

TRABAJO FIN DE GRADO

Grado en Ingeniería Informática

UNIVERSIDAD DE ALMERIA

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR Y
FACULTAD DE CIENCIAS EXPERIMENTALES

Métodos de optimización estocásticos en
centrales heliotérmicas de torre

Curso 2013/2014

Alumno/a:

Nicolás Calvo Cruz

Director/es:

Pilar Martínez Ortigosa
Manuel Berenguel Soria





En este proyecto se aborda el diseño y la optimización del campo solar de las centrales heliotérmicas o termosolares de torre.

Este tipo de centrales se caracterizan por contar con un conjunto de elementos reflectores, denominados helióstatos, que siguen el movimiento aparente del Sol y tienen como objetivo redirigir y concentrar la radiación solar incidente hacia un receptor situado en una torre. El receptor, por la elevada densidad de radiación que recibe, alcanza elevadas temperaturas que pueden emplearse para la generación de energía eléctrica, fines industriales y también aplicaciones científicas.

El diseño del campo solar, entendido como la distribución de los helióstatos en torno al receptor, es muy importante para explotar el potencial de este tipo de centrales y da lugar a variados y complejos problemas de optimización. En este contexto, para el proyecto se define un problema de optimización en el que se pretende maximizar el rendimiento óptico de los campos solares diseñados y se estudia el desempeño de dos enfoques estocásticos de optimización, en comparación a uno determinista, en su resolución. El enfoque determinista es de naturaleza voraz mientras que los estocásticos son una metaheurística basada en poblaciones y un esquema totalmente aleatorio.

El problema planteado se divide a su vez en dos variantes paralelas con el mismo objetivo. En una de ellas, los optimizadores han de operar sobre las variables de un modelo de diseño que define la distribución de los helióstatos mientras que, en la otra, los optimizadores han de seleccionar un conjunto de posiciones del total disponible. Por consiguiente, los tres enfoques se contextualizan para cada una de las variantes.

La consecución de este objetivo de base requiere crear un marco ideal y uniforme sobre el que afrontar el estudio comparativo. La construcción de este entorno conlleva diseñar un modelo de rendimiento óptico que actúe como función objetivo y pueda valorar el rendimiento óptico de distintos campos solares, un modelo de diseño que permita generar distintas distribuciones de helióstatos y un sistema de generación de posiciones así como la aplicación de los tres principios de optimización generales expuestos a cada variante del problema. Además, se realizan ciertos estudios sobre el contexto ideal planteado.

A mi familia, mis amigos y mis tutores

Agradecimientos

Me gustaría aprovechar estas líneas para dejar constancia por escrito de mi gratitud, en primer lugar, a mi familia y, especialmente, a mis padres. Han soportado pacientemente mis frustraciones y celebrado con alegría mis logros ayudándome así a haber conseguido realizar finalmente este proyecto.

En segundo lugar, me gustaría agradecer muy sinceramente a mis tutores, Pilar Martínez Ortigosa, Manuel Berenguel Soria y Juana López Redondo. Su apoyo, dedicación y paciencia, además de lo que me han enseñado, merecen ser especialmente destacados. No han dudado nunca en compartir su tiempo conmigo para ayudarme y, sin ellos, no habría logrado absolutamente nada.

En tercer lugar, considero también importante expresar mi agradecimiento a mis profesores de la carrera. Su dedicación y esmero en formarnos lo mejor que han sabido, a mis compañeros y a mí estos cuatro años, ha sido y será fundamental para todo aquello que emprendamos.

En cuarto lugar, a mis amigos y compañeros que me han aportado mucho a nivel personal e intelectual todos estos años. De ellos menciono a José Roberto Salas, que no ha dudado en dejarme su PC para hacer pruebas y mediciones adicionales, a Juan de Dios Martos, que siempre se ha interesado por mi trabajo y me ha ayudado en todo lo que ha podido, a Andrés Vicente y David Ortiz, por orientarme en temas de “logística” y trámites de este proyecto con tanta paciencia, y a Rocío Sánchez, por su apoyo constante.

Finalmente, pido disculpas si he dejado a alguien sin nombrar explícitamente por descuido o simplemente por haberlo incluido en un colectivo. Sin embargo, y aunque a veces no sea muy expresivo, no debe dudar nunca de mi gratitud y de que su ayuda quedará para siempre en mi memoria.

Índice general

Capítulo 1. Interés y objetivos	18
1.1.- Introducción	18
1.2.- Justificación e intereses	22
1.3.- Objetivos	24
Capítulo 2. Revisión bibliográfica	27
2.1.- El campo solar de las centrales de torre	28
2.1.1.- Introducción.....	28
2.1.2.- Helióstatos	29
2.1.3.- Receptor.....	32
2.1.4.- Diseño y optimización del campo solar	34
2.1.5.- Modelado del rendimiento del campo solar	40
2.2.- Ángulos entre el Sol y la Tierra	49
2.2.1.- Movimiento espacial de la Tierra	49
2.2.2.- Ángulo de declinación.....	51
2.2.3.- Hora solar.....	52
2.2.4.- Hora angular	52
2.3.- Métodos heurísticos de optimización.....	53
2.3.1.- Problemas de optimización global.....	53
2.3.2.- Técnicas de optimización global	55
2.3.3.- Clasificación básica de los métodos heurísticos	58
2.3.4.- Búsqueda aleatoria pura.....	61
2.3.5.- Heurística voraz	63
2.3.6.- Recocido simulado	68
2.3.7.- Algoritmos genéticos	71
2.3.8.- Algoritmos genéticos niching.....	81
2.3.9.- Algoritmos meméticos.....	84
2.4.- Perspectiva general de la computación paralela	87
2.4.1.- Introducción.....	87

2.4.2.- Clasificación de las arquitecturas paralelas.....	88
2.4.3.- Arquitecturas paralelas MIMD	88
2.4.4.- Retos de la computación paralela	91
Capítulo 3. Materiales y métodos.....	92
3.1.- Planteamiento del problema	93
3.2.- Fases y metodología de desarrollo	96
3.3.- Materiales	98
3.4.- Modelo de ubicación.....	101
3.5.- Modelo de rendimiento óptico.....	109
3.5.1.- Sistemas de coordenadas de la central	110
3.5.2.- Cálculo del ángulo de declinación	110
3.5.3.- Hora de amanecer y anochecer.....	111
3.5.4.- Posicionamiento aparente del Sol.....	112
3.5.5.- Densidad de radiación directa instantánea	114
3.5.6.- Formulación del modelo.....	115
3.5.7.- Factor coseno.....	116
3.5.8.- Factor de atenuación atmosférica.....	117
3.5.9.- Factor de reflectividad.....	118
3.5.10.- Orientación de los helióstatos	118
3.5.11.- Factor de bloqueo y sombreado.....	121
3.5.12.- Muestreo del tiempo	128
3.5.13.- Ciclo de simulación	132
3.5.14.- Paralelización del ciclo de simulación.....	134
3.6.- Algoritmos aplicados a la optimización del campo solar.....	135
3.6.1.- Introducción.....	135
3.6.2.- Búsqueda aleatoria pura.....	137
3.6.3.- Algoritmo de carácter voraz	138
3.6.4.- Búsqueda aleatoria pura de acceso directo	140
3.6.5.- Algoritmo voraz de acceso directo	143
3.6.6.- Algoritmo UEGO.....	145
3.6.7.- Algoritmo GASUB: UEGO para problemas de localización discreta	155
Capítulo 4. Resultados y discusión.....	160

4.1.- Introducción	161
4.2.- Condiciones generales de experimentación	162
4.3.- Impacto computacional del factor de bloqueo y sombreado sobre el rendimiento óptico	163
4.4.- Resultados de la paralelización del modelo de rendimiento.....	173
4.5.- Muestreos alternativos aplicados sobre el tiempo	177
4.6.- Resultados del proceso de optimización sobre la distribución de los helióstatos	180
4.6.1.- Presentación	180
4.6.2.- Resultados de la optimización realizada sobre la segunda variante del problema	181
4.6.3.- Resultados de la optimización realizada sobre la primera variante del problema	190
Capítulo 5. Conclusiones	197
5.1.- Conclusiones finales.....	197
5.2.- Mejoras y líneas futuras.....	198
Bibliografía	200
Apéndice A. Aspectos matemáticos.....	204
A.1.- Conversión entre coordenadas cartesianas y polares.....	204
A.2.- La circunferencia.....	206
A.3.- La recta en el espacio.....	207
A.4.- El plano.....	208
A.5.- Intersección de recta y plano.....	210
A.6.- Pertenencia de un punto a un rectángulo sobre un plano en el espacio.....	210
A.7.- Distancia de un punto a un segmento en el plano	212
A.8.- Adaptación de coordenadas de un plano 2D orientado a 3D	214
Apéndice B. Herramientas auxiliares desarrolladas	218
B.1.- Utilidad de representación de campos de helióstatos	218
B.2.- Utilidad de transcripción de puntos del helióstato al espacio	219
B.3.- Utilidad de orientación de helióstatos	219
B.4.- Utilidad de cálculos relacionados con el Sol	220
Apéndice C. Adaptación de UEGO y GASUB	222
C.1.- Adaptación de UEGO	222
C.2.- Adaptación de GASUB.....	226

Apéndice D. Datos empíricos adicionales	229
D.1.- Información adicional sobre los promedios para el estudio del impacto del factor de bloqueo y sombreado	229
D.2.- Información adicional sobre los promedios para el estudio de la aceleración obtenida con la paralelización del modelo de rendimiento.....	233
D.3.- Información adicional sobre los promedios para el estudio de distintos sistemas de muestreo del tiempo.....	234
D.4.- Información adicional para el estudio del rendimiento de los optimizadores sobre la segunda vertiente del problema	236
D.5.- Información adicional para el estudio del rendimiento de los optimizadores sobre la primera vertiente del problema.....	241

Listado de abreviaturas

AG:	Algoritmos G enéticos
AGN:	Algoritmos G enéticos tipo N iching
AM:	Algoritmos M eméticos
AV:	Algoritmos V oraces
BAP:	B úsqueda A leatoria P ura
FAE:	Familia de A lgoritmos E volutivos
GASUB:	G enetic A lgorith with SUB population support
OG:	O ptimización G lobal
OV:	O ptimizador V oraz
RS:	R ecocido S imulado
SASS:	S ingle A gent S tochastic S earch
UEGO:	U niversal E volutionary G lobal O ptimizer

Índice de figuras

Figura 1.1.- Esquemas de concentración solar	20
Figura 1.2.- Esquema de una central heliotérmica de torre	21
Figura 1.3.- Esquema simplificado de los elementos del proyecto	25
Figura 2.1.- Central heliotérmica de torre	28
Figura 2.2.- Esquema básico de un heliostato	29
Figura 2.3.- Planos de reflexión de la luz solar hacia el receptor.....	30
Figura 2.4.- Grados de libertad Azimut-Elevación de un heliostato	31
Figura 2.5.- Receptores externo y de cavidad.....	33
Figura 2.6.- Diseño de un campo solar de 317 heliostatos en torno al receptor	35
Figura 2.7.- Diseño de un campo solar con esquema Norte-Sur	36
Figura 2.8.- Esquema de Radial Staggered.....	37
Figura 2.9.- Central PS10 rediseñada con la heurística de “Phyllotaxis Spiral”	39
Figura 2.10.- Repercusión práctica del Factor Coseno sobre los heliostatos	43
Figura 2.11.- Transmitancia atmosférica según distancia y estado atmosférico.....	45
Figura 2.12.- Bloqueo y sombreado entre heliostatos.....	46
Figura 2.13.- Movimiento de traslación terrestre con variaciones de la distancia Sol-Tierra, puntos y fechas singulares para 1981	50
Figura 2.14.- Representación del ángulo de declinación	51
Figura 2.15.- Variación del ángulo de declinación a lo largo del año	51
Figura 2.16.- Representación de la hora angular ω	52
Figura 2.17.- Variación de la hora angular a lo largo del día	53
Figura 2.18.- Ejemplo de relación entre un problema de maximización y de minimización... 54	
Figura 2.19.- Vertientes clásicas de la Optimización Global	58
Figura 2.20.- Clasificación básica de los principales métodos heurísticos.....	60
Figura 2.21.- Selección en dos ámbitos de los algoritmos de las FAE.....	76
Figura 2.22.- Asignación ordenada de espacio por puntuación en una “ruleta” de selección 78	
Figura 2.23.- Esquemas de Reproducción	80
Figura 2.24.- Mutación de un descendiente	81
Figura 2.25.- Comparativa visual entre la pretensión general de un AG y un AG Niching	83

Figura 2.26.- Diagrama de flujo de un algoritmo memético.....	85
Figura 2.27.- Estructura básica de un sistema MIMD de memoria compartida	90
Figura 2.28.- Estructura básica de un sistema MIMD de memoria distribuida	90
Figura 3.1.- Superficie de la central.....	96
Figura 3.2.- Esquema de helióstato empleado	96
Figura 3.3.- Vista cenital de un helióstato.....	103
Figura 3.4.- Sistema de coordenadas polares empleado en la ubicación.....	103
Figura 3.5.- Determinación de la posición azimutal de un helióstato respecto al anterior ..	105
Figura 3.6.- Distribución considerablemente espaciada en circunferencias perfectas	108
Figura 3.7.- Distribución considerablemente espaciada en circunferencias más próximas al Sur.....	108
Figura 3.8.- Distribución considerablemente espaciada en circunferencias más próximas al Norte	109
Figura 3.9.- Sistema de coordenadas	110
Figura 3.10.- Sistema de coordenadas para el posicionamiento aparente del Sol.....	112
Figura 3.11.- Posición aparente del Sol en ubicación y momento concretos.....	113
Figura 3.12.-Definición gráfica del factor coseno	117
Figura 3.13.- Situación angular para el cálculo del factor coseno	117
Figura 3.14.- Vista frontal de un helióstato desde el Norte.....	120
Figura 3.15.- Ejemplos de orientación de un helióstato	120
Figura 3.16.- Bloqueo parcial de H_j a H_i	121
Figura 3.17.- Sombreado parcial de H_j a H_i	122
Figura 3.18.- Circunferencia de interés para el bloqueo y sombreado	123
Figura 3.19.- Discretización de la superficie reflectante del helióstato 2×2 con $s=1$	124
Figura 3.20.- Rectas para el estudio del bloqueo y sombreado.....	125
Figura 3.21.- Selección aceptada de candidatos de bloqueo.....	126
Figura 3.22.- Selección descartada de candidatos de bloqueo.....	127
Figura 3.23.- Ejemplo de valoración de las horas de muestreo	128
Figura 3.24.- Relevancia de los instantes e incrementos en el tiempo	129
Figura 3.25.- Relevancia de los instantes e incrementos en el tiempo	131
Figura 3.26.- Distribución de la función incremento (estacionado)	131
Figura 3.27.- Diagrama global del proyecto	136

Figura 3.28.- Muestreo denso de la superficie de la central de forma radial.....	142
Figura 3.29.- Representación de una subpoblación.....	147
Figura 3.30.- Disminución exponencial del radio entre niveles	147
Figura 3.31.- Desplazamiento de una especie al cambiar su representante	147
Figura 3.32.- Fusión de dos especies.....	150
Figura 3.33.- Esquema estructural del genotipo con un individuo concreto.....	156
Figura 3.34.- Diagrama de flujo del procedimiento Generation_and_crossover	159
Figura 4.1.- Comparativa gráfica entre el tiempo de cómputo del rendimiento óptico con y sin factor de bloqueo sobre los diseños obtenidos tras el proceso optimización.....	167
Figura 4.2.- Evolución del impacto del factor de bloqueo y sombreado (y operaciones derivadas) con el número de helióstatos sobre los diseños optimizados	167
Figura 4.3.- Evolución del impacto de la consideración del factor de bloqueo y sombreado con el número de helióstatos sobre la evolución del rendimiento sobre los diseños optimizados.....	168
Figura 4.4.- Figura 4.4.- Comparativa gráfica entre el tiempo de cómputo del rendimiento óptico con y sin orientación de helióstatos y factor de bloqueo y sombreado sobre los diseños obtenidos mediante selección directa de posiciones (rango [2, 32]).....	169
Figura 4.5.- Evolución del impacto del cálculo de la orientación y el factor de bloqueo y sombreado sobre el tiempo según el número de helióstatos sobre el diseño por selección directa (rango [2,32])	170
Figura 4.6.- Evolución del impacto de la consideración del factor de bloqueo y sombreado con el número de helióstatos sobre la evolución del rendimiento sobre el diseño por selección directa (rango [2,32])	170
Figura 4.7.- Evolución del factor de aceleración logrado por la paralelización según el número de helióstatos	175
Figura 4.8.- Eficiencia promedio de las soluciones obtenidas en la optimización por posiciones según el optimizador y el número de helióstatos.....	184
Figura 4.9.- Tiempo promedio de las soluciones obtenidas en la optimización por posiciones, según el optimizador y el número de helióstatos.....	184
Figura 4.10.- Soluciones principales encontradas por los tres optimizadores para la distribución de 32 helióstatos sobre 100 posiciones.....	189
Figura 4.11.- Eficiencia promedio de las soluciones obtenidas en la optimización con modelo de diseño según el optimizador y el número de helióstatos	192
Figura 4.12.- Tiempo promedio de las soluciones obtenidas en la optimización con modelo de diseño, según el optimizador y el número de helióstatos	192

