242,00
INDICE DE RENTABILIDAD, IR	2,21
VALOR ACTUAL NETO, VAN ( $10^6 \text{ €} = \text{M€}$ )	55,79
POTENCIA ELECTRICA, $P_e$ (MW)	13,47

La figura 8.35 muestra la localización óptima de la planta SOFC-TG y la superficie de donde se aprovecha la biomasa forestal. La función objetivo, IR, converge a su valor máximo en unas 20 iteraciones. Su evolución con una sola simulación se observa en la figura 8.36.



**Figura 8.35:** SIM09 - Ubicación de planta SOFC-TG y superficie de extracción óptima.



**Figura 8.36:** SIM09 - Evolución de IR. Sistema SOFC-TG.

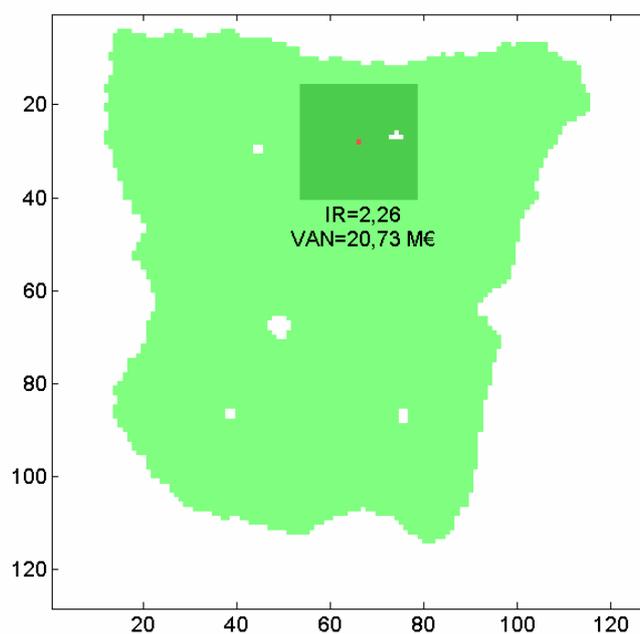
### 8.3.5.2 Optimización de IR para sistema TG en región 1 (SIM10)

Los resultados de esta simulación (SIM10) vienen dados en la tabla 8.34:

**Tabla 8.34:** RESULTADOS SIMULACIÓN SIM10

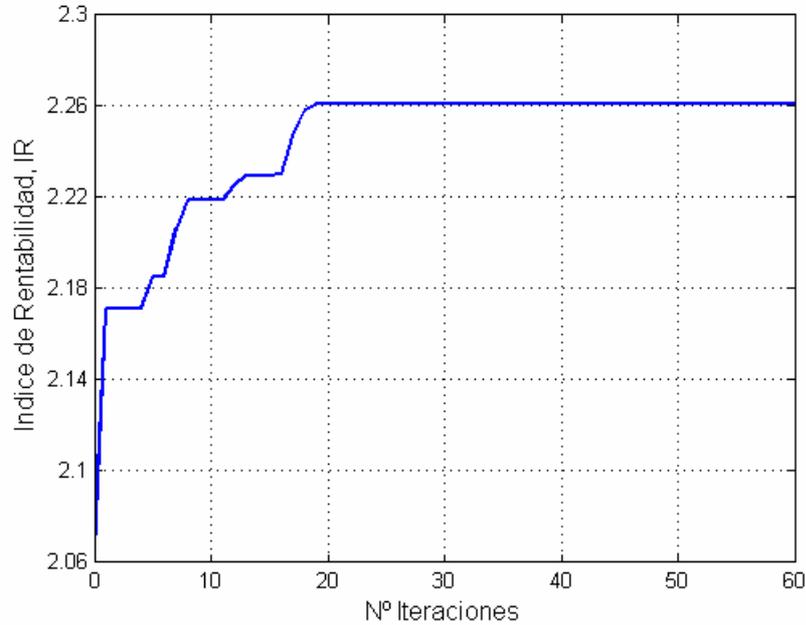
VARIABLE	VALOR
SITUACIÓN DELA PLANTA	(66, 28)
SUPERFICIE RECOGIDA BIOMASA ( $km^2$ )	1242,00
INDICE DE RENTABILIDAD, IR	2,26
VALOR ACTUAL NETO, VAN ( $10^6 \text{ €} = \text{M€}$ )	20,73
POTENCIA ELECTRICA, $P_e$ (MW)	6,73

La figura 8.37 muestra la localización óptima de la planta con turbina de gas y la superficie de donde se aprovecha la biomasa forestal.



**Figura 8.37:** SIM10 - Ubicación de planta con TG y superficie de extracción óptima.

La función objetivo,  $IR$ , converge a su valor máximo en 20 iteraciones. Su evolución con una sola simulación se observa en la figura 8.38.



**Figura 8.38:** SIM10 - Evolución de  $IR$ . Sistema TG.

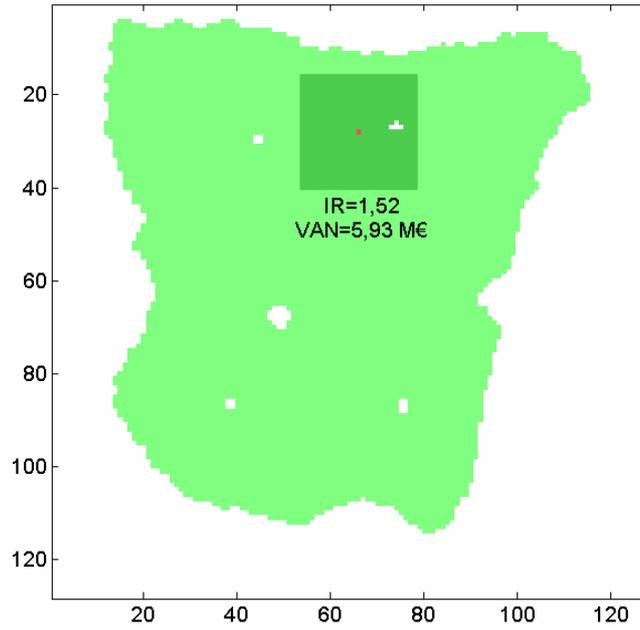
### 8.3.5.3 Optimización de $IR$ para sistema MCG en región 1 (SIM11)

Los resultados de esta simulación (SIM11) vienen dados en la tabla 8.35:

**Tabla 8.35:** RESULTADOS SIMULACIÓN SIM11

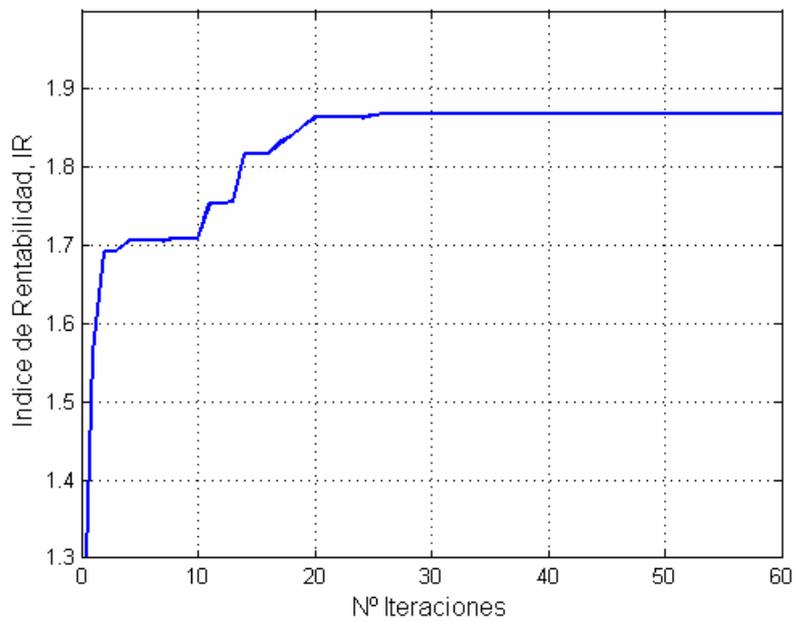
VARIABLE	VALOR
SITUACIÓN DELA PLANTA	(66, 28)
SUPERFICIE RECOGIDA BIOMASA ( $km^2$ )	1242,00
INDICE DE RENTABILIDAD, $IR$	1,52
VALOR ACTUAL NETO, $VAN$ ( $10^6 \text{ €} = M\text{€}$ )	5,93
POTENCIA ELECTRICA, $P_e$ (MW)	4,49

La figura 8.39 muestra la localización óptima de la planta con MCG y la superficie de donde se aprovecha la biomasa forestal.



**Figura 8.39:** SIM11 - Ubicación de planta MCG y superficie de extracción óptima.

La evolución de la función objetivo,  $IR$ , por una sola simulación converge en aproximadamente 25 iteraciones, como se muestra en la figura 8.40.



**Figura 8.40:** SIM11 - Evolución de  $IR$ . Sistema MCG.

#### **8.3.5.4 Observaciones conclusiones**

Aunque las características técnicas de cada sistema de generación conducen a resultados diferentes en las variables y funciones económicas y energéticas consideradas, la ubicación de la planta y el área de extracción de la biomasa es la misma en los tres sistemas. Esto es debido principalmente a:

- La influencia decisiva en la optimización que posee el potencial energético de las parcelas y los costes de extracción y transporte, para cualquier tipo de aprovechamiento de biomasa residual dispersa geográficamente.
- Que la capacidad de generación de los sistemas no está limitada. Si existiera tal limitación, a igualdad de potencia, la superficie de suministro de biomasa variaría en función del sistema de generación empleado.

De los resultados económicos se extrae que el sistema con turbina de gas es con el que el inversor obtiene mayor rentabilidad.

En cuanto a la evolución del resultado del algoritmo, se observa que para los tres sistemas la evolución de  $IR$  es prácticamente idéntica alcanzándose el mejor valor en poco más de 20 iteraciones.

En resumen, en aprovechamientos energéticos de biomasa residual dispersa geográficamente y desde el punto de vista del inversor, la mejor ubicación y área de extracción de biomasa es siempre la misma, independientemente del sistema de generación elegido (sin incluir restricciones técnicas particulares importantes en cada sistema) y sin limitar la potencia de generación.