Figura 4.13.- Soluciones principales encontradas por los tres optimizadores para la distribución de 32 helióstatos según el modelo de rendimiento	196
Figura A.1.- Punto P en coordenadas cartesianas y polares	204
Figura A.2.- Circunferencia de centro C y radio r	206
Figura A.3.- Definición vectorial de la recta	207
Figura A.4.- Definiciones vectoriales del plano, A) Con dos vectores paralelos al plano e independientes entre sí; B) Con un vector normal al plano	209
Figura A.5.- Recta paralela a un plano	210
Figura A.6.- Pertenencia entre un punto y A) Un rectángulo directamente definido; B) Un rectángulo parcialmente definido.....	212
Figura A.7.- Situaciones para el cálculo de la distancia de un punto a un segmento.....	213
Figura A.8.- Coordenadas sobre un plano orientable en elevación y azimut	215
Figura A.9.- Superposición de la base espacial y la base de π en vista cenital	216
Figura A.10.- Superposición de la base espacial y la base de π en vista lateral.....	216
Figura B.1.- Interfaz de la utilidad de representación de campos solares definidos por coordenadas cartesianas.....	218
Figura B.2.- Utilidad de transcripción de puntos del helióstato al espacio con un ejemplo .	219
Figura B.3.- Utilidad de orientación de helióstatos resolviendo un ejemplo de [STI01]	220
Figura B.4.- Utilidad de cálculos básicos del modelo de rendimiento	221
Figura C.1.- Contenido de la implementación de UEGO	222
Figura C.2.- Fragmento del contenido “uegoini.test”	223
Figura C.3.- Declaración de etiquetas en “/include/uegoconf.h”	224
Figura C.4.- Declaración de atributos para contener los parámetros propios del problema en la clase “Ini” (/include/uegoini.h)	224
Figura C.5.- Creación de los métodos de acceso a los atributos creados en la clase “Ini” (include/uegoini.h).....	225
Figura C.6.- Lectura de los parámetros definidos para el problema en el constructor de la clase “Ini” (uegolib/ini.cc)	225
Figura C.7.- Fragmento de importaciones en include/uego.h	225
Figura C.8.- Fragmento del archivo de definición de un problema para GASUB.....	226
Figura C.9.-Sección de parámetros para GASUB en un archivo de definición.....	227

Índice de tablas

Tabla 1.1.- Situación de las centrales termosolares a nivel mundial	22
Tabla 2.1- Propiedades del movimiento de orientación de los helióstatos	120
Tabla 4.1.- Impacto del factor de bloqueo y sombreado en el tiempo de cómputo y el valor de rendimiento óptico calculado sobre los diseños de óptimos de la segunda vertiente de optimización planteada, en promedio	166
Tabla 4.2.- Impacto de la orientación y cálculo del factor de bloqueo y sombreado de los helióstatos en el valor y tiempo de cómputo del rendimiento óptico sobre la selección sistemática de las posiciones generadas en un muestreo circular denso	169
Tabla 4.3.- Resultados principales del estudio comparativo del tiempo de cálculo del rendimiento óptico secuencial frente a la versión paralela	174
Tabla 4.4.- Evolución del factor de aceleración logrado por la paralelización según el número de helióstatos con 2 y 4 hilos	177
Tabla 4.5.- Número de muestras anuales, tiempos y valores de eficiencia con y sin ponderación según el tipo de muestreo temporal sobre el diseño de treinta y dos helióstatos optimizado de forma voraz sobre posiciones disponibles	179
Tabla 4.6.- Resultados principales del proceso de optimización sobre la segunda vertiente	183
Tabla 4.7.- Resultados principales del proceso de optimización sobre la primera vertiente	193
Tabla A.1.- Signos del seno, coseno y tangente por cuadrante	205
Tabla D.1.- Medidas de tiempo para el cálculo de rendimiento completo sobre las soluciones procedentes de la optimización sobre posiciones disponibles (Búsqueda Aleatoria Pura, GASUB y Algoritmo Voraz, 2ª Vertiente del problema)	229
Tabla D.2.- Medidas de tiempo para el cálculo de rendimiento completo sobre la selección sistemática de posiciones muestreadas.....	230
Tabla D.3.- Medidas de tiempo para el cálculo de rendimiento reducido sobre las soluciones procedentes de la optimización sobre posiciones disponibles (Búsqueda Aleatoria Pura, GASUB y Algoritmo Voraz, 2ª Vertiente del problema)	230
Tabla D.4.- Medidas de tiempo para el cálculo de rendimiento reducido sobre la selección sistemática de posiciones muestreadas.....	231
Tabla D.5.- Información del promediado de valores de rendimiento óptico completo en las soluciones procedentes de la optimización sobre posiciones disponibles (Búsqueda Aleatoria Pura, GASUB y Algoritmo Voraz, 2ª Vertiente del problema).....	232

Tabla D.6.- Información del promediado de valores de rendimiento óptico parcial en las soluciones procedentes de la optimización sobre posiciones disponibles (Búsqueda Aleatoria Pura, GASUB y Algoritmo Voraz, 2ª Vertiente del problema).....	233
Tabla D.7.- Medidas de tiempo para el cálculo de rendimiento completo, en paralelo, sobre la selección sistemática de posiciones muestreadas	233
Tabla D.8.- Tiempos de cálculo del rendimiento óptico no ponderado según el tipo de muestreo	234
Tabla D.9.- Tiempos de cálculo del rendimiento óptico ponderado según el tipo de muestreo	235
Tabla D.10.- Tiempos empleados en la optimización sobre posiciones por el optimizador voraz	236
Tabla D.11.- Tiempos empleados en la optimización sobre posiciones por el optimizador BAP	236
Tabla D.12.- Tiempos empleados en la optimización sobre posiciones por el optimizador GASUB	237
Tabla D.13.- Eficiencias ponderadas y sin ponderar para los diseños obtenidos mediante optimización sobre posiciones por un optimizador de tipo voraz.....	238
Tabla D.14.- Eficiencias ponderadas y sin ponderar para los diseños obtenidos mediante optimización sobre posiciones por el optimizador BAP.....	238
Tabla D.15.- Eficiencias ponderadas y sin ponderar para los diseños obtenidos mediante optimización sobre posiciones por el optimizador GASUB.....	239
Tabla D.16.- Información extendida sobre el valor de las soluciones alcanzadas por el optimizador BAP aplicado a un conjunto de posiciones disponibles.....	240
Tabla D.17.- Información extendida sobre el valor de las soluciones alcanzadas por el optimizador GASUB aplicado a un conjunto de posiciones disponibles.....	240
Tabla D.18.- Tiempos empleados en la optimización sobre un modelo de diseño por el optimizador voraz	241
Tabla D.19.- Tiempos empleados en la optimización sobre un modelo de diseño por el optimizador BAP.....	241
Tabla D.20.- Tiempos empleados en la optimización sobre un modelo de diseño por el optimizador UEGO.....	242
Tabla D.21.- Eficiencias ponderadas y sin ponderar para los diseños obtenidos mediante optimización sobre posiciones por un optimizador de tipo voraz.....	242
Tabla D.22.- Eficiencias ponderadas y sin ponderar para los diseños obtenidos mediante optimización sobre posiciones por el optimizador BAP.....	243

Tabla D.23.- Eficiencias ponderadas y sin ponderar para los diseños obtenidos mediante optimización sobre posiciones por el optimizador GASUB.....	243
Tabla D.24.- Información extendida sobre el valor de las soluciones alcanzadas por el optimizador BAP aplicado a un modelo de diseño	244
Tabla D.25.- Información extendida sobre el valor de las soluciones alcanzadas por el optimizador GASUB aplicado a un modelo de diseño	245

Índice de algoritmos

Algoritmo 2.1.- Estructura general de un algoritmo de búsqueda aleatoria pura	62
Algoritmo 2.2.- Estructura general de un algoritmo voraz	65
Algoritmo 2.3.- Estructura general de un algoritmo de recocido simulado	69
Algoritmo 2.4.- Estructura general de un algoritmo evolutivo (genético).....	73
Algoritmo 2.5.- Estructura general de un algoritmo memético.....	85
Algoritmo 3.1.- Cálculo del rendimiento óptico del campo solar	132
Algoritmo 3.2.- Esquema de optimización de búsqueda aleatoria pura con modelo de ubicación	137
Algoritmo 3.3.- Esquema del algoritmo de optimización voraz por modelo de ubicación ...	139
Algoritmo 3.4.- Algoritmo de búsqueda aleatoria de ubicación directa.....	141
Algoritmo 3.5.- Algoritmo voraz de ubicación directa	144
Algoritmo 3.6.- Esquema del algoritmo evolutivo UEGO.....	148
Algoritmo 3.7.- Algoritmo SASS de Solis y Wets	152
Algoritmo 3.8.- Esquema algorítmico de GASUB	157

Capítulo 1. Interés y objetivos

En este capítulo se exponen los principales objetivos del trabajo, haciendo especial énfasis en el aprovechamiento energético del Sol como fuente renovable y el interés en su utilización como fuente de energía para la producción de electricidad en centrales solares termoeléctricas de receptor central. Tras una introducción general, se detallarán los objetivos concretos que se persiguen con la realización de este trabajo, incidiendo en los relacionados con la optimización de la distribución de helióstatos en plantas termoeléctricas, tanto en los aspectos algorítmicos como de optimización.

1.1.- Introducción

El aprovechamiento energético del Sol suscita un gran interés y se puede considerar, en cierto modo, el estandarte de las energías renovables.

Su explotación actualmente tiene dos grandes vertientes, la **conversión fotovoltaica**, orientada a la producción de energía eléctrica, y el **aprovechamiento térmico**, con el que se busca obtener calor útil para procesos industriales, incluyendo también la producción de electricidad a través de la producción de vapor.

La conversión fotovoltaica permite realizar una transformación directa de la energía electromagnética irradiada por el Sol en energía eléctrica basándose en el efecto fotoeléctrico descubierto por H. Hertz en 1887. Este efecto consiste a grandes rasgos en la emisión de electrones de una cierta energía cuando incide radiación electromagnética sobre un cierto material. Los dispositivos aplicados para la conversión fotovoltaica se denominan **células fotovoltaicas** y, esencialmente, son placas de material semiconductor de gran pureza, con elementos de conexión y una cierta superficie, que se agrupan en paneles. Son dispositivos con muchas ventajas, pero tienen algunos inconvenientes relacionados con su bajo rendimiento, alta tasa de ocupación de terreno y dificultades de almacenamiento de la energía eléctrica producida.

Tal y como se mencionó anteriormente, la segunda vertiente de explotación de la energía solar se denomina “aprovechamiento térmico”. Básicamente, ésta consiste en calentar materiales para un determinado fin por transformación fototérmica. Conceptualmente es una técnica sencilla, por lo que está relativamente extendida para fines domésticos como calentar agua o cocinar. Como ventaja fundamental, el calentamiento de un fluido usando energía solar permite realizar un almacenamiento térmico, que permite adecuar la disponibilidad energética (calor o electricidad) a la demanda. Como inconveniente

fundamental cuando se compara con la tecnología fotovoltaica, destaca la necesidad de utilizar intercambiadores de calor y turbinas para la producción de electricidad.

Los sistemas de aprovechamiento térmico se basan principalmente en **colectores**, que están destinados a transmitir la radiación recibida a un material (generalmente fluido), para que éste aumente su temperatura. En la bibliografía se destacan dos tipos de colectores: planos y de concentración.

Los **colectores planos** consisten en conducciones, por las que circula el fluido que debe absorber el calor, y que están contenidas en una placa absorbente aislada térmicamente. Esta placa está a su vez dentro de una caja recubierta de material aislante cuya frontal es una superficie de vidrio transparente. Se consigue así potenciar el proceso induciendo un efecto invernadero que permite la radiación entrante pero evita la irradiación del calor hacia el exterior.

Los **colectores de concentración** son superficies cóncavas reflectantes proyectadas para concentrar la radiación incidente en un punto (helióstatos y discos parabólicos) o línea (concentradores cilindro-parabólicos) en el que se encuentra el material a calentar (figura 1.1).

El aprovechamiento térmico de la energía solar se adapta conceptualmente sin problemas al principio de diseño de las clásicas centrales convencionales que operan con combustibles fósiles y nucleares. Este principio de diseño consiste fundamentalmente en obtener energía térmica que se emplea posteriormente en un ciclo termodinámico para obtener vapor con el que mover un grupo turbina-alternador y generar energía eléctrica por aplicación directa del concepto de inducción electromagnética.

Las centrales de producción de energía eléctrica que se basan en el comportamiento descrito se agrupan bajo el nombre de centrales térmicas o termoeléctricas. Dentro del conjunto de centrales termoeléctricas, la denominación concreta viene dada generalmente por la fuente de energía que explotan para lograr energía térmica en primera instancia. Las centrales térmicas que emplean la energía solar para generar calor reciben la denominación de **termosolares o heliotérmicas**.

Las centrales heliotérmicas tienen, básicamente, el siguiente ciclo de operación:

- La radiación solar concentrada calienta un fluido portador de calor hasta cierta temperatura.
- El fluido pasa por un generador de vapor en el que se intercambia el calor a un fluido secundario y se produce vapor a alta presión.
- El vapor acciona un grupo turbina-alternador.
- Se enfrían los fluidos hasta su estado inicial para repetir el proceso.

En lo referente a fluidos portadores de calor empleados se pueden mencionar aire, agua, aceite térmico, sodio líquido o sales fundidas mientras que, como fluido secundario, tradicionalmente se ha utilizado agua. La utilización de aceite térmico es la opción más extendida actualmente. También destacan las sales fundidas, con alta capacidad térmica, que facilita el almacenamiento del calor. Nótese además que, según el tipo de fluido portador puede no ser necesario contar con un fluido secundario.

El aspecto fundamental y verdaderamente característico las centrales heliotérmicas es el comienzo del proceso descrito, el calentamiento del fluido portador mediante la concentración de radiación solar. En base a la implementación de este proceso se pueden distinguir principalmente dos tipos de centrales heliotérmicas, las de colectores distribuidos y las de torre (figura 1.1), que suponen el área de interés de este proyecto.

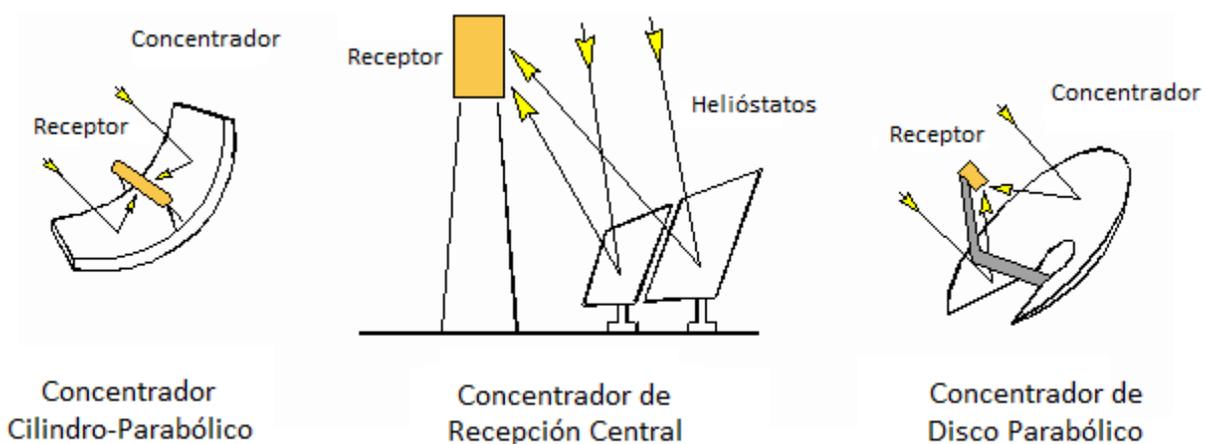


Figura 1.1.- Esquemas de concentración solar [STI01].

Las centrales de colectores distribuidos se basan en la utilización de colectores de concentración que, como se ha explicado, concentran la radiación solar recibida en un punto o línea propios donde se encuentra el fluido portador de calor. De esta forma, en este tipo de centrales el fluido se hace circular en un circuito de colectores de concentración hasta que alcanza la temperatura apta para el comienzo del ciclo termodinámico del que se obtiene la energía eléctrica.

Las centrales de torre (figura 1.2) cuentan con un conjunto de espejos especialmente colocados y altamente reflectantes, denominados helióstatos. Estos elementos concentran la radiación que reciben en un receptor común, y cuentan con mecanismos de seguimiento del movimiento aparente del Sol para que la recepción sea la mayor posible en todo momento. El receptor de la radiación reflejada está ubicado a una cierta altura en una torre. Es dentro del receptor donde se encuentra el circuito con el fluido primario que se debe calentar.

El conjunto formado por los helióstatos, el receptor, y sus respectivas características de diseño (altura del receptor, colocación de los helióstatos...) se denominará campo solar y se referenciará como tal en este trabajo. El diseño de esta parte de la central es de vital importancia para el rendimiento de la misma ya que es responsable de aprovechar la radiación solar incidente como fuente de energía térmica. Este diseño entraña una gran complejidad de optimización que será abordada mediante algoritmos heurísticos en este proyecto.

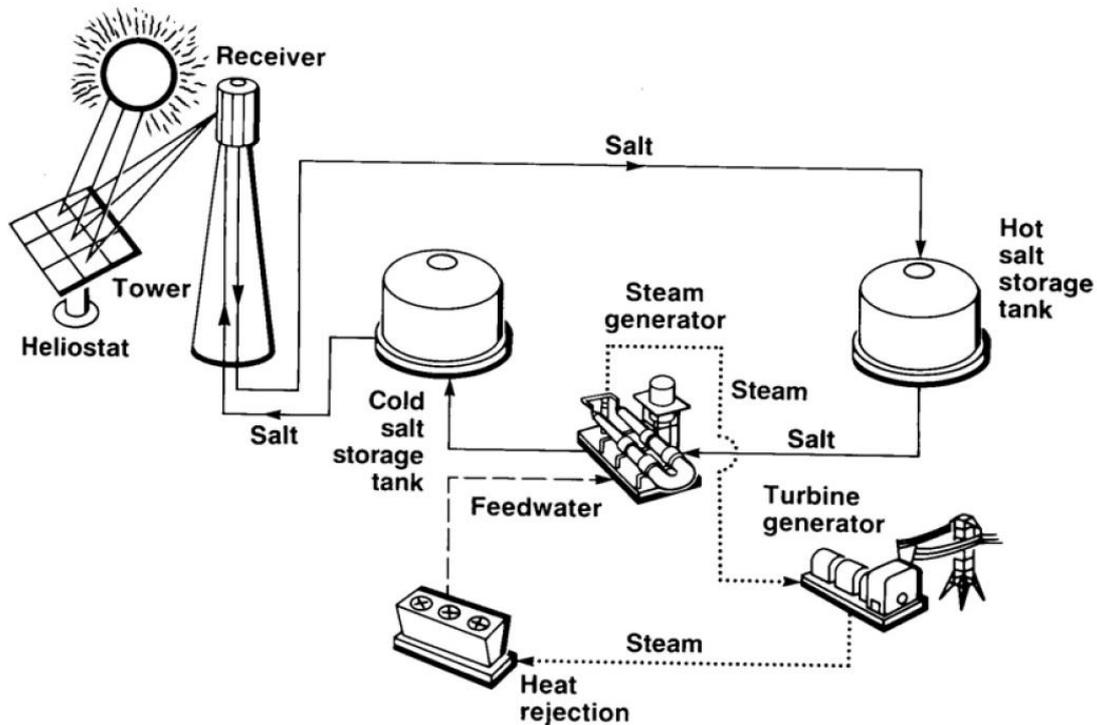


Figura 1.2.- Esquema de una central heliotérmica de torre [CAM12].

Las centrales de torre se caracterizan por las elevadas temperaturas que pueden conseguir en el receptor y que hacen que este esquema se pueda usar también en investigación y procesos industriales.

Recientemente se ha producido un gran despliegue comercial de las centrales heliotérmicas, con más de 1.5 GW en operación sólo en España y un elevado número de proyectos en fase de construcción o promoción [ZAR12]. A nivel mundial, existen en la actualidad un gran número de plantas heliotérmicas en operación o en construcción, como se aprecia en la siguiente tabla [ZAR12]:

PAÍS	NÚMERO DE CENTRALES TERMOSOLARES		
	OPERATIVAS	CONSTRUCCIÓN	PROMOCIÓN
E.E.U.U	16	8	72
España	18	19	23
Argelia y Marruecos	2	-	6
Egipto y Oriente Medio	1	2	5
India	-	2	12
China	2	-	5
Australia	6	2	5

Tabla 1.1.- Situación de las centrales termosolares a nivel mundial [ZAR12].

De estas plantas, de tecnología de Torre solar se van a instalar 28 en EEUU, 3 en España (Gemasolar, PS10 y PS20), 1 en la India, 2 en China, 4 en Australia y 1 en Sudáfrica. En la actualidad la tecnología más implantada es la de canal cilindro-parabólico, debido fundamentalmente a que ha sido una tecnología ampliamente demostrada en los 354 MW de capacidad instalada en las 9 plantas solares en el desierto de Mojave.

Sin embargo, la tecnología de torre central tiene un futuro muy prometedor, como se indica en [CSP14, DUN12]. En esos informes se reconoce que la tecnología de torre solar en la actualidad cubre el 4% del total de plantas de concentración instaladas (98 MW en 7 mercados). Sin embargo, la proyección global indica que la tecnología de torre está llamada a desempeñar un papel cada vez más destacado en el panorama mundial, tanto en términos de MW instalados (23% de la capacidad de MW en construcción y el 38% de la capacidad en MW en desarrollo), como de actividad de mercado, con una extensión a 14 mercados. Este crecimiento prometedor junto al hecho de que es una tecnología gestionable hace que los ojos de la industria se estén enfocando en esta tecnología.

El aprovechamiento termoeléctrico de la energía solar destaca por la factibilidad de almacenar el calor generado con un buen resultado para garantizar un mínimo de disponibilidad energética (figura 1.2). Además, este esquema se puede integrar fácilmente con métodos tradicionales de obtención de energía térmica (por ejemplo la quema de combustibles fósiles) para llegar a sistemas híbridos muy versátiles.

Sin embargo, y de forma similar a como ocurre con la vertiente fotovoltaica, se necesitan grandes superficies de captación para tener una producción de energía considerable.

1.2.- Justificación e intereses

El interés de este trabajo se apoya en dos pilares fundamentales. En primer lugar, La importancia de la búsqueda y optimización de fuentes de energía renovables para la

sociedad. En segundo lugar, la necesidad de contar con métodos estocásticos de optimización con rendimiento y fiabilidad contrastadas.

En el mundo actual en el que la población es cada vez más numerosa, la demanda de recursos energéticos está en continuo crecimiento. La satisfacción de esta demanda tiene, a su vez, efectos muy negativos en el medio ambiente que son, además, directamente proporcionales a su crecimiento.

Las fuentes de energía más explotadas, y de las que se obtiene un mayor rendimiento, son también aquellas que tienen un efecto más nocivo en las condiciones ambientales del planeta. La quema de combustibles fósiles contamina el aire y daña a la atmósfera alterando el equilibrio de gases de la misma y potenciando así el efecto invernadero. La energía nuclear, además de suponer un peligro constante en aquellos lugares donde se explota, genera unos residuos muy dañinos y duraderos. Además, la mayoría de las fuentes de energía tampoco son renovables. Esto significa que su disponibilidad útil tiene un tiempo acotado tras el cual no serán viables para explotación. Este tiempo se ve, como agravante de la situación, reducido conforme aumenta el consumo de la sociedad.

Consiguientemente, el poder trabajar en el campo de la optimización aplicado al campo solar de centrales heliotérmicas de torre, una de las ramas más prometedoras, versátiles y sólidas en el ámbito de las energías renovables, es una apuesta de futuro ilusionante.

No obstante, y en desarrollo del segundo punto, el interés que suscita este proyecto trasciende el problema particular de la optimización en el diseño de centrales heliotérmicas de torre. Los problemas de optimización están presentes prácticamente en todos los ámbitos planteables, desde decisiones cotidianas como seleccionar el camino más rápido hacia un destino, hasta aspectos relevantes de diseño como el alumbrado de una zona industrial con el menor gasto energético posible. Por consiguiente, los problemas de optimización son muy diversos y fácilmente generalizables.

Los métodos exactos de optimización son en muchas ocasiones inaplicables a problemas de complejidad considerable como el abordado en este proyecto, ya sea por la ineficiencia del proceso o directamente por la dificultad de exploración del espacio de búsqueda.

En este contexto es deseable contar con alternativas que permitan obtener soluciones a problemas de optimización que, aunque sus resultados no se suelen poder asegurar como óptimos globales, tengan un equilibrio entre coste computacional y validez aproximada de los mismo. Por lo tanto, la pretensión de aplicar el algoritmo evolutivo UEGO sobre un problema al que anteriormente no se ha aplicado para estudiar su comportamiento en relación a un esquema voraz, es el otro gran aliciente del proyecto.

A título meramente personal, este proyecto me permite poner en práctica el conocimiento adquirido a lo largo de mi formación y, especialmente, profundizar en los problemas y

métodos de búsqueda y optimización que, estudiados de forma introductoria, siempre han atraído mi atención.

1.3.- Objetivos

Como se mencionó con anterioridad, el campo solar de las centrales heliotérmicas de torre es de gran importancia para su rendimiento y, por consiguiente, para su viabilidad. Esto se debe a dos motivos fundamentales: su coste y su función.

El coste en infraestructura de esta parte de la instalación es muy significativo, y su capacidad de aprovechar y concentrar la radiación solar incidente es capital para justificar el aprovechamiento térmico de la energía solar como candidato viable a métodos como la quema de combustibles fósiles en el marco de las centrales termoeléctricas.

Concretamente y según [JON07], el campo solar representa el 50% del coste de la central y según su rendimiento puede suponer un 40% de pérdida energética. El objetivo de la I+D en esta tecnología es reducir los costes de los campos solares y maximizar su rendimiento. Uno de los retos fundamentales es la optimización de centrales de torre, mediante la realización de estudios paramétricos de diseño del campo y evaluación de diferentes estrategias de distribución de helióstatos [CTA12].

Los distintos aspectos de diseño del campo solar, especialmente en lo referente al posicionamiento de los helióstatos, dan lugar a problemas de optimización muy complejos sobre las múltiples variables de diseño que definen. El espacio entre helióstatos que permita un máximo poder de concentración de radiación sin que lleguen a tocarse físicamente, su colocación de forma que no se corten el flujo reflejado y/o incidente entre ellos o incluso el grado de aprovechamiento de la superficie en función del coste del metro cuadrado son algunos ejemplos de criterios que se pueden considerar en problemas de optimización.

En este proyecto se pretende aplicar verticalmente el proceso de diseño y optimización del campo solar orientado a obtener el máximo rendimiento “óptico” o “de concentración de radiación” con el fin último de contrastar resultados y rendimiento de un método de optimización estocástico basado en poblaciones, UEGO, con el clásico enfoque voraz. En la comparativa de estos dos métodos heurísticos se incluirá además, como referente de control, un algoritmo básico de búsqueda aleatoria pura.

La optimización del diseño del campo solar, con el criterio común de maximizar el rendimiento óptico que obtiene, se hará en dos vertientes diferenciadas, principalmente para que el estudio del desempeño de los tres optimizadores mencionados sea más variado (véase la figura 1.3). No obstante, se analizarán también brevemente ambos enfoques en relación a la optimización del campo solar cuando se comenten los resultados.

En la primera vertiente, el diseño del campo solar se define mediante un modelo de diseño o ubicación de los heliostatos sobre la superficie de la central. Este modelo recibe como entrada una serie de parámetros y variables que determinan una cierta distribución de heliostatos. En este contexto, los tres optimizadores operarán sobre las variables de un cierto modelo de diseño proponiendo y evaluando distintas configuraciones del mismo en el proceso de búsqueda.

En la segunda vertiente, el diseño del campo solar quedará definido directamente mediante un conjunto de posiciones, descritas en función del receptor, sobre las que se colocarán los heliostatos. Este conjunto de posiciones habrá de ser escogido por cada uno de los tres optimizadores, de un conjunto con la totalidad de posiciones disponibles, para maximizar el rendimiento óptico del campo solar durante su proceso de búsqueda.

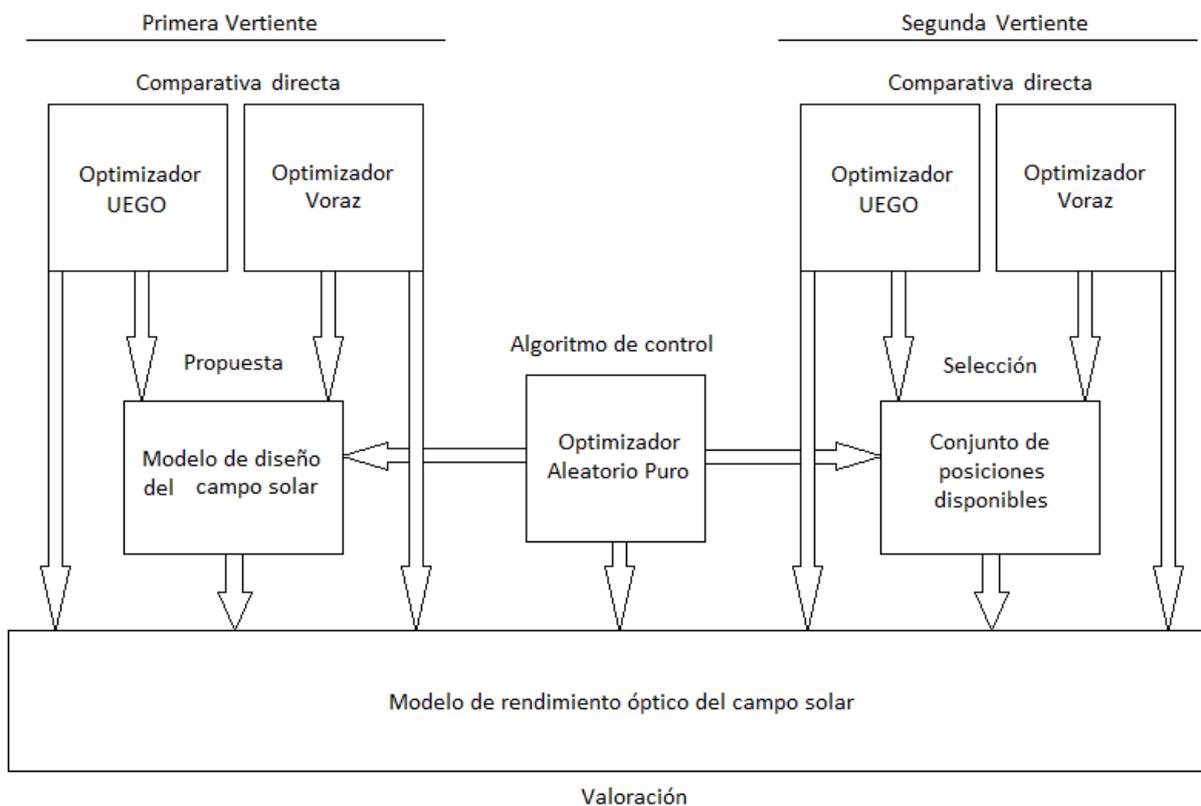


Figura 1.3.- Esquema simplificado de los elementos del proyecto.

En base a lo expuesto, se pueden identificar fundamentalmente cinco objetivos:

- Modelar el **rendimiento óptico** del campo solar de una central heliotérmica de torre como objetivo de optimización.
- Desarrollar un **modelo de diseño** del campo solar en base a un conjunto de variables.
- Definir un problema de **optimización** en torno a las variables del modelo de diseño.

- Definir un problema de **optimización** alternativo basado en la distribución de helióstatos en un conjunto de posiciones disponibles.
- Aplicar un **método heurístico estocástico**, el **algoritmo evolutivo UEGO**, a la resolución del problema de optimización en sus dos variantes y estudiar su desempeño en relación al **esquema voraz** en el mismo contexto. Esta comparativa se considera además como el objetivo principal del proyecto.

Las relaciones entre los distintos elementos del proyecto se definirán formalmente en capítulos posteriores. En concreto, se seguirá la siguiente estructura:

- En el segundo capítulo se hablará del contexto de la optimización del campo solar de las centrales de torre y de los aspectos directamente relacionados. Se hará además una revisión de algunos métodos de optimización de interés para el proyecto.
- En el tercer capítulo se definirá el problema tratado en el proyecto en sus dos variantes y cómo se ha abordado, concretando además detalles de los que se habló de forma genérica en el segundo capítulo.
- En el cuarto capítulo se mostrarán los resultados alcanzados para el problema definido, hablando también de detalles como el coste computacional de la resolución con los distintos métodos.
- En el quinto y último capítulo se expondrán las principales conclusiones del trabajo y los logros alcanzados, para finalmente hablar de líneas futuras y mejoras posibles que no han sido abordadas en este trabajo.

Capítulo 2. Revisión bibliográfica

En este capítulo se expone el contexto sobre el que se desarrolla el proyecto. Se aporta por lo tanto información de interés del campo solar, del problema de optimización que plantea y de distintas formas de abordar su resolución, referidos a la información que se ha encontrado al respecto en la bibliografía.