### 8.3.6 Comparación de 3 sistemas de generación. Ubicación óptima en región 1 de planta de menos de 5 MW

En esta nueva propuesta de simulación en la que la potencia de generación se limita a 5 MW, se utiliza el  $VAN$  como función objetivo. A priori, la localización y área de producción de biomasa no tiene que ser la misma entre los tres sistemas de generación empleados (SOFC-TG, TG y MCG), principalmente, porque a igualdad de potencia la diferencia entre los rendimientos de los tres sistemas contemplados implica dimensiones de la superficie de extracción diferentes. Se tienen en cuenta los siguientes valores para la ejecución del algoritmo:  $P = 40$ ,  $N = 20$ , N° Iteraciones = 60.

#### 8.3.6.1 Optimización de planta SOFC-TG en región 1 para $P_e \leq 5$ MW (SIM12)

Los resultados que se obtienen vienen reflejados en la tabla 8.36:

**Tabla 8.36:** RESULTADOS SIMULACIÓN SIM12

<b>VARIABLE</b>	<b>VALOR</b>
<i>SITUACIÓN DELA PLANTA</i>	(61, 28)
<i>SUPERFICIE RECOGIDA BIOMASA (<math>km^2</math>)</i>	450,00
<i>INDICE DE RENTABILIDAD, IR</i>	2,12
<i>VALOR ACTUAL NETO, VAN (<math>10^6 \text{€} = \text{M€}</math>)</i>	19,77
<i>POTENCIA ELECTRICA, <math>P_e</math> (MW)</i>	4,90

La figura 8.41 muestra la localización óptima de la planta SOFC-TG y la superficie de aprovechamiento. La evolución de la función objetivo,  $VAN$ , se observa en la figura 8.42, la convergencia al valor máximo se establece en unas 25 iteraciones.

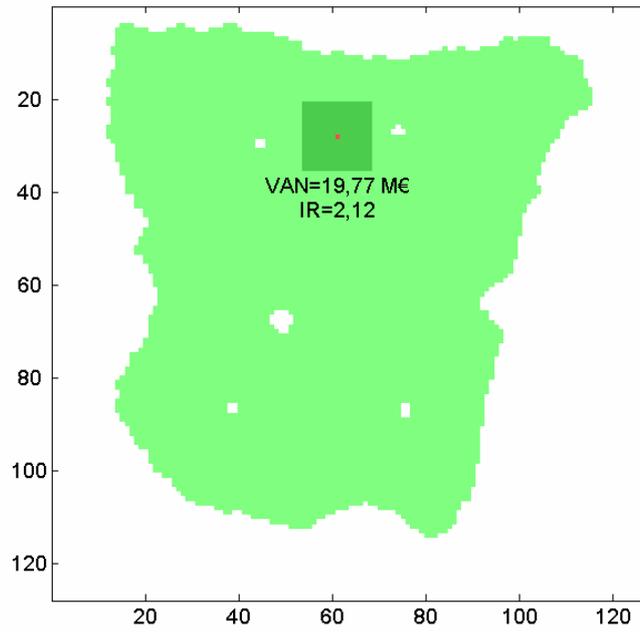


Figura 8.41: SIM12 - Ubicación de planta SOFC-TG para  $P_e \leq 5$  MW.

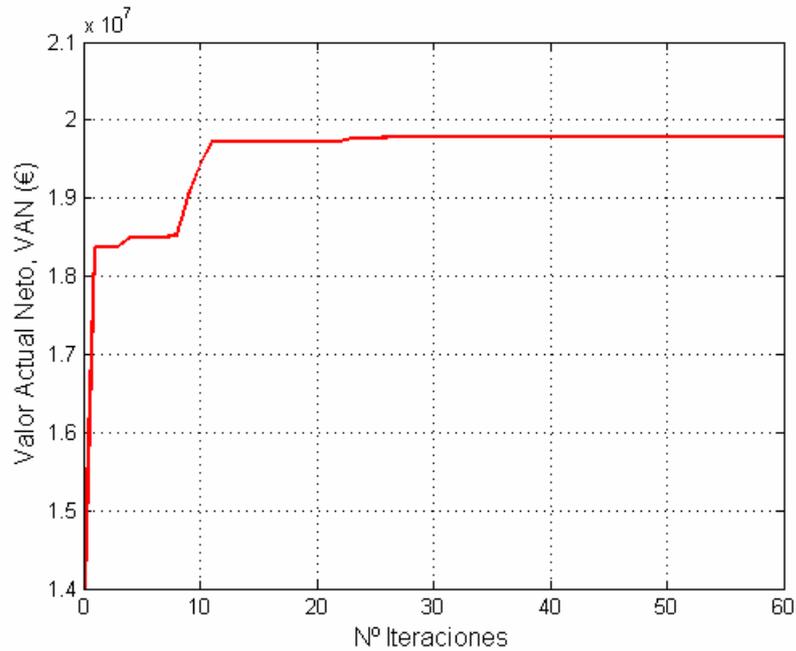


Figura 8.42: SIM12 - Evolución del VAN. Sistema SOFC-TG ( $P_e \leq 5$  MW).

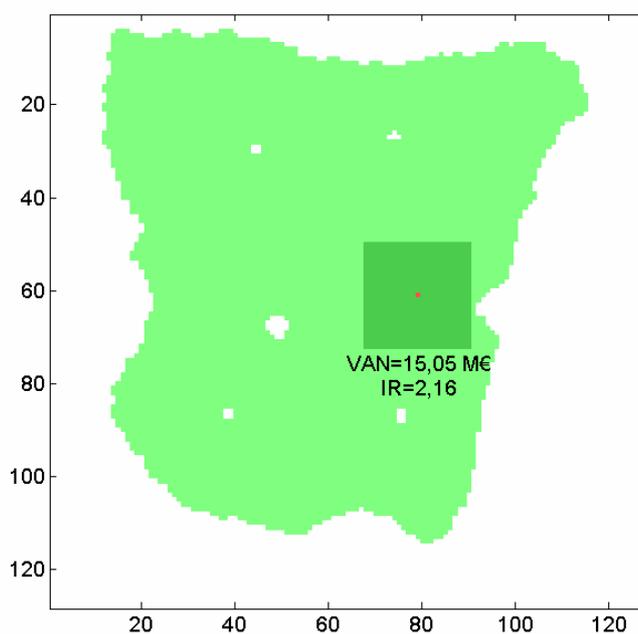
### 8.3.6.2 Optimización de planta TG en región 1 para $P_e \leq 5$ MW (SIM13)

Los resultados de esta simulación (SIM13) vienen dados en la tabla 8.37:

**Tabla 8.37:** RESULTADOS SIMULACIÓN SIM13

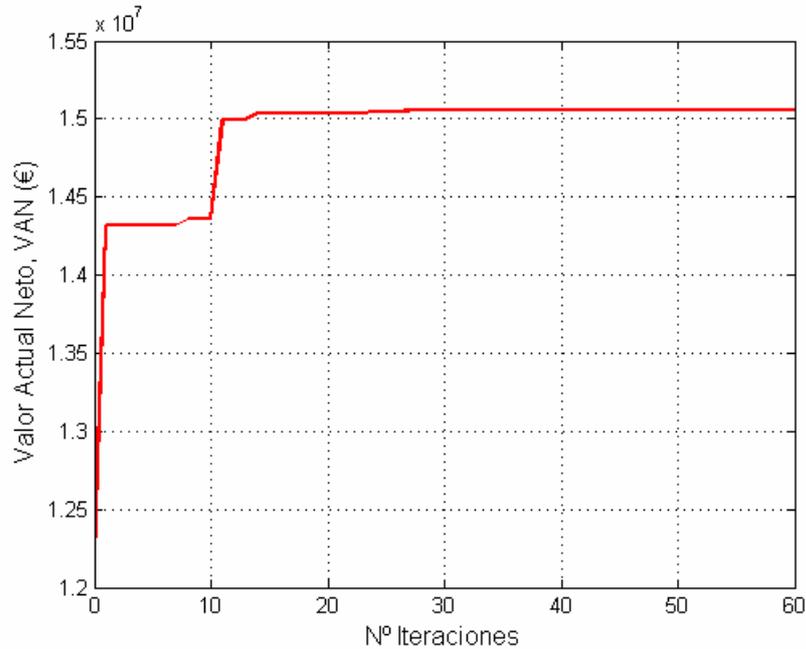
VARIABLE	VALOR
SITUACIÓN DELA PLANTA	(79, 61)
SUPERFICIE RECOGIDA BIOMASA ( $km^2$ )	1058,00
INDICE DE RENTABILIDAD, IR	2,16
VALOR ACTUAL NETO, VAN ( $10^6 \text{€} = \text{M€}$ )	15,05
POTENCIA ELECTRICA, $P_e$ (MW)	4,99

La ubicación óptima de esta planta y para esta potencia se muestra en la figura 8.43.



**Figura 8.43:** SIM13 - Ubicación de planta TG para  $P_e \leq 5$  MW.

La función objetivo,  $VAN$ , converge a su valor máximo en menos de 30 iteraciones. Su evolución se observa en la figura 8.44.



**Figura 8.44:** SIM13 - Evolución del  $VAN$ . Sistema TG ( $P_e \leq 5$  MW).

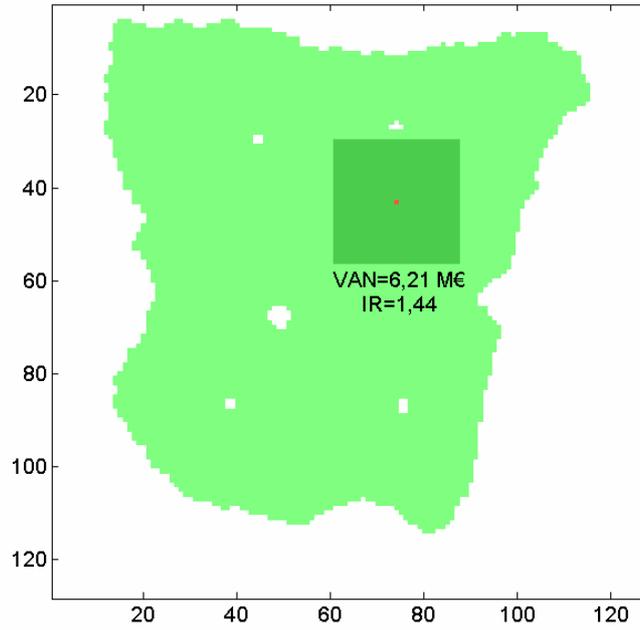
### 8.3.6.3 Optimización de planta MCG en región 1 para $P_e \leq 5$ MW (SIM14)

Ejecutado el algoritmo, los resultados se detallan en la tabla 8.38:

**Tabla 8.38:** RESULTADOS SIMULACIÓN SIM14

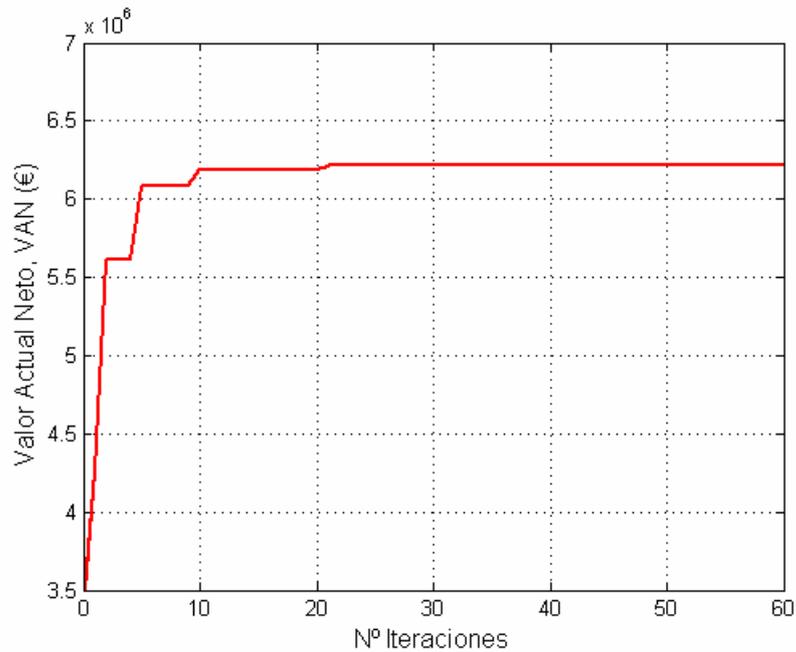
<b>VARIABLE</b>	<b>VALOR</b>
<i>SITUACIÓN DELA PLANTA</i>	(74, 43)
<i>SUPERFICIE RECOGIDA BIOMASA (km<sup>2</sup>)</i>	1458,00
<i>INDICE DE RENTABILIDAD, IR</i>	1,44
<i>VALOR ACTUAL NETO, VAN (10<sup>6</sup> € = M€)</i>	6,21
<i>POTENCIA ELECTRICA, P<sub>e</sub> (MW)</i>	4,99

La figura 8.45 representa la ubicación óptima del sistema MCG y el área de aprovechamiento de la biomasa.



**Figura 8.45:** SIM14 - Ubicación de planta MCG para  $P_e \leq 5$  MW.

El  $VAN$  evoluciona en función del número de iteraciones tal y como se indica en la figura 8.46. Se converge al valor máximo en unas 25 iteraciones.



**Figura 8.46:** SIM14 - Evolución del  $VAN$ . Sistema MCG ( $P_e \leq 5$  MW).

#### **8.3.6.4 Observaciones y conclusiones**

Limitando la potencia de generación, se observa que la ubicación y área de extracción de la biomasa es diferente para cada uno de los sistemas definidos. Debido, fundamentalmente a que el funcionamiento, la respuesta o la eficiencia de cada uno de los tres sistemas contemplados son diferentes.

En las tres gráficas que representan la evolución del *VAN* en función del número de iteraciones, se puede observar que cuanto mayor es el área de suministro de la biomasa resultante, mayor es la convergencia, y viceversa.

De nuevo, el sistema con turbina de gas es el que resulta más rentable económicamente para el inversor.

### **8.4 ANÁLISIS ELÉCTRICO. PUNTO DE VISTA DE LA EMPRESA DISTRIBUIDORA.**

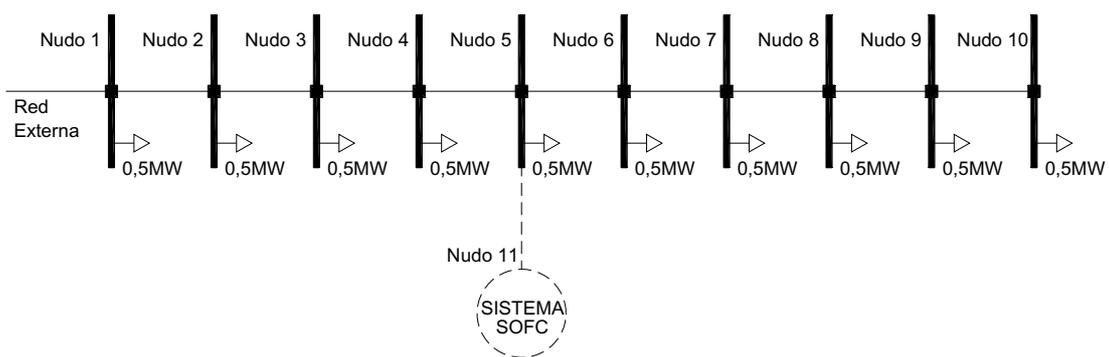
Antes de simular mediante el PSO propuesto un problema global con restricciones técnicas de la red y que tenga en cuenta a la vez los dos puntos de vista, inversor y empresa distribuidora, se pretende realizar un análisis eléctrico previo bajo el punto de vista exclusivo de la empresa distribuidora, propietaria de las redes de distribución y obligada por normativa a comprar la energía generada por un sistema que se acoge al régimen especial [116].

Las simulaciones que se van a llevar a cabo en este apartado contemplan la realización de cálculos eléctricos, la consideración de restricciones técnicas y el análisis de los costes económicos originados por las pérdidas de energía en la red. Por tanto, se trata de un primer avance que sirve para comprender y complementar los resultados de las simulaciones que se llevan a cabo en el apartado 8.5. En una de estas simulaciones

se utiliza el modelo global descrito en 6.5, en este apartado se plantea una función económica que permite obtener la solución con mejor rentabilidad global comprometida simultáneamente con los objetivos del inversor y la empresa distribuidora de energía eléctrica.

Se pretende aplicar en una red radial de 10 nudos que se representa en la figura 8.47, lo expuesto y desarrollado en el apartado 6.4 del capítulo 6. La red de distribución que se analiza se compone de una serie de cargas constantes repartidas uniformemente. Los datos y características de esta red se citan y detallan en [163].

Esta red de tipo radial se ha escogido para su análisis porque los resultados permiten obtener conclusiones generales y fácilmente interpretables aunque puedan resultar previsibles. Además, esta misma red es la que se utiliza más adelante para resolver, mediante la aplicación del algoritmo PSO, el modelo económico con restricciones y el modelo global que contempla los dos puntos de vista, inversor y empresa distribuidora.



**Figura 8.47:** Red de distribución elegida.

**Tabla 8.39:** PARÁMETROS DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN

Parámetros de la red de distribución	$R=0,5380 \Omega/\text{km}$ $X=0,4626 \Omega/\text{km}$ Longitud entre nudos: 3 km						$R=0,2582 \text{ pu}$ $X=0,2220 \text{ pu}$ Tensión de línea = 25 kV					Carga Total (MW)
Nº Nudo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
Carga (MW)	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,0	5,0

El sistema SOFC (nudo 11) se conecta a una distancia de 0,5 km de cada nudo.

Para el cálculo del coste unitario de pérdidas de energía,  $C_{PU}$ , se necesitan los siguientes valores:

- Coste unitario de la energía en la red,  $C_{UE}$ , se estima en 80 €/MWh [76].
- Coste unitario de la energía procedente del sistema de Generación Distribuida,  $C_{UGD}$ , es igual a 128 €/MWh para potencias de generación menores o iguales a 2 MW, e igual a 118 €/MWh para potencias superiores a 2 MW [116].  $C_{UGD}$  equivale al precio de compra para la empresa distribuidora de la energía generada por la empresa productora,  $p_g$ .

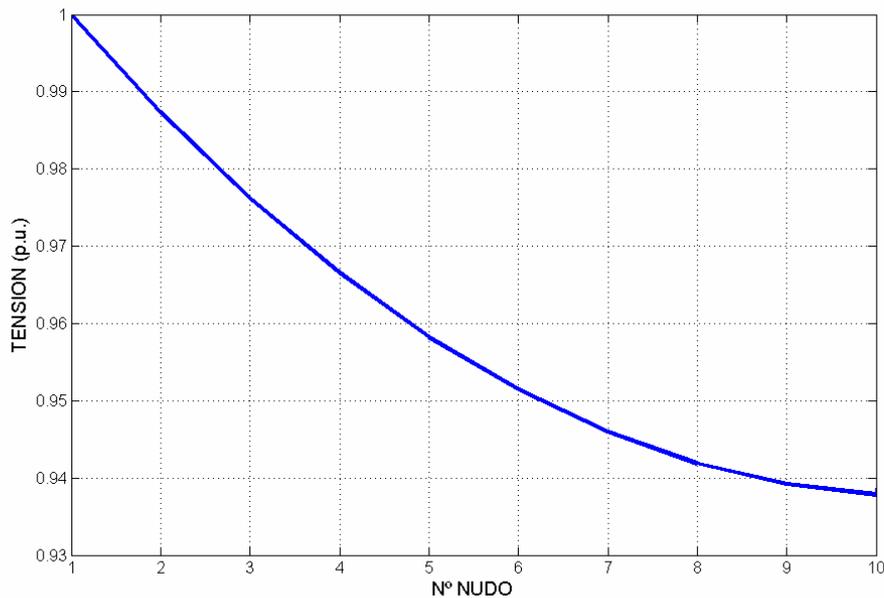
El algoritmo utilizado para minimizar las pérdidas energéticas en la red en función del tamaño y localización del sistema de generación SOFC-TG es el siguiente:

- 1) Seleccionar la posible localización de la planta de generación.
- 2) Calcular las pérdidas de potencia.
- 3) Calcular el coste correspondiente a esas pérdidas.
- 4) Volver al paso 2 incrementando de forma proporcional la potencia de la planta situada en el mismo nudo, hasta alcanzar el nivel de penetración máximo determinado.
- 5) Repetir el proceso para otras posiciones de la planta desde el paso 1.

Los resultados obtenidos para cada posición y potencia de la planta se consideran válidos si la tensión en cada uno de los nudos está dentro de un margen aceptable que garantice la calidad del suministro ( $0,95 \leq V_i \leq 1,05$ ).

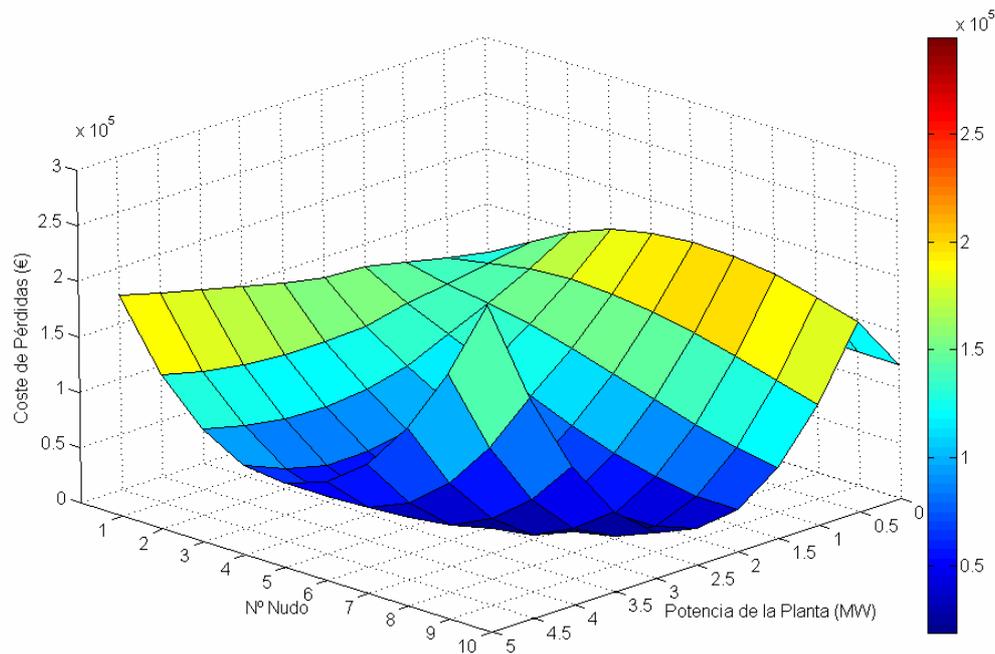
El nudo 1 se considera el de referencia. Su tensión permanece constante en el valor de 1,00 p.u. Para las cargas definidas, el número de horas de consumo medio anual,  $N_{HA}$ , es de 7500 horas.

El perfil de tensiones que tiene la red sin sistema GD conectado se muestra en la figura 8.48. Se observa que para una tensión de 1,00 p.u. en el nudo de referencia 1, las tensiones en los nudos 7, 8, 9 y 10 están por debajo de 0,95.



**Figura 8.48:** Perfil de tensiones sin GD.

Aplicando el algoritmo descrito, los costes totales de pérdidas anuales que se producen en la red considerada vienen representados en la figura 8.49, en función de los diferentes y posibles emplazamientos, así como de la potencia del sistema SOFC-TG.



**Figura 8.49:** Costes de pérdidas en función de la potencia del sistema SOFC-TG y su localización.

El valor mínimo del coste de pérdidas anuales,  $C_{PA}$ , es de 19.100 €. Para ello, la planta se debe emplazar en el nudo 8, con una potencia instalada de 3 MW. Este valor se observa en la figura 8.49 pero se distingue mejor en la figura 8.53.

Como muestra la figura 8.49, la instalación del sistema GD, en la mayoría de los casos, beneficia económicamente a la empresa distribuidora, ya que reduce el coste total de pérdidas en todos los casos, para cualquier potencia superior a 1 MW y exceptuando cuando la planta se sitúa en los nudos 1 y 2. Estos resultados son ciertamente previsibles para una red radial como la descrita en la figura 8.47, no obstante, sirven para corroborar que no todas las ubicaciones de un sistema de GD son beneficiosas para la empresa distribuidora, para el caso de una red radial resultan más ventajosas aquellas ubicaciones que están más alejadas de las subestaciones y próximas al usuario final, ya que reducen las pérdidas y minimizan la propagación de perturbaciones a toda la red que afectan a la calidad del suministro. En este caso, las pequeñas potencias de generación incrementan las pérdidas económicas de la empresa distribuidora.

A continuación se representan en gráficas de dos dimensiones los costes de pérdidas en función de la potencia de la planta cuando se conecta en los nudos más favorables (5, 6, 7, 8, 9 y 10).

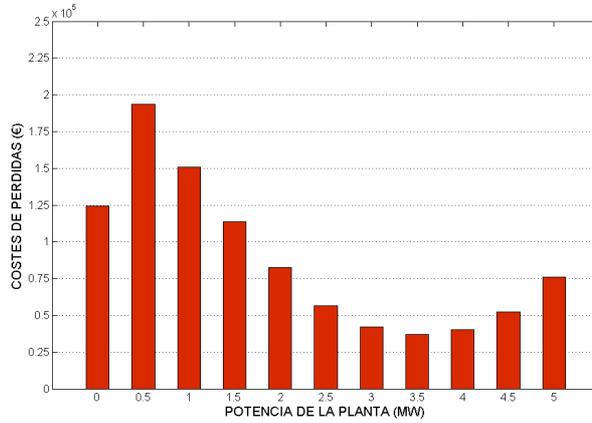


Figura 8.50: Costes de pérdidas en función de la potencia del sistema SOFC conectado en el nudo 5.

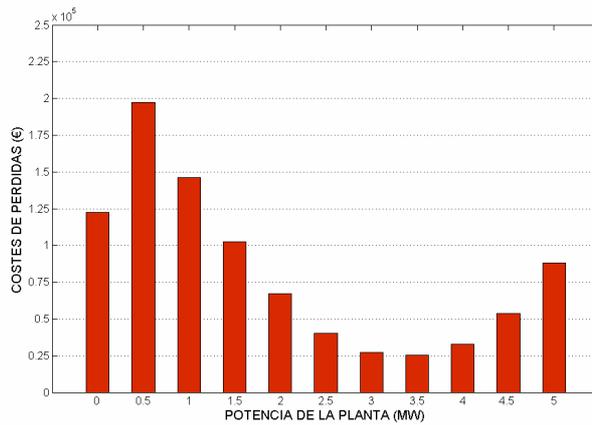


Figura 8.51: Costes de pérdidas en función de la potencia del sistema SOFC conectado en el nudo 6.

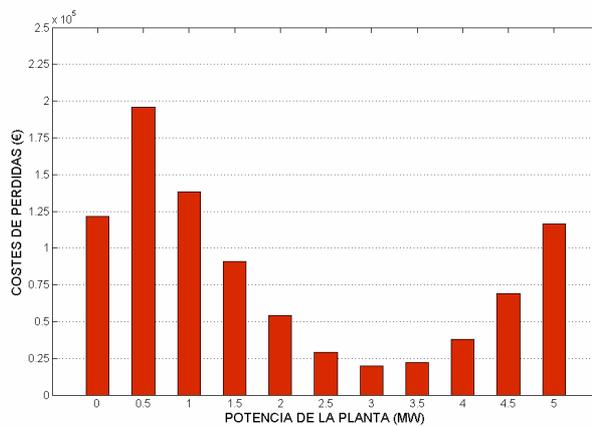


Figura 8.52: Costes de pérdidas en función de la potencia del sistema SOFC conectado en el nudo 7.

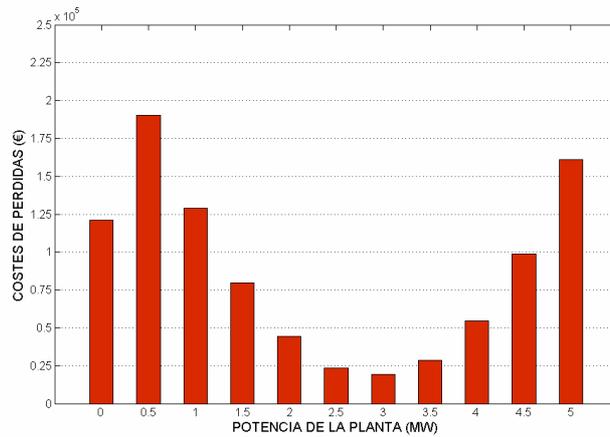


Figura 8.53: Costes de pérdidas en función de la potencia del sistema SOFC conectado en el nudo 8.

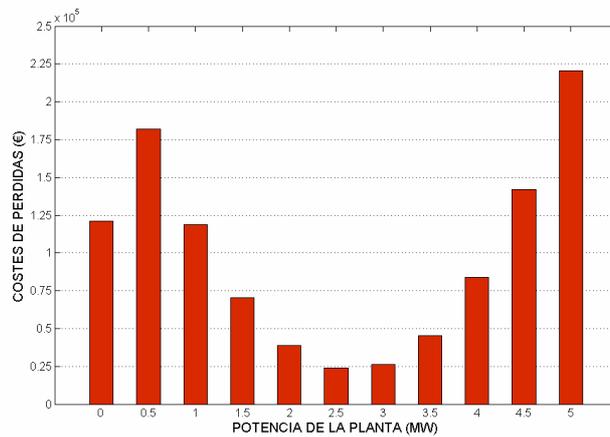


Figura 8.54: Costes de pérdidas en función de la potencia del sistema SOFC conectado en el nudo 9.

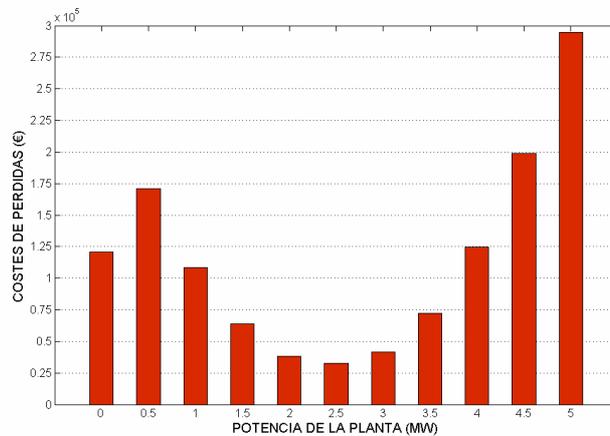
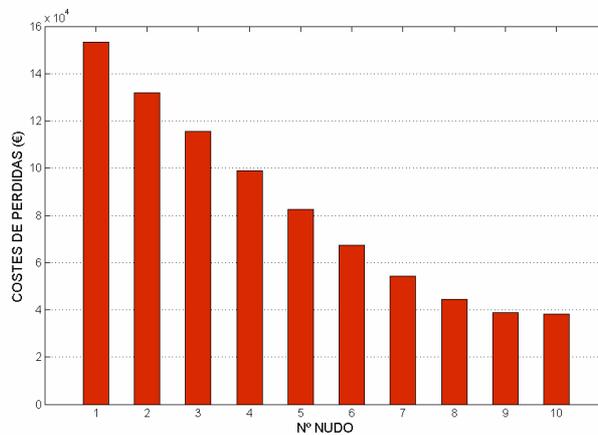


Figura 8.55: Costes de pérdidas en función de la potencia del sistema SOFC conectado en el nudo 10.