En la primera sección se resumen de los elementos que componen el campo solar y su relación. Se comienza exponiendo brevemente algunos detalles de sus características fundamentales, con la pretensión de mostrar una idea básica de sus aspectos técnicos. A continuación se trata el problema de optimización que supone el diseño del campo solar. Posteriormente se discute sobre los aspectos que caracterizan un cierto diseño.

En la segunda sección se exponen algunos conceptos básicos, angulares y horarios, que relacionan la posición relativa de la Tierra y el Sol en el espacio.

En la tercera sección se exponen formalmente los problemas de optimización global a nivel general. En este ámbito se hace además una clasificación general de los algoritmos que se pueden aplicar a su resolución. Se destacan también ciertos algoritmos de optimización global que se consideran de interés dentro de la temática del proyecto, ya sea por aplicación directa o por relación contextual con el mismo.

Finalmente, en la cuarta sección, se da una perspectiva breve y general de los sistemas de computación paralela, dado que se han explotado sus ventajas en la resolución de tareas computacionalmente costosas.

2.1.- El campo solar de las centrales de torre

2.1.1.- Introducción

Las centrales de torre, como se introdujo en el capítulo anterior, se caracterizan por contar con un conjunto de elementos reflectantes distribuidos en torno a un receptor, sobre el que redirigen la radiación solar que captan.

Los elementos reflectores reciben el nombre de helióstatos y están diseñados para seguir el movimiento aparente del Sol, a lo largo del día, tratando de enfocar la máxima radiación posible sobre el receptor.

El receptor recibe una densidad de radiación muy superior a la que incide normalmente sobre la superficie terrestre y alcanza una elevada temperatura con el fin de calentar un fluido que alberga en su interior.

Esta estructura les vale la denominación de Sistemas de Recepción Central (“Central Receiver System” (CRS) en la bibliografía en inglés) en el ámbito de las centrales heliotérmicas, basadas en la concentración de la radiación.

El rasgo más distintivo de este tipo de centrales es precisamente el denominado “Campo Solar”. Bajo este término se agrupan dos elementos complejos interrelacionados:

- El conjunto de helióstatos distribuidos o sistema colector [PER05]
- El receptor

El diseño de estos componentes, así como su distribución sobre la superficie de las centrales, son críticas para el rendimiento y rentabilización de las mismas. Es, por lo tanto, un elemento muy analizado y estudiado que da lugar a complejas infraestructuras cuyo esquema dista mucho de ser casual (véase la figura 2.1).



Figura 2.1.- Central heliotérmica de torre [STI01].

2.1.2.- Helióstatos

Los heliostatos, iconos por excelencia de las centrales de torre, son reflectores ópticos que redirigen y concentran la radiación que reciben en el receptor. Estos elementos se componen fundamentalmente de una superficie reflectante, una estructura de soporte orientable y un sistema de control. El sistema de control varía la orientación de la superficie reflectante para que siga dirigiendo la radiación solar hacia el receptor a pesar del movimiento aparente del Sol. Estos elementos se muestran esquemáticamente en la figura 2.2.

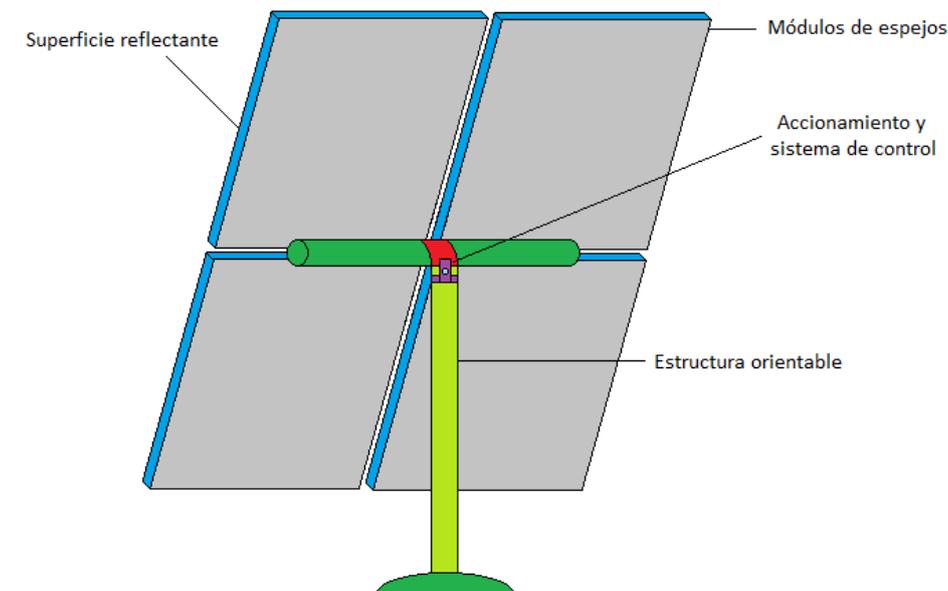


Figura 2.2.- Esquema básico de un heliostato.

La composición de la superficie reflectante ha sufrido distintas modificaciones a lo largo del tiempo atendiendo especialmente a tres factores: el coste de fabricación, el coste de mantenimiento y el aumento de la reflectividad.

Los primeros heliostatos tenían una superficie reflectante, formada con la agrupación de espejos de vidrio de cubierta plateada, para facilitar el mantenimiento. Estos espejos se denominaban "facetas". Las facetas podían ser planas o tener cierta curvatura y se montaban sobre una estructura metálica. En el montaje se les daba además cierta orientación para que el conjunto global del heliostato adquiriera una forma paraboloide y pudiera enfocar el receptor elevando la densidad del flujo y paliando la dispersión de la imagen proyectada. Esta vertiente, conocida como tecnología de vidrio-metal [PER05], se ha mantenido hasta la actualidad, con mejoras especialmente en la reducción de peso y coste. Se trata además de la técnica más extendida [STI01] [PER05].

Como alternativa a esta tendencia de diseño surgió una segunda línea alternativa, la tecnología de membrana tensionada [STI01]. Esta rama se basa en la construcción de la superficie reflectante (la membrana), bien mediante la utilización de finos espejos de cubierta plateada, o bien con la utilización de películas reflectantes a base de polímeros, sobre una delgada lámina metálica. Un vacío controlado entre la membrana y el soporte metálico permite además alterar el enfoque hacia el receptor [RIF09]. Esta técnica suscitó gran interés, especialmente por el aligeramiento del peso del conjunto, que facilitaba el movimiento de los helióstatos. Sin embargo la resistencia de la superficie reflectante al paso del tiempo, combinada con una reducción de coste inferior a la esperada, hacen que los helióstatos de vidrio-metal tengan una situación predominante.

La superficie reflectante ha oscilado históricamente entre los 40 m² de las primeras generaciones hasta superficies de hasta 200 m² en algunos casos, en un intento por reducir el coste por metro cuadrado. No obstante, la tendencia actual está de nuevo en torno a superficies reducidas, de hasta 65 m², que facilitan los procesos de transporte, instalación, implantación y mantenimiento.

En lo referente a la reflectividad lograda en la actualidad, en un campo de helióstatos puede oscilar, en promedio anual, entre el 85 y 90% dependiendo de las condiciones de mantenimiento según [SOL09].

Como se ha mencionado ya anteriormente, el Sol aparenta seguir una cierta trayectoria sobre el cielo a consecuencia del movimiento terrestre en torno al Sol. Es necesario entonces que los helióstatos se adapten a este movimiento aparente del Sol sobre su posición para mantener el plano de reflexión instantáneo formado por el Sol, el helióstato y el receptor [PER05] con la radiación dirigida al receptor, tal y como se ilustra en la figura (figura 2.3).

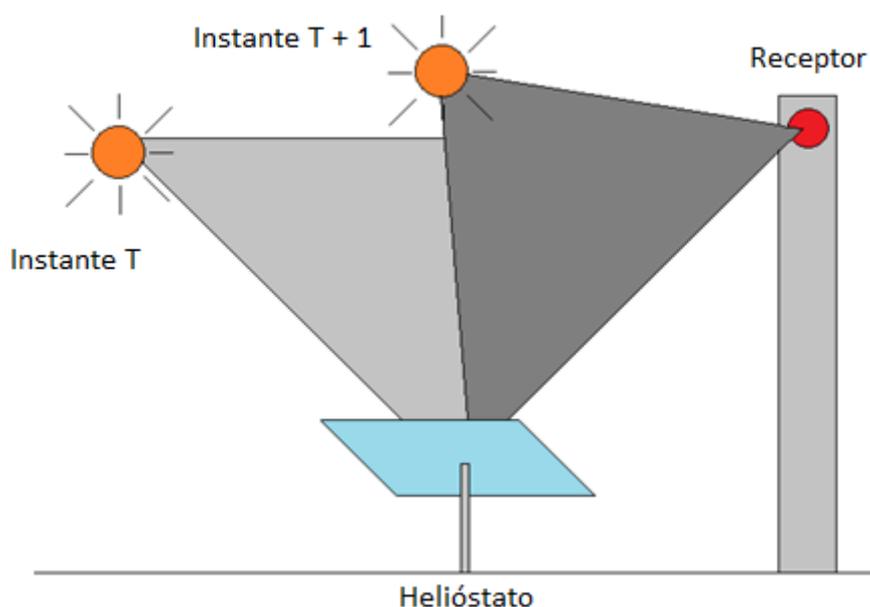


Figura 2.3.- Planos de reflexión de la luz solar hacia el receptor.

Para este fin, los helióstatos tienen movilidad estructural que les permite adaptarse a la posición solar en cada instante según las instrucciones de un sistema de control.

La estructura del helióstato tiene, tradicionalmente, dos grados de libertad para su orientación: azimut y elevación (esquema "Azimuth-Elevation" en bibliografía inglesa), que se asumen también en este proyecto. Éstos dos tipos grados de libertad, representados en la figura 2.4 (y asumibles también al esquema de la figura 2.3), son suficientes para direccionar cualquier punto del cielo, permitiendo que la orientación del helióstato se ajuste con el Sol.

No obstante, es interesante mencionar en este contexto una alternativa para los movimientos del helióstato denominada "Spinning-Elevation" que pretende especialmente mantener el flujo de radiación sobre el receptor más uniforme. Para más información sobre esta técnica en comparación con la de Azimut-Elevación se recomienda la lectura de [CHE04].

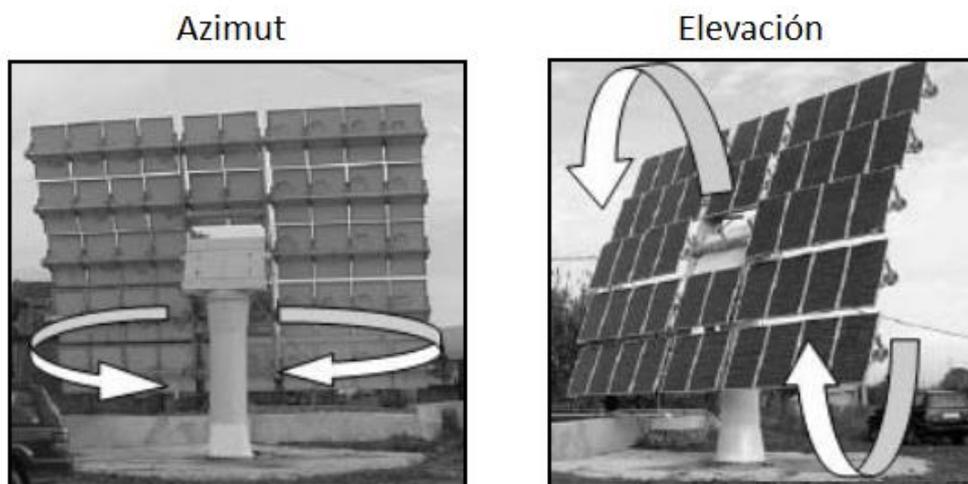


Figura 2.4.- Grados de libertad Azimut-Elevación de un helióstato [PER05].

El movimiento del helióstato, en sus dos grados de libertad, se implementa mediante motores con codificadores, que realizan un movimiento angular discreto en los ejes de elevación y azimut, bajo la dirección del sistema de control. Esta discretización del movimiento supone también una fuente de error del flujo dirigido hacia el receptor que se incrementa con la distancia entre helióstato y receptor [PER05].

El sistema de control de orientación de los helióstatos, puede implementarse de forma centralizada o distribuida [SOL09], realizando en cualquier caso las siguientes acciones principales aplicadas a su ámbito de control:

- Cálculo de la posición solar aparente.
- Cálculo de la orientación recomendada del helióstato para esta posición solar.

- Medición de la orientación actual.
- Corrección de la posición actual hasta alcanzar la orientación recomendada.
- Detección de errores.

Las centrales heliotérmicas de torre cuentan con múltiples helióstatos distribuidos en una superficie extensa, dependiendo obviamente del tamaño de la central. Estos helióstatos tienen características particulares de superficie, altura y ubicación (entre otros aspectos más técnicos como reflectividad, forma, distancia focal [STI01] ...) además de una cierta posición tomando el receptor como referencia.

Todos estos rasgos que definen de forma precisa el conjunto de helióstatos determinan lo que se conoce como Sistema Colector o “Campo de Helióstatos”. Este sistema recibe el interés práctico del proyecto, centrándose concretamente en los aspectos referentes al posicionamiento de cada helióstato sobre la superficie en torno al receptor.

2.1.3.- Receptor

El receptor de las centrales de torre es el foco hacia el que los helióstatos del sistema colector dirigen los rayos solares, por lo que recibe una gran densidad de radiación y alcanza una temperatura muy elevada. Este componente contiene en su interior el fluido que se pretende calentar para la posterior producción de energía eléctrica. Es por lo tanto un elemento de vital importancia para el rendimiento de la central que debe operar bajo condiciones extremas de radiación y temperatura, captar la radiación y realizar el intercambio térmico con el fluido portador con la mayor eficiencia posible. Más concretamente, alcanza temperaturas en torno a 1000°C y se espera que el fluido absorba entre el 80 y 95% de la energía reflejada para elevar significativamente su temperatura de cara a emplearse en un ciclo de turbina-alternador o en cualquier otro proceso donde se requiera [STI01].

El receptor se coloca generalmente a una altura considerable del suelo, en una estructura resistente (metálica, de hormigón...), para que se pueda enfocar desde grandes distancias y se reduzca la posibilidad de interferencias entre helióstatos. Esta característica, también bastante distintiva de las centrales de torre, es particularmente importante en las centrales con grandes campos de helióstatos y orografía irregular.

La complejidad técnica del receptor es bastante elevada por la labor que desempeña y las circunstancias en las que lo hace, así como su repercusión en la eficiencia general de la central. De hecho, se trata de un campo de investigación multidisciplinar activo desde la propia concepción de esta tecnología y que ha llevado a proponer diversos tipos de receptores y fluidos con los que operar.

Atendiendo a su geometría, se pueden clasificar como “de cavidad” y “externos” [STI01]:

- Los receptores externos se forman por paneles de tubos verticales finos soldados en conjunto para formar una figura de cierta geometría (plano, cilindro y semicilindro [PER05] según el campo de helióstatos). Los extremos inferior y superior de estos tubos se conectan en un circuito que introduce el fluido portador de calor por el extremo inferior y alcanza el extremo superior tras aumentar su temperatura (véase la figura 2.5 (izquierda)).
- Los receptores de cavidad ubican la superficie destinada a absorber el flujo en el interior de una cavidad aislada para reducir la pérdida de calor por convección, con un cierto número de aperturas (según el diseño del campo de helióstatos) para permitir la entrada de la radiación reflejada (véase la figura 2.5 (derecha)).

Se pueden destacar también dos tipos de clasificaciones más, por el mecanismo de transferencia de calor y por el fluido portador de calor con el que operan, atendiendo a [PER05]:

- Según el mecanismo de transferencia se catalogan como de absorción directa e indirecta. Pudiendo estos últimos ser además volumétricos, tubulares...
- En base al fluido portador de calor que emplean destacan los de agua-vapor, aire y sodio fundidas entre otras.

En [PER05] se puede ver además en qué centrales han sido probados este tipo de receptores.

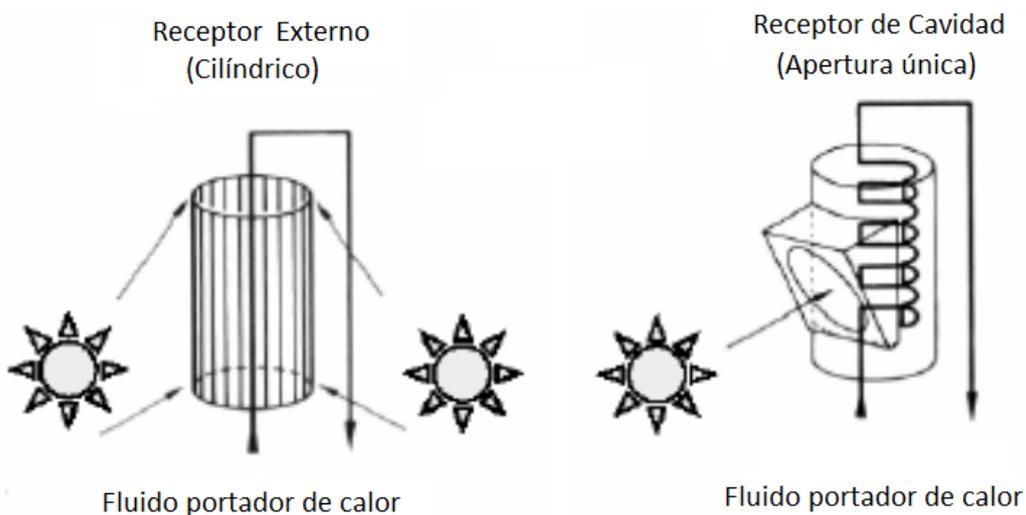


Figura 2.5.- Receptores externo y de cavidad (adaptada de [PER05]).

Para más información sobre los elementos del campo solar, así como de otros sistemas propios de una central de torre (sistemas de almacenamiento, ciclos de producción de

energía eléctrica...), se recomienda especialmente la lectura de los capítulos 10, 11 y 12 de [STI01] así como del cuarto capítulo de [SOL09]. En [SOL09] se hace además un interesante estudio de costes.

2.1.4.- Diseño y optimización del campo solar

El diseño del campo solar implica definir, de forma precisa, todos los aspectos relacionados con los elementos que lo componen, es decir, el conjunto de helióstatos y el receptor, respecto a su distribución sobre la superficie de la central.

Es importante resaltar esta última puntualización. El diseño del campo solar, como se enfoca en este proyecto, hace referencia a la distribución de un cierto número de helióstatos y un receptor, de características conocidas, sobre una superficie concreta. Estas características giran en torno a la interacción de los helióstatos en su labor de concentradores de la radiación solar sobre el receptor. De hecho, el problema tratado se conoce generalmente como “diseño del campo de helióstatos” o “heliostat field layout design” en bibliografía en inglés. Sin embargo, el optar por denominar esta tarea como “diseño del campo solar” no es casual, sino que pretende reflejar que las propiedades del receptor para interactuar con los helióstatos también se tienen en cuenta.

Obviamente, hay varias implicaciones derivadas de las decisiones tomadas sobre los elementos del campo solar, especialmente del tipo de receptor seleccionado. Se puede pensar por ejemplo en el tipo de fluido portador de calor con el que se opera y que repercute en aspectos como los sistemas de almacenamiento térmico. Es por tanto importante dejar claro que la tarea de diseño del “campo solar”, o de helióstatos como se conoce comúnmente, ignora estos detalles y se centra en el ámbito de la distribución de los helióstatos en torno al receptor sobre la superficie de la central. El objetivo fundamental que se persigue generalmente, y también en este proyecto, es hallar la distribución de sus elementos de forma que se consiga concentrar la máxima radiación posible (o deseable) sobre el receptor. No obstante, es importante destacar que este objetivo se puede complementar además con otros, como por ejemplo, el coste de la infraestructura, tal y como se aborda en [ZHA09]. De hecho, no tiene siquiera por qué tratarse directamente de la radiación concentrada, sino de cualquier otro criterio de optimización que se defina y dependa de la colocación de los helióstatos [RAM12].

Teniendo en mente lo expuesto, los helióstatos tienen una cierta posición relativa al receptor, que determina toda la estructura del campo solar. Consiguientemente, el diseño del campo solar requiere asignar unas coordenadas a cada helióstato de forma que se pueda ubicar en el plano. Por lo tanto, y asumiendo conocidas las características intrínsecas del receptor y de cada helióstato, un cierto diseño de campo solar puede verse simplemente

como un conjunto de coordenadas, relacionadas con sus respectivos heliostatos, sobre una superficie bidimensional cuyo origen es la posición del receptor (en el caso en que la distribución de heliostatos se realice sobre un plano). De hecho, la representación básica que se hace de los campos solares para mostrar esquemáticamente la distribución de sus elementos es generalmente una vista cenital acompañada de información extra, como la distancia respecto al origen y la dirección cardinal.

En la figura 2.6 se puede ver una representación esquemática de un campo de heliostatos, en esta perspectiva, asumiendo el receptor en el punto (0, 0).

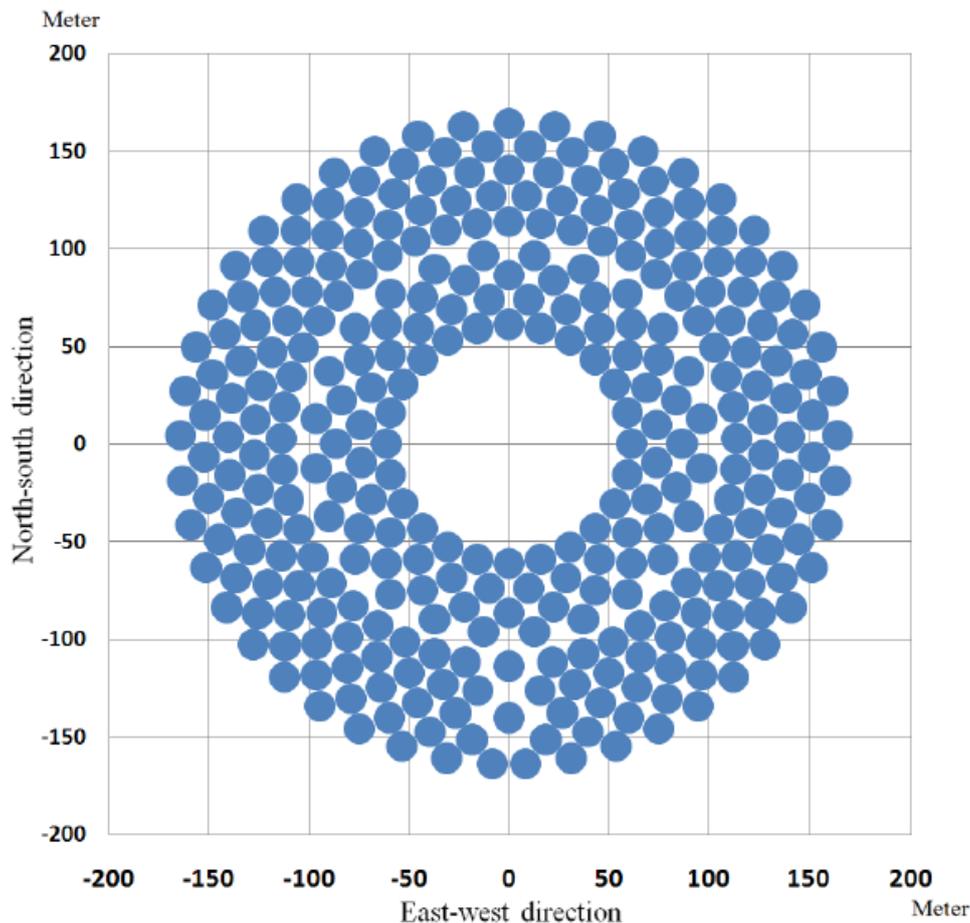


Figura 2.6.- Diseño de un campo solar de 317 heliostatos en torno al receptor [TAN11].

En este contexto, el diseño de la planta del campo solar supone entonces definir el conjunto de coordenadas o posiciones de los heliostatos en torno al receptor y cumpliendo ciertas restricciones. Algunas de estas restricciones pueden ser, por ejemplo, que todos los heliostatos estén al norte o al sur del receptor, o que se extiendan sobre una sección de superficie. Estos detalles concretos dependen, respectivamente, de la latitud del receptor, así como desde qué direcciones puede captar el receptor la radiación reflejada y la altura a la que se ubica [STI01].

La definición del conjunto de posiciones de cada heliostato sobre la superficie se puede hacer siempre de forma extensiva (“definición extensiva”), es decir, especificando cada grupo de coordenadas explícitamente. Sin embargo, estas posiciones pueden quedar definidas mediante un conjunto reducido de variables cuando se usa un algoritmo o modelo de colocación concreto. Esta segunda vertiente se denominará “definición intensiva” siguiendo la nomenclatura de la Teoría de Conjuntos.

El enfoque que se sigue generalmente para abordar la optimización del campo de heliostatos en la bibliografía es optar por un diseño compatible con la definición intensiva en primera instancia. De hecho, y profundizando en la referencia previa a [RAM12], la optimización del campo de heliostatos tiene dos componentes clave:

- La reducción del diseño del campo solar a un conjunto de variables.
- Un criterio de optimización modelado y que dependa de las variables de diseño del campo solar.

Como se puede apreciar, no solo se desliga la optimización de la distribución de los heliostatos de su papel de meros concentradores abriendo la puerta a otros múltiples objetivos de optimización, sino que se da por hecho que el diseño del campo solar ha de ser reducido a un conjunto de parámetros que lo definan.

Sin embargo, esta distribución generada mediante un modelo de ubicación se usa en ocasiones como un proceso de discretización de la superficie de la central [RAM12] [NOO12]. De esta forma, se emplea para generar un número finito de posiciones en torno al receptor sobre las que, en última instancia, escoger aquellas que mejor resultado general dan.

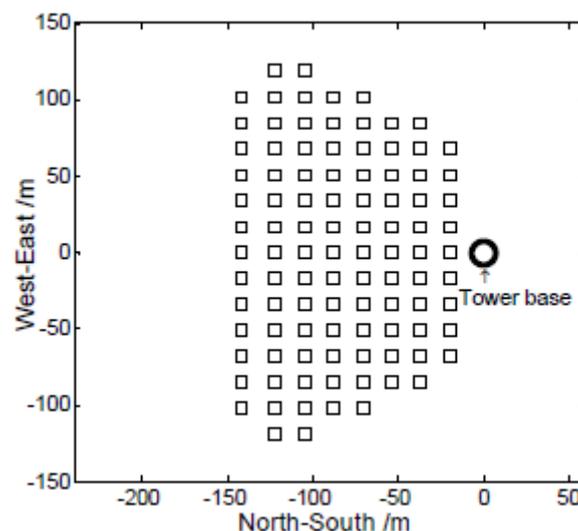


Figura 2.7.- Diseño de un campo solar con esquema Norte-Sur [YA009].

La mayoría de los campos de helióstatos siguen un esquema de intercalación entre helióstatos próximos. “North-South/South-North cornfield” (véase la figura 2.7) y “Radial cornfield” son algunos de los esquemas de diseño de la distribución o “mallado” de helióstatos sobre la superficie de la central tradicionales [YAO09]. En esta línea es además especialmente conocido el esquema de intercalación radial, en el que se opera con helióstatos inscritos en circunferencias. Estas circunferencias definen su rango máximo de movimiento sin colisiones con otros helióstatos adyacentes ([STI01] [RAM12] [NOO12] [ZHA09] entre otros), lo que facilita considerablemente aspectos de colocación coherente y segura de los helióstatos. El diámetro de esta circunferencia propia de cada helióstato, o “circunferencia característica”, se puede calcular simplemente teniendo en cuenta sus dimensiones, además de un posible espacio extra incluido para temas de logística y seguridad. La colocación de estas filas de “c”. Estas “circunferencias” (helióstatos) se colocan a su vez formando filas de circunferencias concéntricas en torno al receptor e intercaladas entre sí. Esta política de colocación, originaria de la Universidad de Houston [STI01], se conoce generalmente como “Radial Staggered” (traducible por “de Intercalación Radial”) en la bibliografía.

Siguiendo una política de distribución de intercalación radial sobre la superficie de la central se logra especialmente minimizar las interferencias entre helióstatos, tanto para redirigir la radiación al receptor, como para captarla en primera instancia [STI01]. Además, resulta muy sencillo limitar la distribución de los helióstatos en torno a un cierto sector circular definido (véase la figura 2.8).

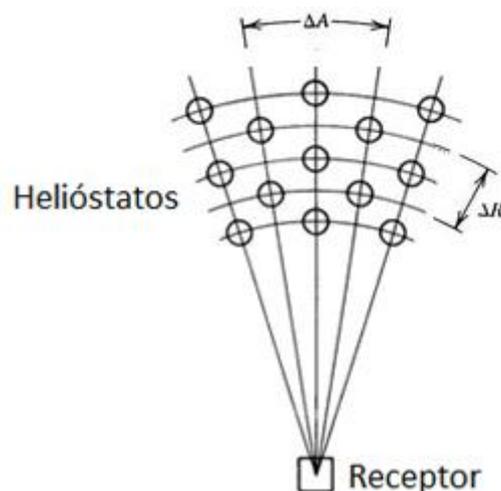


Figura 2.8.- Esquema de Radial Staggered (adaptado de [STI01]).

En su situación más básica, se podría pensar en aplicar un tipo de esquema de intercalación radial definiendo simplemente la separación entre las filas (las “circunferencias

concéntricas”) así como una separación angular entre los helióstatos (las “circunferencias características” de cada helióstato), manteniéndose constantes en todo momento. De esta forma la optimización se podría hacer únicamente en torno a dos variables. Sin embargo, la intercalación directa y constante supone un importante desperdicio de espacio, lo que influye también en la radiación que se concentra en el receptor: Si tras un bajo número de helióstatos ya se están ubicando a grandes distancias del receptor, la radiación que reflejen se dispersará y atenuará más.

Esta problemática se contempla generalmente mediante la variación de las distancias de separación conforme se está más alejado del receptor. Véase por ejemplo la segmentación que se aprecia figura 2.6: las cuatro primeras filas de helióstatos mantienen un espaciado constante entre sí formando un grupo, pero las cinco filas siguientes forman un grupo diferenciado del anterior, admitiendo muchos más helióstatos por fila.

Se recomienda especialmente la lectura de del capítulo 10 de [STI01] para más información sobre el esquema de intercalación radial, así como la aplicación del mismo que se hace en [ZHA09], muy detallada.

Es además interesante (especialmente para este proyecto), el diseño de un modelo de ubicación de helióstatos que se hace en [RAM12]. Con el enfoque que se propone, basado en 8 variables a optimizar (sin contar parámetros y tres variables más relativas sólo al receptor), se logra un esquema de ubicación por intercalación radial generalizado y mucho más flexible que permite alcanzar alternativas potencialmente mejores. En este modelo de ubicación se puede llegar además, como caso particular, a distribuciones totalmente uniformes de los elementos.

En contraposición a las distribuciones radiales mayoritarias, se puede destacar también en la bibliografía la propuesta de [NOO12]. Se trata de una heurística de colocación inspirada en la estructura en espiral de un disco filotáxico, como la distribución de los cogollos sobre un girasol. Esta heurística tiende a concentrar mejor los helióstatos en las posiciones más próximas al receptor restándole importancia, hasta un cierto punto, a las posibles interferencias entre ellos.

Según el estudio que se hace, tomando como referencia la central sevillana PS10, esta heurística mejora un 0.36% la eficiencia del campo solar de la central PS10 además de reducir significativamente los requisitos de espacio, un 15.8%. En la figura 2.9 se incluye un rediseño de dicha central con la heurística bioinspirada.

Se recomienda por lo tanto también la lectura de [NOO12] para más información sobre esta prometedora propuesta.

En lo referente a procesos de optimización aplicados al diseño del campo solar destaca especialmente la descripción que se hace en [RAM12], donde se pretende minimizar el coste de la energía producida. Se hace también un estudio sobre el impacto o correlación de cada

una de las variables de su esquema de colocación con el óptimo global. En [RAM12] se puede destacar además que se generan campos excesivamente grandes a priori para luego emplear las mejores posiciones de las que se disponen, como ya se ha anticipado.

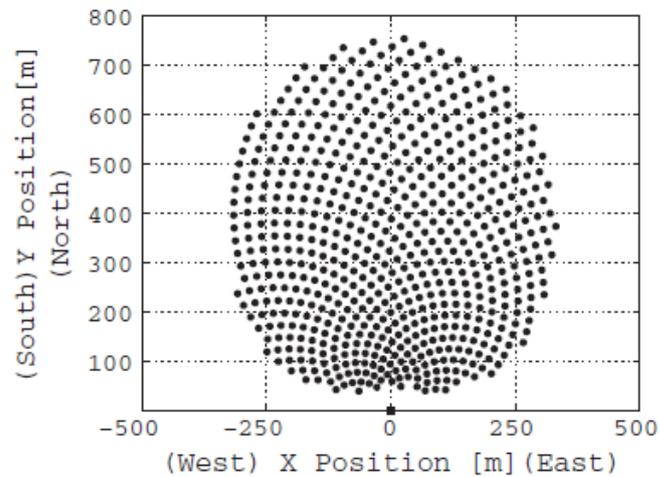


Figura 2.9.- Central PS10 rediseñada con la heurística de “Phyllotaxis Spiral” [NOO12].