En las figuras 8.50, 8.51, 8.52, 8.53, 8.54 y 8.55 se puede observar que con potencias de generación comprendidas entre 2 MW y 4 MW, y emplazamientos entre los nudos 6 y 10, se obtienen los mejores resultados.

Las gráficas anteriores muestran que la conexión de sistemas GD implica, generalmente, reducción en las pérdidas de la red y, por tanto, en los costes de explotación de la empresa distribuidora de energía eléctrica. Casi todas presentan forma de “U”, e indican la tolerancia y admisibilidad que acarrea el nivel o grado de penetración de sistemas GD en las redes de distribución eléctricas.

En la figura 8.49 se observa que el nudo óptimo de localización de la planta varía en función de la potencia de generación. Si ésta se fija en 2 MW, las pérdidas se minimizan si el sistema se ubica en el nudo 10 como se comprueba en la figura 8.56.

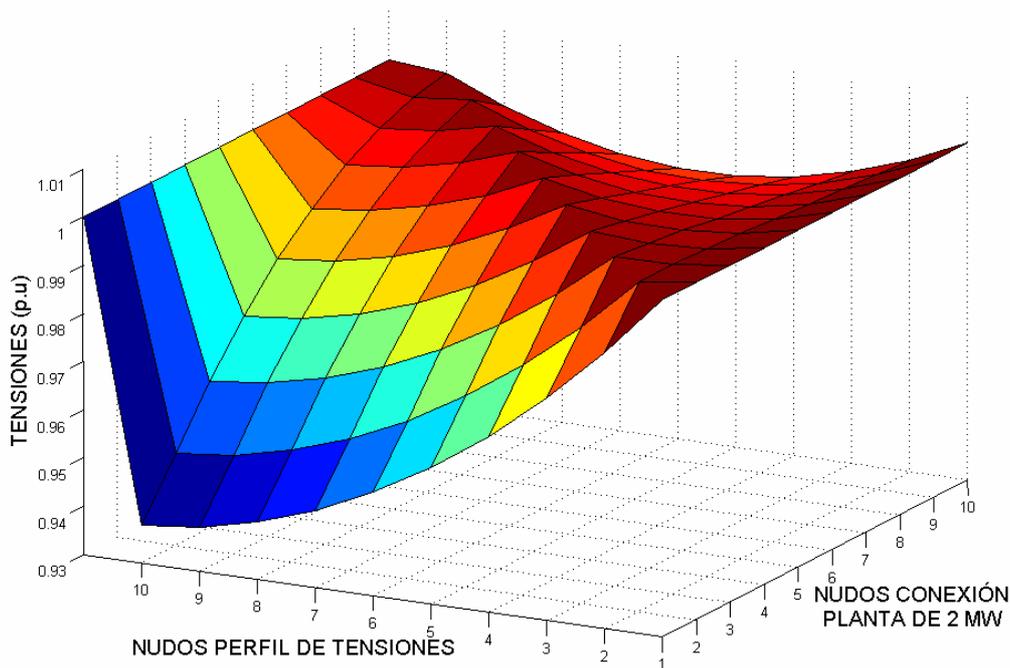


**Figura 8.56:** Costes de pérdidas en función del nudo donde se conecta un sistema de 2 MW.

La ubicación y tamaño del sistema GD está condicionada al perfil de tensiones que se obtiene para garantizar la calidad del suministro ( $0,95 \leq V_i \leq 1,05$ ).

El perfil de tensiones que tiene la red sin sistema GD se ha representado en la figura 8.48, en la que se muestran nudos que están por debajo de 0,95. Sin embargo, con GD se puede comprobar que las tensiones se encuentran en rangos aceptables en todos los supuestos y nudos, para una potencia de generación igual o superior a 2 MW. Se exceptúa cuando el sistema se conecta al nudo 2, y evidentemente, al nudo 1.

En la figura 8.57 se observa que en la red de distribución elegida, el perfil de tensiones se mejora siempre, independientemente de donde se conecte el sistema de generación de 2 MW. No obstante, cuando el sistema se conecta a los nudos 1 o 2 existen nudos con tensiones inferiores a 0,95 p.u.



**Figura 8.57:** Perfiles de tensiones con un sistema de 2 MW.

## 8.5 OPTIMIZACIÓN DE PLANTA SOFC-TG MEDIANTE EL ALGORITMO PSO Y CONSIDERANDO RESTRICCIONES DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN

En este apartado se pretende calcular la optimización de una planta SOFC-TG considerando restricciones impuestas por la red de distribución. En concreto, en la primera simulación se calcula, desde el punto de vista del inversor, la ubicación que maximiza el VAN de una planta que no supera los 2 MW de capacidad, pero teniendo en cuenta que su conexión a la red de distribución debe garantizar que las tensiones de todos los nudos estén en unos márgenes aceptables ( $0,95 \leq V_i \leq 1,05$ ). En la segunda simulación, se afronta el cálculo de la mejor ubicación de la planta de 2 MW desde un punto de vista global, teniendo en cuenta los intereses del inversor y la empresa distribuidora de energía, de acuerdo a lo planteado en el apartado 6.7 del capítulo 6 y manteniendo las tensiones admisibles en todos los nudos en los rangos establecidos.

Antes de acometer la simulación, exponer y analizar los resultados se define la región en la que se debe de localizar la planta.

### 8.5.1 Región 2

Se dispone de una nueva región constituida por parcelas de superficie constante,  $S_i = 0,0625 \text{ km}^2$ . La superficie total de la región es de  $651,9375 \text{ km}^2$  distribuida en 10431 parcelas. Al igual que en los casos incluidos en el apartado 8.3, los valores de  $U_i$ ,  $D_i$ ,  $PCI_i$ ,  $R_{gas,i}$ ,  $L_{LE}$ ,  $dist(p,i)$  y  $CRu_i$  varían para cada una de las parcelas.

Al igual que la región 1 definida en 8.3.1, esta región que se presenta y las características de cada parcela no se corresponden con ningún caso real. La posición de cada parcela viene dada en función de los componentes X e Y. La situación y sentido de los ejes X e Y son los mismos en todas las figuras. El criterio utilizado es que la parcela (1, 1) se corresponde con la situada en el extremo superior izquierdo.

La figura 8.58 presenta la región 2, así como la red eléctrica disponible para la conexión de la planta de generación. La red es la misma que se analiza en el apartado 8.4 y está definida en la figura 8.47 y tabla 8.39. Por tanto, se compone de 10 nudos, separados a una distancia constante de 3 km, con una carga por nudo de 0,5 MW. La tensión nominal de la red es de 25 kV. La planta de generación dispone de 10 posibles puntos de conexión.

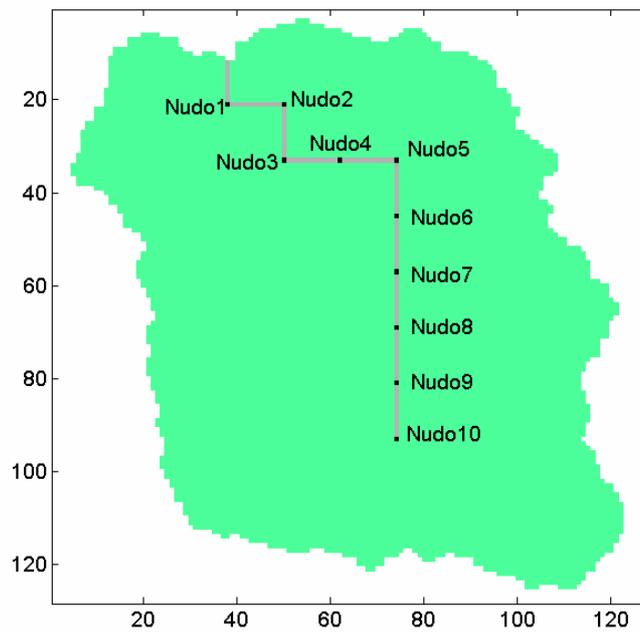
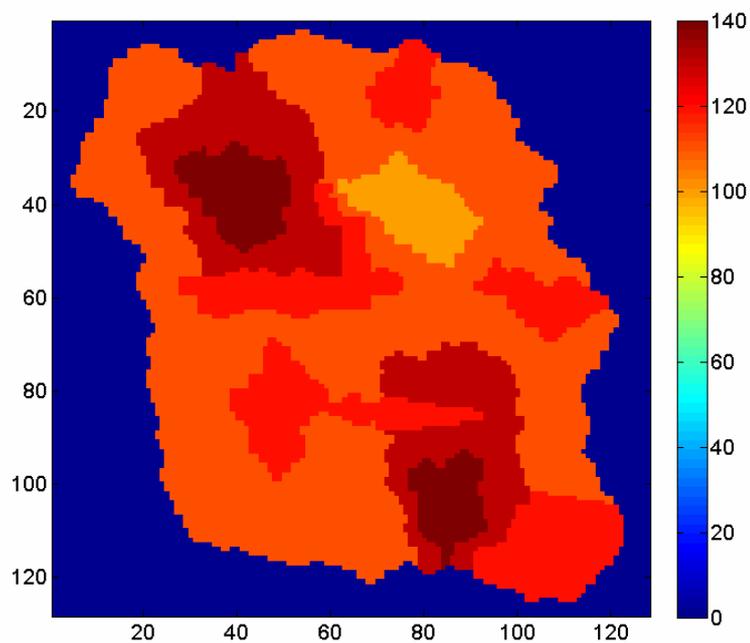
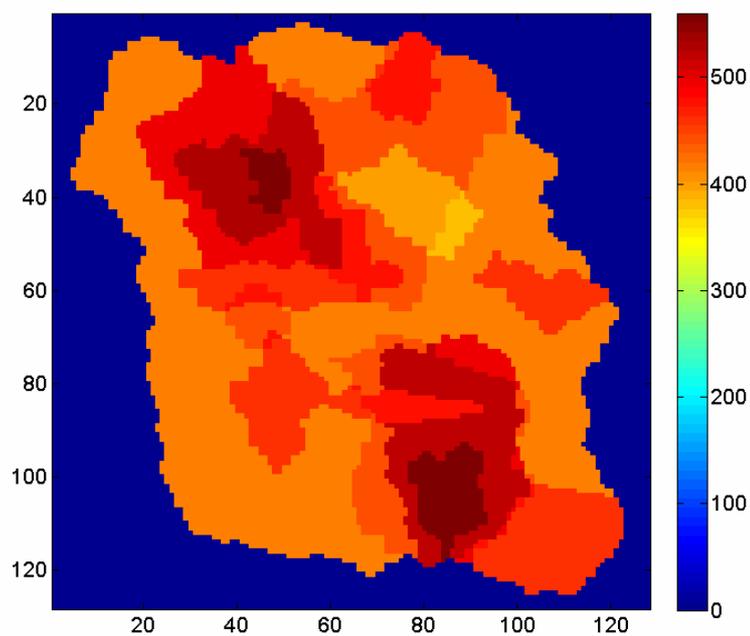


Figura 8.58: Región 2 con red de distribución de 10 nudos.