Las variables del modelo de diseño en [RAM12] son optimizadas mediante tres algoritmos de optimización, el NSPOC, el MINUIT y un algoritmo genético para valorar sus soluciones.

El algoritmo NSPOC toma como punto de partida una solución que se supone cercana al óptimo. Procede entonces a realizar una búsqueda lineal en cada dimensión de forma independiente: Opera una cierta variable del modelo explorando su dimensión y, una vez fijada en el valor encontrado que mejor rendimiento genera, se pasa a la siguiente, hasta haber repetido el proceso en todas las dimensiones. Este comportamiento da lugar a una búsqueda en “zig-zag”. Según el estudio que se realiza es un método rápido y fiable respecto a la obtención de resultados.

MINUIT es una librería ampliamente usada que contiene múltiples algoritmos de búsqueda local que aplicar ya implementados. Se prueba con el optimizador SEEK, con una etapa de tipo metropolis, y con MIGRAD, el optimizador mejor valorado en MINUIT.

Finalmente se prueba también la optimización mediante un algoritmo genético sobre una población de soluciones posibles.

Según el estudio, las tres búsquedas llegan al mismo resultado pero, sin embargo, NSPOC lo hace de una forma mucho más rápida y eficiente a MINUIT y NSPOC, de tipo estocástico.

El método seguido en [NOO12] se caracteriza también por generar campos con un mayor número de heliostatos del que realmente se dispone para posteriormente calcular de forma parcial el valor que genera cada ubicación. Se ubican a continuación los heliostatos de los que se dispone en las mejores posiciones para finalmente hacer una valoración completa del

campo solar resultante. Esta valoración global se tiene en cuenta para seleccionar finalmente la mejor solución general, dado que el proceso se repite un cierto número de veces.

Es finalmente de interés mencionar que existen diversas herramientas capaces de simular y estudiar el comportamiento de campos solares en aspectos como el comportamiento óptico. En esta línea se pueden nombrar, por ejemplo, la herramienta de código libre Tonatiuh, (disponible en <https://code.google.com/p/tonatiuh/>), o DELSOL3, desarrollado por Sandia National Labs (EE. UU.).

2.1.5.- Modelado del rendimiento del campo solar

2.1.5.1- Introducción

En base a lo expuesto en la sección anterior, una vez se opta por un cierto esquema o modelo de diseño hay que definir un modelo de evaluación de cierta propiedad que dependa del diseño generado. Este modelo de evaluación se aplicará entonces como criterio de optimización [RAM12] para distinguir entre “mejores” y “peores” configuraciones.

Dado que se pretende estudiar el rendimiento del campo solar en su faceta reflectante sobre el receptor (“rendimiento óptico” [NOO12]), se debe diseñar un modelo que pueda valorarlo para un determinado diseño de campo solar, mediante el estudio de su comportamiento en un cierto periodo de tiempo. Este modelo de rendimiento puede verse directamente como un simulador de actividad del campo solar con capacidad de autoevaluación.

Esta tarea se aborda en gran parte de la bibliografía en la que se trata también la optimización del diseño del campo solar, compartiendo un enfoque muy similar: Se define un factor de rendimiento denominado “factor de rendimiento del campo” y expresado con algún tipo de subíndice bajo la letra η ([STI01], [NOO12], [TAN11], [YAO09] entre otros). Como un factor de rendimiento tradicional, este valor no solo se nombra mediante la letra griega η , sino que también es adimensional y comprendido en el rango real [0, 1] (siendo 0 el mínimo y 1 el máximo rendimiento alcanzable).

La actividad del campo solar se descompone a su vez en un conjunto de sub-factores de rendimiento, también adimensionales y comprendidos en el rango real [0, 1]. Este conjunto de sub-factores miden distintos aspectos que, directamente combinados mediante su producto, determinan el factor de rendimiento óptico global del campo η .

Concretamente, el modelado del rendimiento del campo solar se basa generalmente en cinco conceptos fundamentales que tienen repercusión directa en potenciales pérdidas de energía en el campo. Su medición consistente y ajustada en el rango real $[0, 1]$ da lugar a su consideración como factores. Estos conceptos se listan a continuación, en orden de impacto en el rendimiento (en base a un estudio en [STI01], aunque relativamente generalizable):

- Pérdidas por el Efecto Coseno.
- Reflectividad de los heliostatos.
- Pérdidas por atenuación atmosférica.
- Pérdidas de bloqueo y sombreado entre heliostatos.
- Pérdidas por dispersión de la radiación sobre el receptor.

De estos conceptos básicos se hablará en las siguientes subsecciones.

2.1.5.2- Pérdidas por el Efecto Coseno

La función de todo heliostato del campo solar es la reflexión de la radiación solar que capta hacia un cierto receptor donde se concentra la energía captada entre todos los heliostatos. Es por lo tanto deseable que cada heliostato refleje la mayor cantidad posible de radiación hacia el receptor.

En este contexto, el Efecto o Factor Coseno, de un cierto heliostato en un momento dado puede verse simplemente como una medida de la calidad de la orientación de dicho heliostato para captar y reflejar la máxima radiación hacia el receptor.

En una situación en la que el heliostato o colector solar no tuviera que redirigir el flujo solar hacia el receptor por reflexión, éste podría orientarse completamente de cara al Sol y captar la totalidad de la energía incidente. Sin embargo, un heliostato debe orientarse de forma que su normal sea la bisectriz del ángulo de incidencia de los rayos solares y el ángulo reflejado hacia el receptor, ambos ángulos iguales entre sí. Como se puede apreciar, este aspecto es simplemente la aplicación de las leyes fundamentales de la reflexión, a la que los heliostatos están sujetos. Esta restricción hace que la captación de los rayos no pueda ser generalmente máxima y dependa de otras circunstancias.

La superficie de reflexión efectiva del heliostato se reduce por el coseno de este ángulo de incidencia [STI01] [NOO12], de donde toma su denominación (véase la figura 2.9). El Factor Coseno indica entonces el grado de aprovechamiento de la superficie reflectante del heliostato, siendo igual al coseno del ángulo de incidencia de la radiación sobre dicha superficie θ_i :

$$\eta_{cos} = \cos \theta_i \quad (2.1)$$

Por consiguiente, este “factor de eficiencia reflectante” del helióstato oscila en el rango real $[0, 1]$. Un η_{cos} igual a 0 es el mínimo factor coseno que un helióstato puede tener y significa que el 0% de su superficie reflectante está concentrando la radiación recibida en el receptor. Por el contrario, un η_{cos} igual a 1 es el máximo factor coseno que un helióstato puede tener, significando que el 100% de la superficie del helióstato está reflejando la radiación captada sobre el receptor.

Es importante destacar que, asumiendo que el sistema de seguimiento solar del helióstato no tiene ningún tipo de limitación ni retraso con respecto a la orientación de su superficie reflectante para dirigir la radiación captada hacia el receptor, este factor dependerá exclusivamente de la posición aparente instantánea del Sol y la posición del propio helióstato respecto al receptor.

Este concepto queda muy bien ilustrado en la figura 2.10, en la que se muestra un receptor ubicado en una torre con dos helióstatos, uno al norte (helióstato A) y otro al sur (helióstato B), con una cierta posición aparente del Sol. Como se puede apreciar en dicha figura, el ángulo de incidencia sobre el helióstato A es muy cercano a 0° , por lo que el factor coseno de dicho helióstato es muy cercano a 1 (véase la expresión 2.1). Esto implica que la superficie reflectante del helióstato se aprovecha casi totalmente para dirigir la radiación hacia el receptor. En contraposición, la orientación que debe adoptar el helióstato B para dirigir la radiación que recibe hacia el receptor hace que el ángulo de incidencia sea inferior a 90° , lo que se traduce en una superficie reflectante práctica muy inferior a la totalidad del helióstato.

En una cierta latitud, el movimiento aparente del Sol es conocido a lo largo del año. Por consiguiente, la única posibilidad de variación del factor coseno sobre los helióstatos radica en un cambio de colocación respecto al receptor. Esto supone alterar las posiciones relativas de los helióstatos del campo solar en favor de permitirles mayor superficie reflectante útil en su orientación a lo largo del año. Esta búsqueda de las mejores posiciones de los helióstatos para maximizar su capacidad de reflexión es el pilar fundamental en torno al que se describe la optimización del diseño del campo solar. No en vano este aspecto se es consecuencia directa de la distribución en planta y puede suponer la mayor fuente de pérdida energética del campo (en torno al 23% en el estudio que se incluye [STI01]).

En cualquier caso y partiendo de la situación de la figura 2.10, ya se puede deducir una idea básica para el diseño de un campo solar: los helióstatos con un mayor aprovechamiento de su superficie reflectante estarán ubicados frente al Sol. Por consiguiente será más aconsejable la concentración de un mayor número de helióstatos al norte de la torre para centrales ubicadas en el Hemisferio Norte. En contraposición, para los helióstatos de una central del Hemisferio Sur, la colocación al sur de la torre les permitirá lograr un mejor η_{cos} general. Esto se debe simplemente a la diferente trayectoria del movimiento aparente del Sol sobre el cielo en ambos hemisferios.

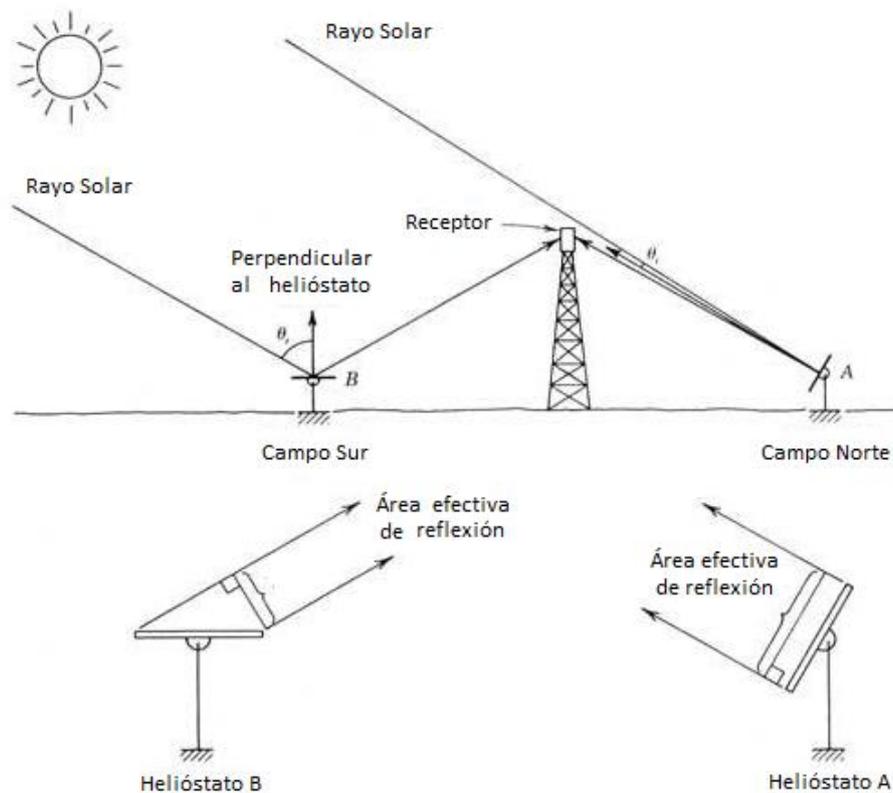


Figura 2.10.- Repercusión práctica del Factor Coseno sobre los heliostatos (traducida de [STI01]).

2.1.5.3- Reflectividad de los heliostatos

Este concepto valora simplemente la capacidad del heliostato de redirigir la radiación incidente sobre el mismo. Si un heliostato no tuviera capacidad reflectante alguna y absorbiera toda la radiación como un cuerpo oscuro ideal, entonces tendría un factor de reflectividad igual a 0. Por el contrario, un heliostato cuya superficie reflectante sea capaz de redirigir toda la radiación que incide en su superficie según su orientación tendría un factor de reflectividad máximo, igual a 1.

Este factor es normalmente considerado una propiedad intrínseca de cada heliostato, y que se mantiene constante en el tiempo, a pesar de que sus condiciones de mantenimiento puedan alterarlo. Por lo tanto no siempre se relaciona con el resto de factores, variantes en el tiempo, al mismo nivel.

En cualquier caso, y a pesar de la sencillez práctica del concepto, es el segundo responsable de pérdida de energía en el campo solar (un 10% en el estudio de [STI01]).

2.1.5.4- Pérdidas por atenuación atmosférica

Este concepto se refiere a las pérdidas energéticas que se producen en el campo solar por la distancia entre los helióstatos que reflejan la radiación y el receptor donde se recibe. En este trayecto, la radiación se atenúa y dispersa, por lo que no toda la radiación que redirigen los helióstatos alcanza finalmente el receptor. Estas pérdidas crecen, como es de suponer, con la distancia entre cada helióstato con el receptor, oscilando entre 0 (mínimo) y 1 (máximo) impacto.

Este factor entra en juego, por ejemplo, en la situación que se comentó para el factor coseno. A priori, para una central en el Hemisferio Norte lo más recomendable se anticipó como ubicar todos los helióstatos al norte de la torre del receptor. Sin embargo, esto no es intrínsecamente cierto y hay que valorar factores como que, una separación excesiva entre torre y receptor, va en detrimento del rendimiento. El impacto de este factor dependerá fundamentalmente del número de helióstatos a colocar.

En la figura 2.11 se ilustra el efecto de la distancia a recorrer por la radiación en la atmósfera, desde un enfoque inverso al tratado. Concretamente se representa la transmitancia atmosférica, que mide la capacidad de la atmósfera para no atenuar la radiación, en lugar de la atenuación que produce. Como se puede ver también en la figura 2.11, el estado atmosférico particular del día (claridad/nubosidad) también se tiene en cuenta en el modelo aplicado en [STI01].

En contraposición, en [NOO12] y [EWE] por ejemplo se aplica un modelo que calcula directamente la atenuación atmosférica e independientemente del estado atmosférico. Sin embargo, las variaciones entre escoger un cierto modelo u otro son mínimas [NOO12] y prácticamente despreciables en los valores obtenidos. El impacto del recorrido de la radiación reflejada en la atmósfera supone un 6% de pérdida energética, en el promedio anual, en el caso concreto de [STI01].

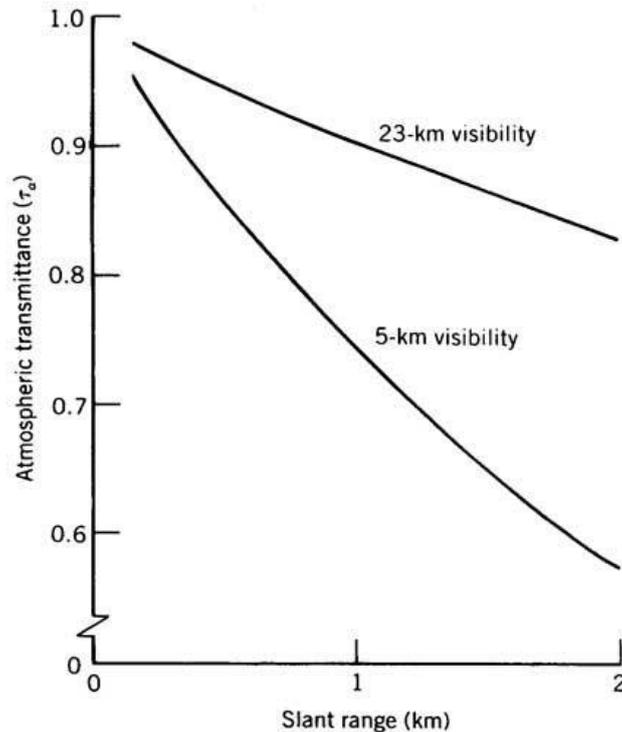


Figura 2.11.- Transmitancia atmosférica según distancia y estado atmosférico [STI01].

2.1.5.5- Pérdidas por bloqueo y sombreado entre heliostatos

Bajo el bloqueo y sombreado entre heliostatos se engloba el bloqueo o interferencia óptica que unos heliostatos pueden ejercer sobre otros según la orientación que tienen en un cierto instante.

La radiación que se capta y refleja desde un cierto heliostato se dirige, por la orientación del mismo, hacia el receptor. Sin embargo, cada heliostato se orienta en cada instante de la mejor forma posible para cumplir también con su cometido. Los heliostatos son cuerpos físicos que, obviamente, no dejan que la radiación los atraviese. Por lo tanto pueden producir dos situaciones distintas en su entorno:

- Un heliostato puede cortar el flujo de radiación incidente desde el Sol sobre otros
- Un heliostato puede bloquear el flujo de radiación redirigido desde otros hacia el receptor

La primera situación, desde el Sol hacia los heliostatos, se denomina "Sombreado" mientras que la segunda, desde los heliostatos hacia el receptor, se denomina "Bloqueo".

Por lo tanto, el mismo concepto base de interferencia entre heliostatos se puede desglosar en estos dos conceptos o casos particulares. Ambos quedan muy bien ilustrados en la figura 2.12.