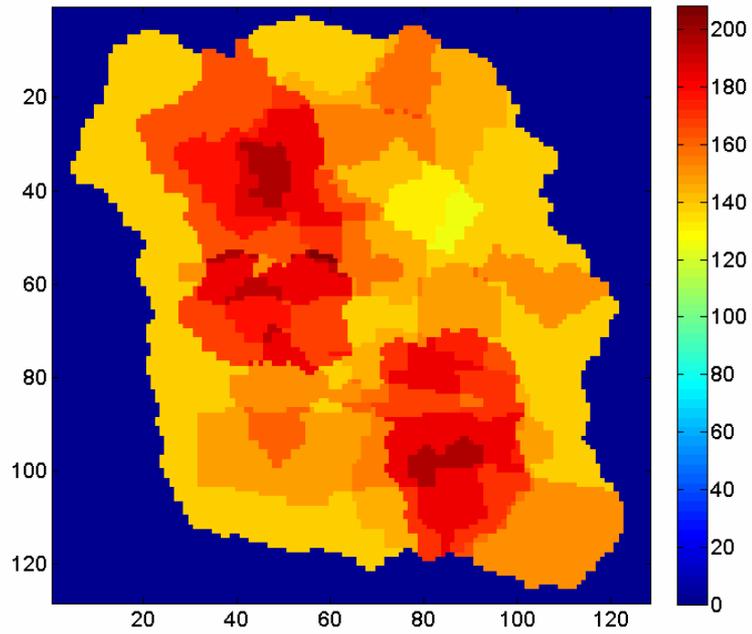
La figura 8.59 muestra la cantidad media de residuos forestales por unidad de superficie que se producen cada año. El mapa refleja los valores que toma  $D_i$  en cada una de las parcelas. El potencial energético de la biomasa disponible medido en MWh/año se representa en la figura 8.60 en función de  $S_i$ ,  $D_i$  y  $PCI_i$ . La figura 8.61 muestra el potencial energético de la biomasa utilizable en su cálculo y representación intervienen  $S_i$ ,  $D_i$ ,  $PCI_i$  y  $U_i$ . El coste de recogida de la biomasa,  $CRu_i$ , se representa en la figura 8.62.



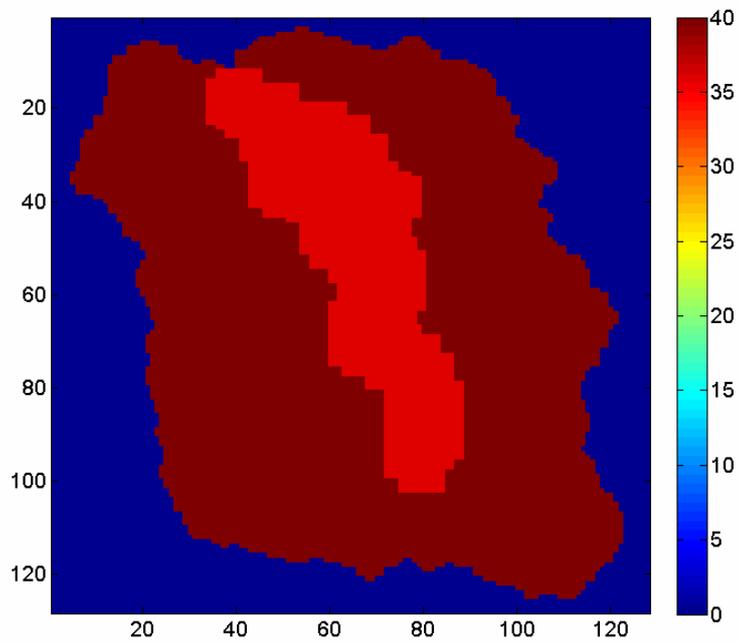
**Figura 8.59:** Región 2 - Potencial de residuos forestales (toneladas de biomasa seca / km<sup>2</sup> año).



**Figura 8.60:** Región 2 - Potencial energético de la biomasa disponible (MWh / año)



**Figura 8.61:** Región 2 - Potencial energético de la biomasa utilizable (MWh / año)



**Figura 8.62:** Región 2 - Coste de recogida de la biomasa (€/tonelada).

Finalmente, los tipos de residuos que se generan en cada parcela se representan en la figura 8.63. Los residuos se definen por la composición de los gases que se generan en su gasificación. La tabla 8.40 muestra la composición del gas resultante de la gasificación por tonelada de residuo utilizado, así como las cantidades correspondientes de hidrógeno equivalente y el valor de  $R_{gas,i}$ .

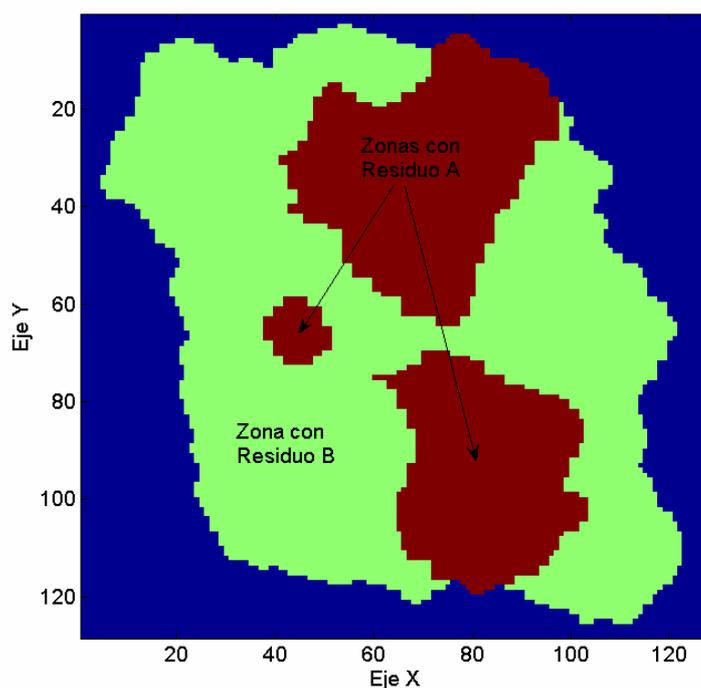


Figura 8.63: Región 2 – Distribución del tipo residuos generados.

Tabla 8.40: COMPOSICIÓN DEL GAS EN KMOLES POR TONELADA DE RESIDUO [140]

<i>Tipo de Residuo</i>	<i>Composición gases (kmoles/tonelada res.)</i>			<i>Parámetros aplic. kmoles/tonelada res.</i>		<i>PCI en (MWh/tonelada)</i>
	$H_2$	$CO$	$CH_4$	$H_{2eq}$	$R_{gas,i}$	$PCI_i$
Residuo A	21	25	6,4	71,6	71,6	4
Residuo B	20	24	6	68	68	3,8

## 8.5.2 Ubicación óptima de planta de 2 MW en región 2 (simulación SIM15)

En esta simulación se pretende calcular la ubicación óptima de una planta de 2 MW en la región 2. La función objetivo es el Valor Actual neto,  $VAN$ . En este caso, el precio de venta de la energía producida,  $p_g$ , es igual a 128 €/MWh, ya que la potencia no supera los 2 MW [116]. El resto de parámetros de entrada son los indicados en la tabla 8.4 y los propios de cada parcela.

La simulación se lleva a cabo utilizando el algoritmo PSO propuesto en esta Tesis y la versión de algoritmos genéticos mostrada en el apéndice II. Se realizan 10 ejecuciones con cada técnica.

Se establecen para el algoritmo PSO  $P = 40$ ,  $N = 20$  y  $t_{max} = 60$ , y para el algoritmo genético, AG,  $P = 50$ ,  $N = 20$  y  $t_{max} = 60$ . En la búsqueda de la mejor solución, tanto PSO como AG, solamente consideran soluciones válidas aquellas que ocasionan tensiones en los nudos entre 0,95 y 1,05 p.u., por tanto, se desechan las que no cumplen con esta restricción técnica. Los resultados obtenidos con el algoritmo PSO se detallan en las tablas 8.41 y 8.42:

**Tabla 8.41:** RESULTADOS SIMULACIÓN SIM15

<b>VARIABLE</b>	<b>VALOR</b>
<i>SITUACIÓN DELA PLANTA</i>	(52, 30)
<i>SUPERFICIE RECOGIDA BIOMASA (km<sup>2</sup>)</i>	155,8125
<i>VALOR ACTUAL NETO, VAN (10<sup>6</sup> € = M€)</i>	8,78
<i>INDICE DE RENTABILIDAD, IR</i>	2,21
<i>POTENCIA ELECTRICA, P<sub>e</sub> (MW)</i>	2,00

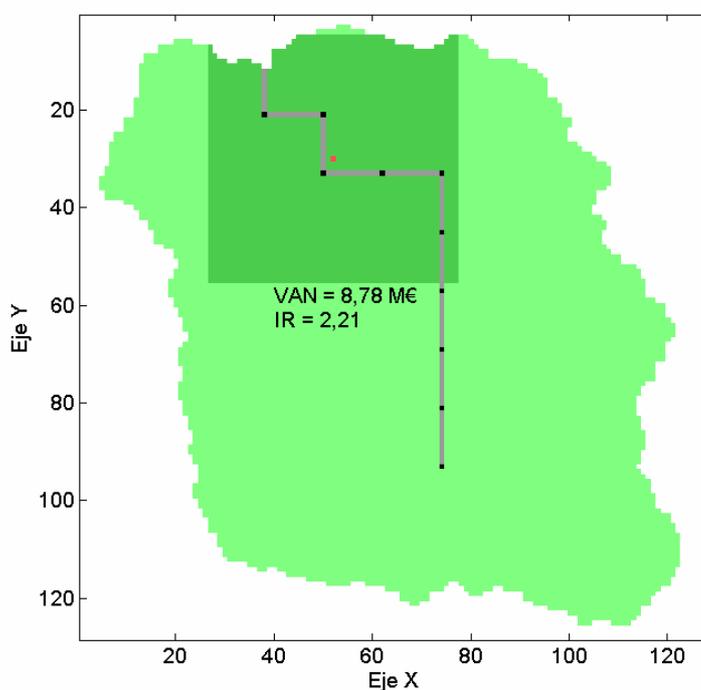
**Tabla 8.42:** ESTADÍSTICAS SIMULACIÓN SIM15 CON PSO

<b>VARIABLE</b>	<b>VALOR</b>
<i>VALOR MEDIO DEL VAN</i>	8,76 M€
<i>VAN OPTIMO</i>	8,78 M€
<i>DESVIACIÓN TÍPICA</i>	0,0002 M€

En la tabla 8.43 se indican el valor medio, el óptimo y la desviación típica obtenida aplicando algoritmos genéticos:

**Tabla 8.43:** ESTADÍSTICAS SIMULACIÓN SIM15 CON AG

VARIABLE	VALOR
VALOR MEDIO DEL VAN	8,73 M€
VAN OPTIMO	8,76 M€
DESVIACIÓN TÍPICA	0,0002 M€



**Figura 8.64:** SIM15 – Ubicación óptima de planta de 2 MW en región 2.

La figura 8.64 muestra la solución encontrada con la aplicación del algoritmo. El nudo de conexión de la planta a la red es el 3. El perfil de tensiones obtenido con esta solución es el que se representa en la figura 8.65, en la que se observa que las tensiones en todos los nudos están entre los valores de 0,95 y 1,05 p.u. El nudo 11 se corresponde con el sistema de generación SOFC-TG.