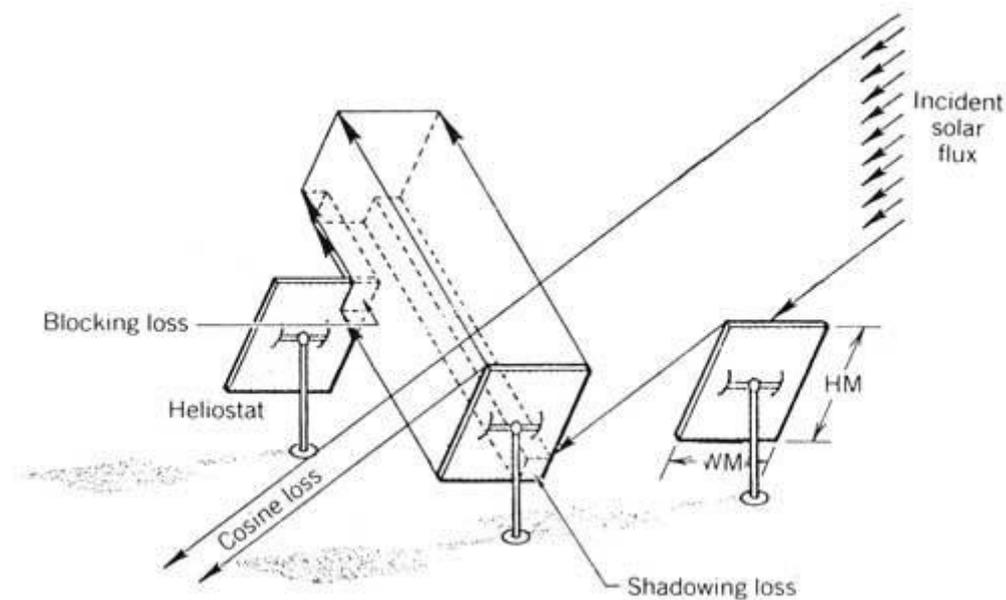


Figura 2.12.- Bloqueo y sombreado entre heliostatos [STI01].

El bloqueo y sombreado entre heliostatos, dada la altura a la que se ubica el receptor y que los diseños de las plantas (como el de intercalación radial ya mencionado) tienden a minimizarlo, no debería suponer una fuente importante de pérdida energética. En el estudio que se incluye en [STI01] sobre una central real, por ejemplo, supone un 5.6% de pérdida de energía en promedio anual. Se sitúa por lo tanto tras el factor coseno, la reflectividad y la atenuación atmosférica.

2.1.5.6- Pérdidas por dispersión de la radiación sobre el receptor

Este factor valora cómo la radiación, reflejada hacia el receptor desde los heliostatos, incide sobre él. La radiación que no incide adecuadamente sobre la superficie de absorción del receptor supone también una pérdida energética achacable al rendimiento óptico del campo y al diseño del receptor.

A grandes rasgos puede decirse que depende tanto del tamaño y diseño del receptor como de la capacidad óptica del campo para enfocarlos correctamente en cada instante.

En este cálculo se pueden tener en cuenta múltiples factores como defectos superficiales en los heliostatos, errores de seguimiento del Sol, dispersión de la imagen proyectada por los

helióstatos, entre otros, son los principales responsables de esta pérdida energética [NOO12] [STI01].

Sin embargo, su impacto en el rendimiento óptico es generalmente muy inferior al de los anteriores. En el estudio de [STI01] supone por ejemplo un discreto 2% de pérdida energética anual.

2.1.5.7- Aspectos de interés, denominación y formulación

Hay bastante uniformidad en la bibliografía respecto a la selección de los factores que determinan el rendimiento óptico del campo así como en su denominación. De hecho, las fuentes de pérdida anteriormente mencionadas tienen representación directa, aunque ciertos factores no se consideren siempre, se renombren ligeramente o se asocien/disocien.

Atendiendo a [STI01] y tomándolo como referencia inicial rendimiento óptico del campo η , se define en términos del factor coseno (η_{cos}), el factor sombreado (η_{shadow}), el factor bloqueo (η_{block}) y el factor atenuación atmosférica (η_{atten}), además el factor de dispersión (η_{spill}). Estos factores son derivación directa de la medición de las pérdidas energéticas homónimas, simplemente expresadas en términos de eficiencia. La asociación entre estos factores se muestra en la siguiente expresión:

$$\eta = \eta_{cos} \cdot \eta_{shadow} \cdot \eta_{block} \cdot \eta_{atten} \cdot \eta_{spill} \quad (2.1)$$

En [EWE] se manejan los mismos conceptos que en [STI01], aunque en nomenclatura sólo se reflejen explícitamente el factor coseno como η_{cos} , el factor atenuación atmosférica como η_{aa} . El resto, obviamente se tratan y exponen pero no se les asigna una simbología concreta. Es interesante destacar además que en [EWE] se incluye la reflectividad de los heliostatos, η_{ref} como otro aspecto a valorar.

En [YAO09], de nuevo, se define el rendimiento del campo en base a los mismos conceptos, siguiendo la nomenclatura de η_{cos} para el factor coseno, $\eta_{Atmosph.Att}$ para el factor atenuación atmosférica y el denominado factor de intercepción $\eta_{Intercept}$ como equivalente al factor η_{spill} en [STI01]. Al igual que en [EWE], se incluye también la reflectividad de los heliostatos, pero no como un factor más, sino como una característica asumible como constante. Nótese que en [YAO09] los factores de bloqueo y sombreado aparecen combinados en uno, $\eta_{Block\&shading}$. En cualquier caso, la asociación y disociación de estos factores de rendimiento es trivial ya que se combinan mediante su producto directo para definir η_{field} .

En [NOO12] se incluye la formulación más concisa y descriptiva encontrada para tratar el modelado del rendimiento óptico. Se hace uso de los factores coseno η_{cos} , bloqueo y sombreado combinados η_{sb} , atenuación atmosférica η_{aa} , reflectividad η_{ref} e intercepción η_{ict} como en [YAO09]. El factor de rendimiento óptico se obtiene de forma análoga a la expresión 2.1. Sin embargo, se puede destacar del modelo de [NOO12] la posibilidad de ponderación del rendimiento óptico con la insolación o radiación solar instantánea. Este aspecto es muy interesante para dar una dimensión realista a la valoración. Piénsese por ejemplo en dos campos solares, uno con un diseño deficiente ubicado en una zona de gran insolación y otro en una zona donde la radiación solar es muy débil aunque con un diseño bien optimizado. El rendimiento óptico puro lleva a escoger directamente la ubicación y diseño de la segunda central. Sin embargo, teniendo en cuenta el papel de la radiación incidente, la segunda central gana en valoración porque, aunque no aproveche especialmente bien “los recursos” (la radiación), ésta tiene una densidad elevada. Por lo tanto, el rendimiento óptico adquiere un valor más realista elevando la valoración de la central con un diseño mal optimizado. Un ejemplo complementario se tendría, por ejemplo, evaluando el factor coseno de una posición frente a otra en una misma central, donde debe influir directamente la densidad de radiación incidente de cara a elegir una frente a otra.

Otro detalle importante que aparece en [NOO12] es el hecho de expresar el factor de rendimiento η en una dimensión temporal. Como es de suponer, el rendimiento óptico es tenido en cuenta y promediado en un cierto periodo (un año según [NOO12]). Este aspecto queda muy bien definido en la propia formulación que se hace:

Sea η el rendimiento o eficiencia óptica instantánea definida como:

$$\eta = \eta_{cos} \cdot \eta_{shadow} \cdot \eta_{block} \cdot \eta_{atten} \cdot \eta_{spill} \quad (2.2)$$

La eficiencia del campo solar, a lo largo de cada día en el marco temporal de un año y ponderándola con la insolación I_b , se obtiene de la siguiente expresión:

$$\eta_{year,I} = \frac{\sum_{day=1}^{365} \int_{sunrise}^{sunset} I_b(t) \eta(t) dt}{\sum_{day=1}^{365} \int_{sunrise}^{sunset} I_b(t) dt} \quad (2.3)$$

En caso de querer calcular la eficiencia del campo solar sin contemplar la densidad de radiación instantánea incidente bastaría simplemente con eliminar el factor $I_b(t)$ correspondiente a la insolación instantánea.

Un aspecto importante a tener finalmente en cuenta es el hecho de que los conceptos expuestos, y sobre los que se basa el rendimiento óptico, se han tratado en términos conceptuales genéricos. De hecho esta amplitud conceptual permite múltiples interpretaciones y estrategias de implementación concretas. Basta observar, por ejemplo, que existen distintos modelos estimativos de la atenuación atmosférica aplicable.

Sin embargo, los aspectos más destacables encontrados son el cálculo parcial del modelo de rendimiento que se hace en [RAM12] y [NOO12] cuando la solución evaluada no altera ciertos aspectos de la evaluación anterior (en el caso de [RAM12]) y cuando se valoran a priori los sub-factores de mayor impacto al escoger las posiciones en campos sobredimensionados (en el caso de [NOO12]).

De [NOO12] se destaca además la temporización de muestras variables en la que se persigue recorrer el tiempo de estudio (un año) tomando más muestras cuando la actividad óptica del campo resulta más relevante (véase la expresión 2.3).

Para más información sobre el modelado rendimiento óptico del campo solar se recomienda la lectura detallada de [NOO12] y [EWE], donde se aborda detalladamente. En [YAO09] se exponen además algunos cálculos de interés para el modelado de rendimiento óptico.

2.2.- Ángulos entre el Sol y la Tierra

En esta sección se resumirán muy brevemente algunos conceptos derivados de la posición de la Tierra respecto al Sol. Se anticipa que se pueden encontrar, de forma mucho más detallada, en el capítulo 3 de [STI01]. En la sección 2.4 de [HON] se abordan también, con un enfoque más conciso pero igualmente de gran calidad destacándose además su presentación interactiva.

2.2.1.- Movimiento espacial de la Tierra

La Tierra se mueve en torno al Sol describiendo una trayectoria elíptica que recorre completamente cada 365.25 días. Dicho movimiento, conocido como “movimiento de traslación”, se realiza en el denominado plano eclíptico.

En el movimiento de traslación se mantiene una distancia media entre ambos cuerpos celestes de $1.496 \cdot 10^{11}$ m aproximadamente, que define la “unidad astronómica” (1AU). Sin embargo, el punto más alejado de la trayectoria, denominado afelio, sitúa al Sol y la Tierra a una distancia de $1.52 \cdot 10^{11}$ m. Esto ocurre en torno al 3 de julio. Por el contrario, en el punto más cercano entre el Sol y la Tierra, denominado perihelio, la separación es de $1.47 \cdot 10^{11}$ m. Esto ocurre en torno al 2 de enero [STI01].

En la figura 2.13 se muestra el movimiento de traslación terrestre destacando los puntos singulares, las estaciones del Hemisferio Norte e, inmediatamente debajo, un gráfico de la variación de la distancia Sol-Tierra según los meses.

Además, de forma complementaria y simultánea al movimiento de traslación, la Tierra gira sobre sí misma en lo que se conoce como “movimiento de rotación”. Dicho movimiento se hace en torno a un eje imaginario que va desde el Polo Norte al Polo Sur, que está inclinado 23.45° respecto al plano eclíptico y cuya dirección se mantiene constante alineada con la estrella Polar (con 45 minutos de arco aproximadamente). El movimiento de rotación da lugar a los días y las noches mientras que la inclinación con la que se realiza, combinada con el movimiento de traslación, da lugar a las distintas estaciones del año.

Ambos movimientos determinan además el movimiento aparente del Sol en la Tierra del que ya se ha hablado anteriormente. De forma más precisa, la situación de la Tierra en un punto concreto de su trayectoria de traslación, es decir, un día del año, determinará la trayectoria aparente que describirá el Sol ese día, dependiendo de la latitud desde donde se observe. Es el movimiento de rotación terrestre el que hará “moverse” al Sol por su trayectoria aparente definida a lo largo del día.

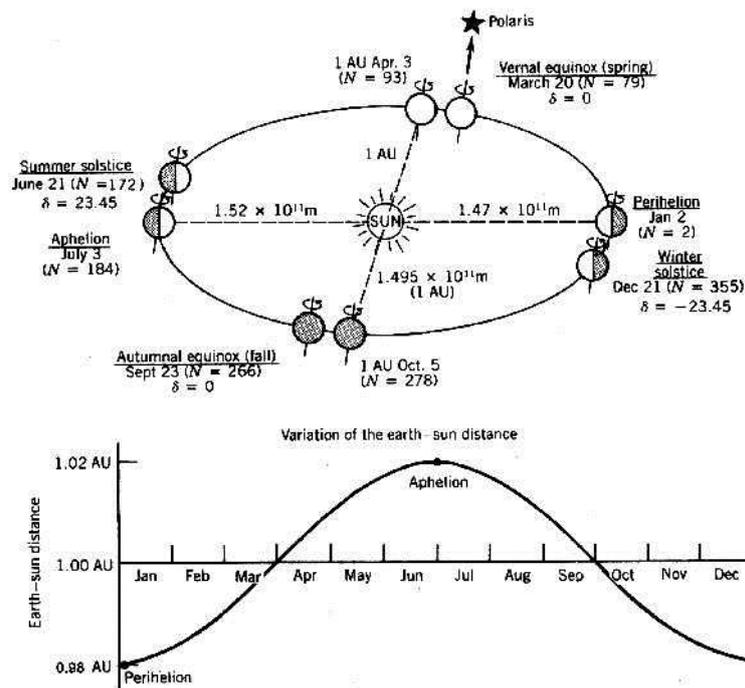


Figura 2.13.- Movimiento de traslación terrestre con variaciones de la distancia Sol-Tierra, puntos y fechas singulares para 1981 (STI01).

2.2.2.- Ángulo de declinación

El ángulo de declinación δ se define como el ángulo formado por una línea imaginaria trazada desde el centro de la Tierra hacia el centro del Sol y el plano ecuatorial terrestre. Este ángulo se ilustra en la figura 2.14.

Este ángulo varía con las estaciones debido a la mencionada inclinación terrestre sobre su eje de rotación y al propio movimiento de traslación de la Tierra. Si la Tierra no estuviera inclinada sobre este eje, el ángulo de declinación siempre sería de 0° . Sin embargo, al estar inclinada 23.45° , la declinación oscila en el rango $[-23.45, 23.45]$ ($^\circ$). Esta situación se ilustra en la figura 2.15. Como se puede apreciar en dicha figura, el ángulo de declinación sólo es de 0° en los equinoccios de primavera y otoño (en torno al 22 de marzo y 23 de septiembre respectivamente). Por el contrario, es de 23.45° en el solsticio de verano (en torno al 21 de junio) y de -23.45° en el solsticio de invierno (en torno al 22 de diciembre) [STI01] [HON].

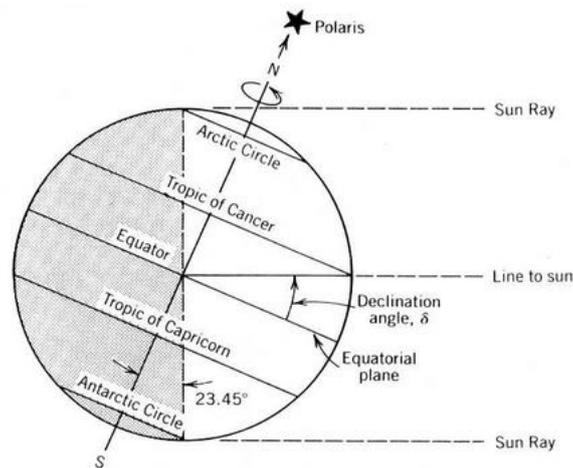


Figura 2.14.- Representación del ángulo de declinación [STI01].

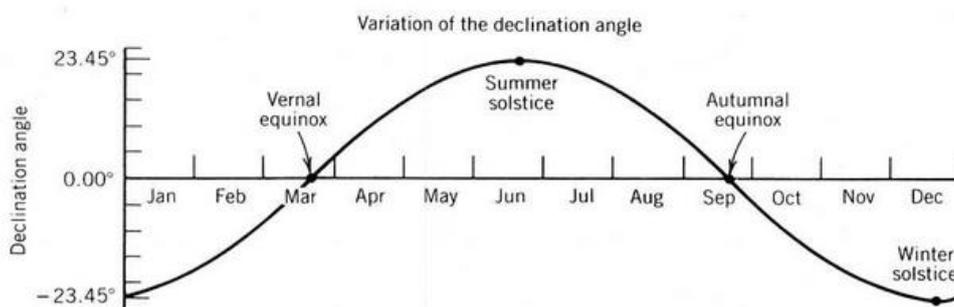


Figura 2.15.- Variación del ángulo de declinación a lo largo del año [STI01].