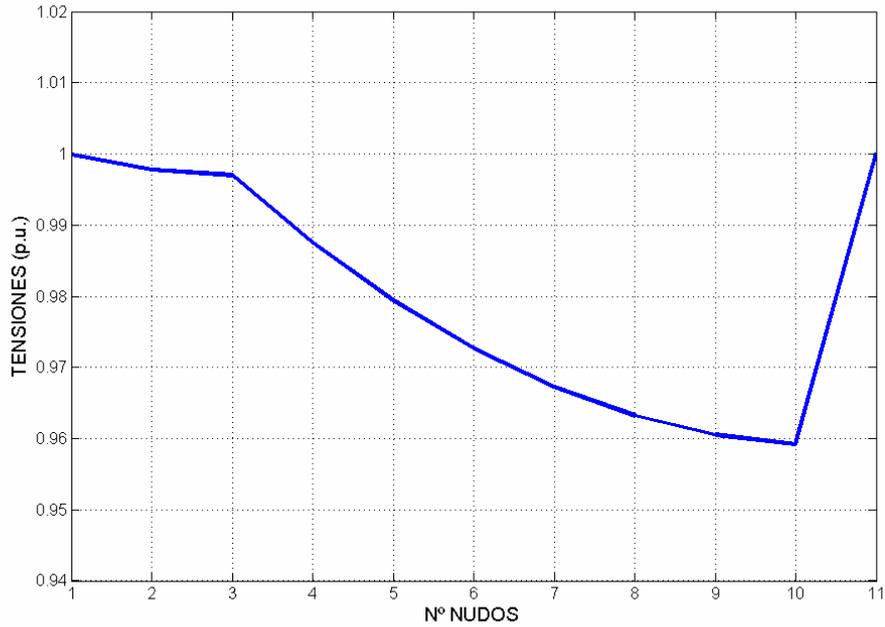


Figura 8.65: Perfil de tensiones con el sistema de 2 MW situado en (52, 30) y conectado al nudo 3.

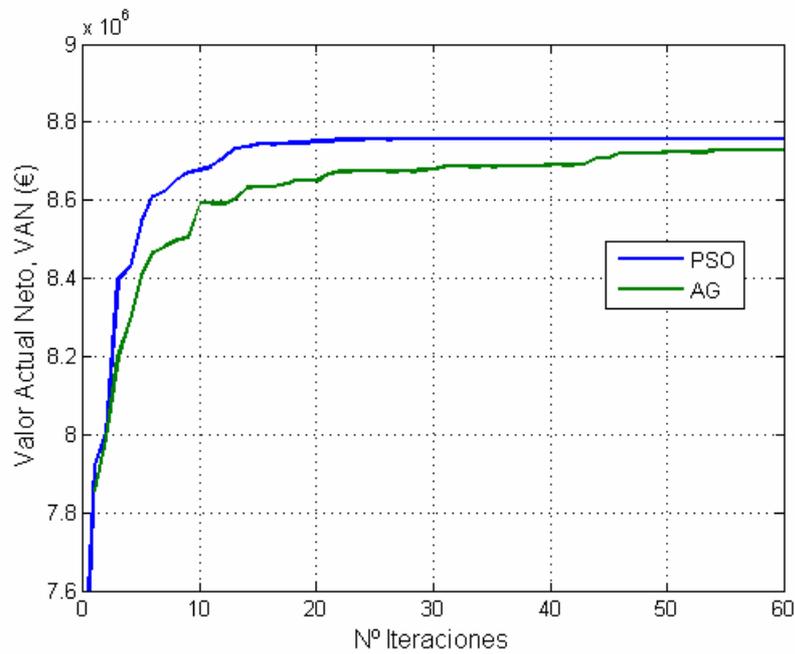


Figura 8.66: SIM15 - Evolución del VAN en función del número de iteraciones ( $P_e = 2$  MW).

En la figura 8.66 se muestra la evolución de la función objetivo para los dos algoritmos. Una vez más, se pone de manifiesto la mayor eficacia, eficiencia y robustez

que posee el algoritmo PSO frente al AG en este tipo de problemas. La convergencia a la mejor solución encontrada por PSO se consigue en aproximadamente 25 iteraciones, mientras que AG necesita más de 50. La media de las soluciones encontradas con el algoritmo PSO es superior a la encontrada con AG.

De nuevo se observa que cuanto más complejo es el problema más diferencia hay entre las soluciones encontradas y se notan las ventajas del PSO con respecto al AG. Es lo que ocurre en este caso, ya que el grado de dificultad aumenta debido a la incorporación de restricciones.

El coste computacional es el mismo para los dos algoritmos tal y como se indica en la tabla 8.44.

**Tabla 8.44:** NÚMERO DE EVALUACIONES DE LA FUNCIÓN OBJETIVO

TÉCNICA	NÚMERO DE EVALUACIONES
<i>PSO PROPUESTO</i>	$P \cdot t_{\max} = 40 \cdot 60 = 2400$
<i>ALGORITMO GÉNÉTICO</i>	$[P \cdot IS/2] \cdot 2 \cdot t_{\max} = [50 \cdot 0.8/2] \cdot 2 \cdot 60 = 2400$

### 8.5.3 Ubicación óptima de planta de 2 MW en región 2 desde un punto de vista global (simulación SIM16)

En este último caso, se aborda la optimización de la ubicación de la planta de 2 MW desde un punto de vista global, tal y como se indica en el apartado 6.5 del capítulo 6. Se trata de maximizar el valor actual neto global,  $VANG$ , definido en la ecuación (6.54) obteniendo así la mejor solución global que cumple conjuntamente con los objetivos económicos del inversor y la empresa distribuidora eléctrica. La simulación se lleva a cabo realizando 10 ejecuciones con el algoritmo PSO y con los algoritmos genéticos.

Sólo se consideran soluciones aceptables aquellas que ocasionan tensiones en los nudos entre 0,95 y 1,05 p.u. Para ello, se condicionan los resultados del algoritmo desechando las soluciones que no cumplen con esta restricción técnica.

Además de los datos especificados en la tabla 8.4 y los que poseen las parcelas de la región 2, para esta simulación se considera que:

- El precio de venta de la energía producida, inyectada a la red,  $p_g$ , es igual a 128 €/MWh, ya que la potencia es igual a 2 MW [116]. Por ello, el coste unitario de la energía procedente del sistema de Generación Distribuida,  $C_{UGD}$ , toma el mismo valor.
- El coste unitario de la energía en la red,  $C_{UE}$ , es de 80 €/MWh.
- El número de horas de consumo medio anual,  $N_{HA}$ , es de 7500 horas.
- Para el cálculo del  $VAP$  se adopta  $r_p = 0,04$ .

La función objetivo es el  $VANG$ . Al intervenir en el resultado el valor actual de las pérdidas de energía en la red,  $VAP$ , la localización no tiene por qué ser la misma que en el caso anterior. La restricción técnica de la tensión incrementa la dificultad en la búsqueda de la solución. Para la aplicación del algoritmo PSO se tienen en cuenta que  $P = 40$ ,  $N = 20$  y  $t_{max} = 60$ , y para el AG,  $P = 50$ ,  $N = 20$  y  $t_{max} = 60$

Las tablas 8.45 y 8.46 detallan los resultados obtenidos tras realizar las 10 ejecuciones con el algoritmo PSO.

**Tabla 8.45: RESULTADOS SIMULACIÓN SIM16**

<b>VARIABLE</b>	<b>VALOR</b>
<i>SITUACIÓN DELA PLANTA</i>	(73, 96)
<i>SUPERFICIE RECOGIDA BIOMASA (km<sup>2</sup>)</i>	153,625
<i>POTENCIA ELÉCTRICA, P<sub>e</sub> (MW)</i>	2,00
<i>VALOR ACTUAL NETO GLOBAL, VANG (10<sup>6</sup> € = M€)</i>	8,25
<i>VALOR ACTUAL NETO, VAN (10<sup>6</sup> € = M€)</i>	8,69
<i>VALOR ACTUAL DE PERDIDAS, VAP (10<sup>6</sup> € = M€)</i>	0,44
<i>NUDO DE CONEXIÓN</i>	10
<i>DISTANCIA ENTRE PLANTA Y NUDO DE CONEXIÓN (km)</i>	0,79

**Tabla 8.46:** ESTADÍSTICAS SIMULACIÓN SIM16 CON PSO

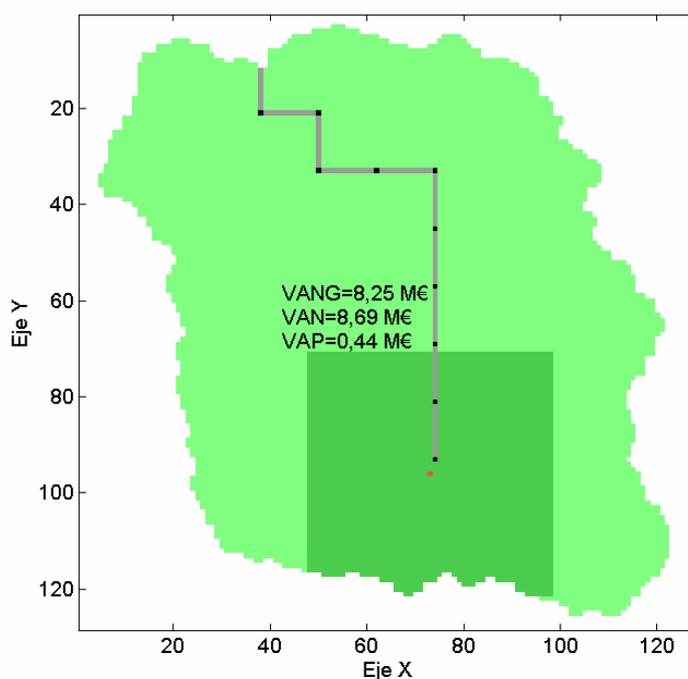
VARIABLE	VALOR
VALOR MEDIO DEL VAN	8,22 M€
VAN OPTIMO	8,25 M€
DESVIACIÓN TÍPICA	0,0004 M€

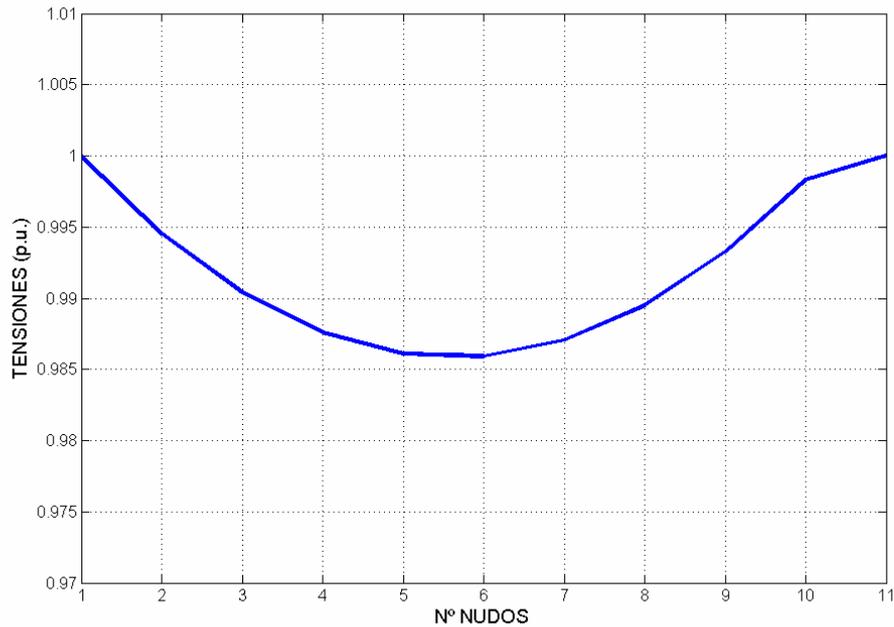
En la tabla 8.47 se indican el valor medio, el óptimo y la desviación típica obtenida aplicando algoritmos genéticos:

**Tabla 8.47:** ESTADÍSTICAS SIMULACIÓN SIM16 CON AG

VARIABLE	VALOR
VALOR MEDIO DEL VAN	8,09 M€
VAN OPTIMO	8,22 M€
DESVIACIÓN TÍPICA	0,0006 M€

La figura 8.67 muestra la localización óptima obtenida. El nudo de conexión en la red es el 10, el más próximo a la planta. En la figura 8.68 se observa que los niveles de tensión son aceptables en todos los nudos cumpliendo con la restricción técnica impuesta. El nudo 11 se corresponde con el sistema de generación SOFC-TG.

**Figura 8.67:** SIM16 – Óptima ubicación global para  $P_e=2$  MW.



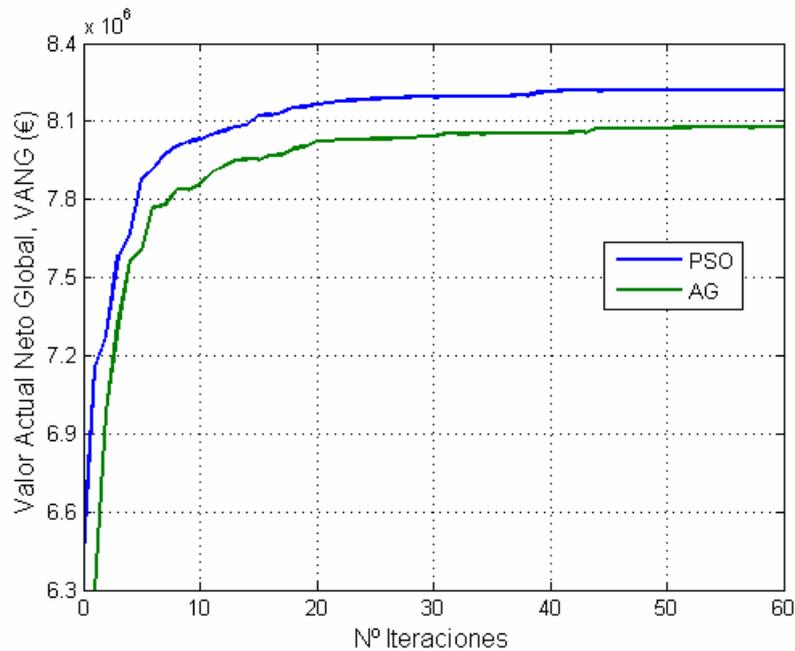
**Figura 8.68:** Perfil de tensiones con el sistema de 2 MW situado en (73,96) y conectado al nudo 10.

El coste computacional es el mismo para los dos algoritmos tal y como se indica en la tabla 8.48.

**Tabla 8.48:** NÚMERO DE EVALUACIONES DE LA FUNCIÓN OBJETIVO

TÉCNICA	NÚMERO DE EVALUACIONES
<i>PSO PROPUESTO</i>	$P \cdot t_{\max} = 40 \cdot 60 = 2400$
<i>ALGORITMO GÉNÉTICO</i>	$[P \cdot IS/2] \cdot 2 \cdot t_{\max} = [50 \cdot 0.8/2] \cdot 2 \cdot 60 = 2400$

En la figura 8.69 se muestra la evolución de la función objetivo para los dos algoritmos. Una vez más, se pone de manifiesto la mayor eficacia, eficiencia y robustez que posee el algoritmo PSO frente al AG en este tipo de problemas. La convergencia a la mejor solución encontrada por PSO se consigue en aproximadamente 40 iteraciones, mientras que AG necesita más de 50. La media de las soluciones encontradas con el algoritmo PSO es superior a la encontrada con AG.



**Figura 8.69:** SIM16 - Evolución del  $VANG$  en función del número de iteraciones ( $P_e=2$  MW).

Este caso es aún más complejo que el anterior, ya que aunque sólo hay una función objetivo que es el  $VANG$ , éste resulta de restar el  $VAP$  al  $VAN$ , dos funciones totalmente independientes, además, la dificultad que supone descartar algunas soluciones encontradas porque no cumplen con la restricción de las tensiones. En este caso, son bastante notables las diferencias en los resultados obtenidos con el algoritmo PSO y con AG. Las ventajas del PSO se hacen más evidentes por el valor de la solución, la eficacia, la convergencia, la eficiencia y la robustez conseguida.

Los resultados que se obtuvieron en el apartado 8.4, y en concreto, los reflejados en la gráfica de la figura 8.56, ya anticipaban que para una potencia de 2 MW los costes de pérdidas anuales eran mínimos si el sistema se conectaba en los nudos 8, 9 y 10.

El  $VAN$  correspondiente a la inversión de la planta tiene un valor muy próximo a la solución de la simulación anterior, SIM15 (apartado 8.5.2). Sin embargo, la función global objetivo,  $VANG$ , depende también del  $VAP$ , que en este caso, decide que la planta se sitúe muy próxima y se conecte al nudo 10 de la red.

## **8.6 CONCLUSIONES GENERALES DEL MODELO CON EL USO DEL ALGORITMO PSO**

A lo largo de este capítulo se han llevado a cabo diversas simulaciones y, en cada una de ellas, se han manifestado varias observaciones y/o conclusiones, de forma puntual o con carácter general, de la aplicación del algoritmo PSO en el método de resolución empleado. No obstante, a modo de resumen, se van a indicar una serie de conclusiones generales sobre el modelo utilizado:

- Con las simulaciones realizadas se justifica la validez de las técnicas metaheurísticas y, especialmente, del algoritmo PSO propuesto para la resolución del problema de optimización aquí planteado. Suponiendo que la dimensión del problema a resolver es de 20 y se ejecuta el algoritmo empleando 60 iteraciones con una nube compuesta por 30 partículas, el coste computacional es como mínimo  $2^{20}/(60 \cdot 30) \approx 600$  veces menor que el requerido por un método convencional de búsqueda exhaustiva.
- El algoritmo PSO presenta varias ventajas (robustez, eficacia, eficiencia, etc.) con respecto al algoritmo base de Afshinmanesh y los algoritmos genéticos. Con el algoritmo PSO propuesto se alcanzan siempre mejores soluciones y las modificaciones realizadas para la mejora del funcionamiento del algoritmo PSO binario quedan justificadas. En estos problemas tan complejos que intervienen numerosas variables y disponen de varios máximos locales, se hace imprescindible que el algoritmo explore más intensamente al principio para que la experiencia adquirida en todo el espacio de búsqueda se aproveche al máximo en las iteraciones posteriores.
- La calidad de la solución y el tiempo de resolución del algoritmo empleado dependen, fundamentalmente, de la dimensión del problema (codificación de la partícula) el número de partículas utilizado y el número de iteraciones que

realiza el algoritmo. El número de parcelas del espacio de búsqueda influye notablemente en el valor de todos estos parámetros.

- Cada vez que se han incorporado restricciones técnicas, como la limitación de la potencia de generación, el mantenimiento de las tensiones de los nudos de la red en unos rangos reglamentarios o admisibles o la consideración simultánea de dos funciones objetivo independientes, la complejidad del problema y la dificultad en la búsqueda de la solución han aumentado considerablemente. En estos casos, se observa con mayor claridad la diferencia existente entre el rendimiento del algoritmo PSO y los algoritmos genéticos utilizados.
  
- El modelo técnico, económico y geográfico completo utilizado, a priori, es válido para cualquier sistema de generación que aprovecha la biomasa residual como combustible. Únicamente hay que adaptarlo sustituyendo el modelo técnico del sistema de generación y cambiar los parámetros económicos característicos.