2.2.3.- Hora solar

La hora solar es también un sistema horario de 24 horas cuya principal diferencia es que se describe en torno a las 12:00 horas, es decir, exactamente en línea con el meridiano local. Por lo tanto, esta hora depende de la longitud de la ubicación y suele ser distinta a las horas que se siguen en cada zona, que se establecen a nivel político y no natural, así como por la excentricidad de la órbita terrestre [HON].

Esta es la hora que se sigue para realizar cálculos como estimar la posición aparente del Sol, algo muy importante en el contexto de los sistemas relacionados con la captación de la radiación solar.

Puede verse, por lo tanto, como una hora natural regida por el medio día real marcado por la posición aparente del Sol.

2.2.4.- Hora angular

La hora solar varía con el movimiento de rotación terrestre a lo largo del día en un intervalo de 24 horas. Sin embargo, es posible expresar una misma hora solar como el ángulo que forma el plano que contiene al meridiano donde se toma la hora y el meridiano con el que se alinea en ese momento el Sol [STI01]. Esta medida angular se conoce como hora angular, y se representa generalmente como ω . Este concepto se ilustra en la figura 2.16.

Como se puede deducir de la definición de hora angular, cuando sea el mediodía (12:00 en hora solar), se tendrá una hora angular de 0° . Además, como la Tierra rota 15° cada hora aproximadamente y el mediodía son las 12 horas, la hora angular irá desde -180 a 180 ($^\circ$) siendo 0° el mediodía [HON]. El intervalo en el que se define la hora angular se muestra en la figura 2.17.

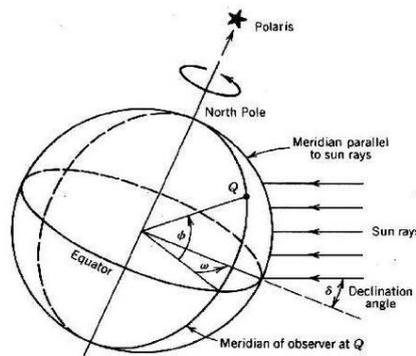


Figura 2.16.- Representación de la hora angular ω [STI01].

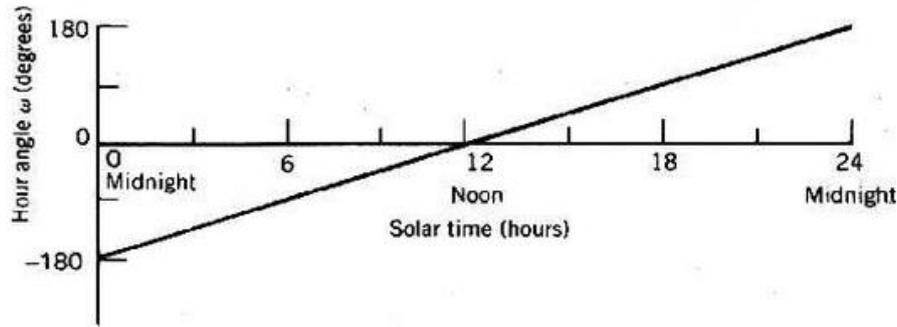


Figura 2.17.- Variación de la hora angular a lo largo del día [STI01].

2.3.- Métodos heurísticos de optimización

2.3.1.- Problemas de optimización global

Frecuentemente se plantean problemas en los que se busca encontrar el valor óptimo de una función. Como se anticipó en el capítulo anterior, desde aspectos tan triviales como la selección del camino más rápido para ir a un cierto destino, hasta decisiones relevantes como la mejor ubicación del nuevo punto de distribución de una compañía en términos de afluencia de clientes o diseño de envases, se pueden encontrar problemas de optimización en prácticamente todas las áreas y ámbitos.

Intuitivamente, la optimización puede definirse como la selección de la mejor opción de un conjunto de candidatos posibles, en base a un cierto criterio, y cumpliendo unas restricciones determinadas.

En términos más precisos, la Optimización Global, en adelante OG, es un área de las Matemáticas Aplicadas en la que se estudian la teoría y metodología para la obtención del valor óptimo, es decir, máximo o mínimo, de una función definida en un cierto dominio y con unas características determinadas.

Formalmente, un problema de OG se expresa, desde la perspectiva de la maximización y siguiendo el esquema de [PLA12] como:

$$\max f(x) / x \in X \quad (2.4)$$

Siendo X un conjunto no vacío en R^n y f una función continua. La solución u “óptimo” de este problema es, por lo tanto, el valor máximo de f , denotado como f^* , así como todos los puntos $x^* \in X$ tales que:

$$f^* = f(x^*) \geq f(x), \quad \forall x \in X \quad (2.5)$$

El conjunto formado por aquellos puntos de la función en la que se alcanza el óptimo se puede denominar X^* [RED08]:

$$X^* \equiv \{x \in X / f(x) = f^*\} \quad (2.6)$$

Partiendo de la formulación 2.2, la expresión de un problema de OG desde la perspectiva de la minimización es:

$$\min f(x) / x \in X \quad (2.7)$$

Del mismo modo, X es un conjunto no vacío en R^n y f una función continua. Entre estos dos enfoques en la definición de un problema de optimización se puede establecer además la siguiente relación:

$$\min f(x^*) / x \in X = -\max(-f(x)) / x \in X \quad (2.8)$$

En base a la expresión 2.8 se puede afirmar que minimizar $f(x)$ es equivalente a maximizar $-f(x)$. Esta idea se ejemplifica gráficamente en la figura 2.18., en la que se puede apreciar que el máximo de $-f(x) = y = x^2$ es equivalente al mínimo de $f(x) = y = x^2$ (ambos en rojo).

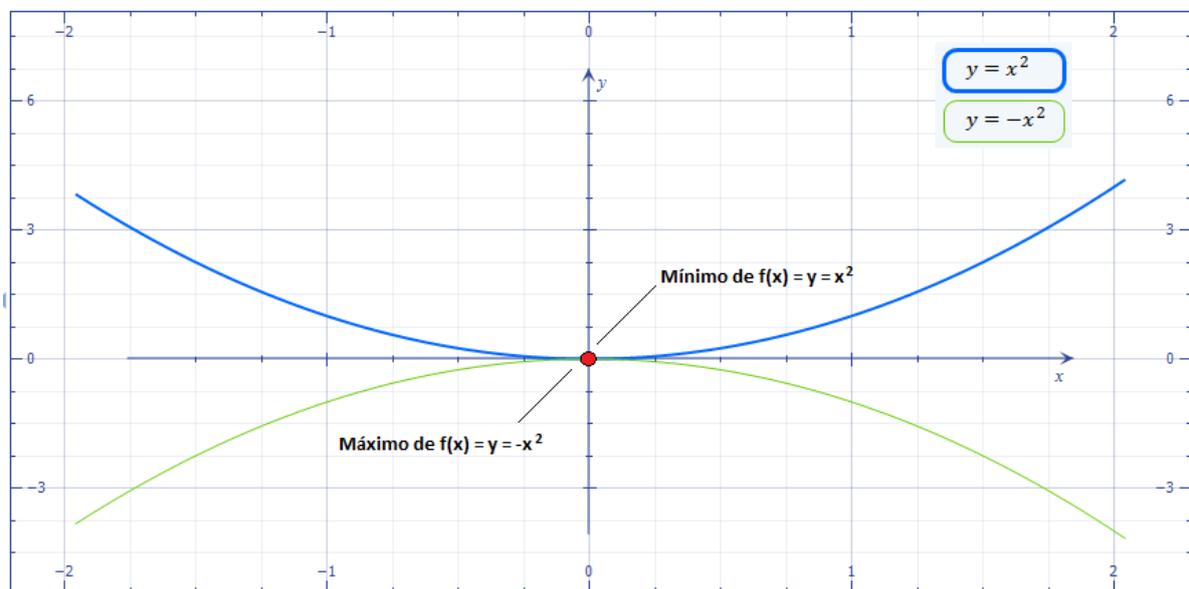


Figura 2.18.- Ejemplo de relación entre un problema de maximización y de minimización.

En el contexto de los problemas de optimización se cuenta además con una terminología propia en la que se pueden destacar, básicamente, tres entidades principales.

En primer lugar, la función que se pretende optimizar se nombra generalmente como **función objetivo** del problema. Además, el dominio de $f(x)$ o conjunto X se conoce con el sobrenombre de **espacio de búsqueda** del problema. Finalmente, los elementos del mencionado espacio de búsqueda reciben el apelativo, por extensión, de **soluciones candidatas** o posibles del problema.

Atendiendo a la definición formal presentada de un problema de optimización resulta evidente su generalidad. Es por lo tanto fácil entender lo aplicable del concepto en gran variedad de situaciones.

En el caso más sencillo de problema de optimización que se puede presentar se cuenta con una función con un comportamiento conocido y en un dominio definido en el que basta con analizar todos los extremos relativos de la función hasta encontrar el que es además un extremo absoluto, máximo o mínimo según el problema.

La dificultad de este tipo de problemas, sin embargo, normalmente reside en hallar la expresión analítica de la función objetivo y en la naturaleza de la misma.

2.3.2.- Técnicas de optimización global

El estudio de la resolución, por métodos algorítmicos, de problemas de optimización como los definidos en la sección anterior es un campo de investigación muy activo. Esto es una consecuencia directa de la propia extensión y aplicabilidad de los problemas de este tipo.

Idealmente, un algoritmo de Optimización Global debe tener las siguientes cualidades:

- **Corrección:** No llegar a resultados incorrectos
- **Completitud:** Encontrar todas las soluciones posibles
- **Finitud:** Garantizar la convergencia sobre el problema
- **Certeza:** Probar la existencia/inexistencia de soluciones

Sin embargo, muy pocos algoritmos pueden asegurar realmente estas cuatro propiedades. Uno de los problemas más comunes que presentan, en especial los más básicos, es la consecución de resultados incorrectos al perder la perspectiva del dominio completo de la función y centrarse en torno a óptimos locales.

Un óptimo local, desde la perspectiva del máximo, se define formalmente dentro del contexto de la expresión 2.4 como:

$$\exists \text{ un valor } a \mid x \in (x_0 - a, x_0 + a) \rightarrow f(x) \leq f(x_0) \quad (2.9)$$

Más intuitivamente, una función tendrá un óptimo (máximo) local en un cierto punto x_0 cuando el valor que alcanza la función en este punto sea mayor o igual a todos los valores que toma la función en una región que envuelve al punto x_0 . La traducción al enfoque del mínimo es trivial, bastando simplemente con invertir el signo \leq en la expresión 2.9.

Aquellos algoritmos que deban ser aplicables a problemas de OG, **optimizadores globales**, habrán de realizar búsquedas manteniendo como referencia el dominio completo de la función. En caso contrario, se estará ante meros **optimizadores locales**, que exploran un entorno relativamente pequeño del dominio de la función, y cuando encuentran un óptimo, dan por concluida la búsqueda. Esta característica hace a los optimizadores locales tan sencillos y rápidos como inciertos sobre problemas de OG pues los resultados dependen principalmente de dónde comience la exploración. No obstante, existe también la posibilidad de aplicar optimizadores locales como componentes de optimizadores globales en ciertas estrategias que se verán posteriormente.

Los distintos algoritmos de OG pueden clasificarse, como aproximación general, en dos grandes grupos, **exactos** y **heurísticos** (figura 2.19).

Los algoritmos exactos se caracterizan por hallar, con certeza, el óptimo global en caso de que exista. Esta tarea se lleva a cabo sin importar el esfuerzo empleado, aunque se tenga incluso que explorar el espacio de búsqueda de forma rigurosa. Este enfoque es fiable y útil sobre problemas finitos de poca complejidad, pero es inviable para grandes problemas por el coste computacional asociado a su aplicación y la necesidad de contar con información global detallada del problema.

Los algoritmos heurísticos, en contraposición a los exactos, sacrifican la certeza de encontrar teóricamente el óptimo global en caso de que exista en favor de una mayor aplicabilidad. En concreto, su gestión de la exploración del espacio de búsqueda les permite ahorrarse una búsqueda exhaustiva y poder tratar problemas no computables con vías determinísticas. Dentro de la metodología heurística es además importante destacar las técnicas **estocásticas**, punto de interés fundamental en este proyecto. Este tipo de algoritmos heurísticos se caracterizan por apoyar su exploración del espacio de búsqueda en factores aleatorios. Se pretende así que sean menos estáticos y que sus resultados sean menos maleables a planteamientos poco refinados de resolución.

Los algoritmos heurísticos optan por no abarcar el espacio de búsqueda completo, algo muy costoso, sino que tratan de centrarse en aquellas partes que, según su diseño y funcionamiento, consideran más prometedoras. Esto permite, además, que se apliquen en situaciones en las que no se tiene un conocimiento general y preciso del espacio de búsqueda.

Al evitar una exploración completa, sin embargo, se pierde la certeza de haber encontrado la solución exacta. Este hecho hace que este tipo de algoritmos necesiten frecuentemente basar su ejecución en haber llegado a una cierta condición de parada o en haber ejecutado

sus procedimientos un número determinado de veces. Suele ser posible además tratar de regular o “calibrar” la validez de las soluciones encontradas (cercanía al óptimo global) y el coste de su obtención con una gestión de estos criterios de ejecución.

Esta posibilidad de ajuste de ciertos algoritmos, especialmente las condiciones de parada de aquellos catalogables como estocásticos, permite incrementar la posibilidad de hallar una solución aceptable. Si se piensa por ejemplo en un simple límite de ejecuciones de valor “n”, se incrementan la probabilidad de encontrar la posición de un óptimo global o, en su defecto, un valor que pertenezca a su entorno $A_x(\epsilon)$. Este entorno o “vecindario” se puede definir, siguiendo a [RED08] como se muestra en la expresión 2.10.

$$A_x(\epsilon) = \{x \in X / \|x - x^*\| \leq \epsilon\} \quad (2.10)$$

Los elementos x, x^*, X , de esta expresión son, como se define para la expresión 2.4, un cierto punto del espacio de búsqueda de la función objetivo, un punto donde se alcanza un óptimo global y el dominio de dicha función respectivamente. El único elemento nuevo a considerar es, por lo tanto, la amplitud del entorno ϵ . Esta amplitud tendería consiguientemente a 0, es decir, hacia un óptimo global exacto, en la situación de aumento indefinido del número de ejecuciones permitidas hacia el infinito.

Téngase además en cuenta que, los métodos heurísticos no tienen incapacidad práctica para encontrar la solución óptima del problema, la misma que podría encontrar un algoritmo exacto. Sin embargo, y por la naturaleza de esta metodología, la demostración de que una solución sea el óptimo global exacto es normalmente inviable dependiendo del problema y el algoritmo concreto aplicado. Se trata entonces fundamentalmente de una situación de incertidumbre teórica.

Los algoritmos heurísticos son de gran interés puesto que, en numerosos problemas de optimización es preferible (o incluso necesario) llegar a una solución aceptablemente válida en un tiempo finito en lugar de no poder encontrar ninguna solución por falta de recursos computacionales (incapacidad fáctica) o desconocimiento parcial del espacio de búsqueda (incapacidad teórica).

Las propiedades de estos algoritmos hacen que supongan la rama más prolífica y activa en los últimos años de investigación en el área de la Optimización Global.

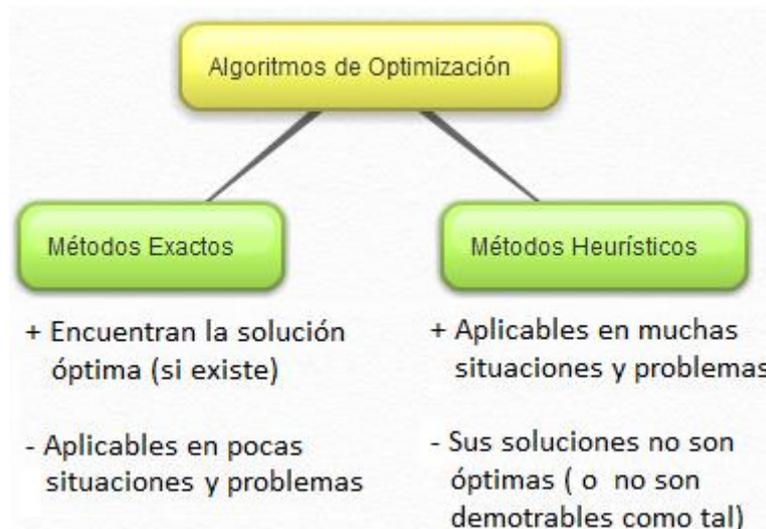


Figura 2.19.- Vertientes clásicas de la Optimización Global.

2.3.3.- Clasificación básica de los métodos heurísticos

Partiendo de lo expuesto en la subsección anterior, se puede tomar como rasgo principal de los métodos heurísticos su orientación a la aplicabilidad, especialmente en problemas de gran complejidad.

Los algoritmos heurísticos se basan en la aplicación de técnicas y reglas de resolución de problemas generales o concretos (el conocimiento específico de un cierto problema) para acelerar (o directamente posibilitar) el proceso de encontrar una solución aceptable. Las reglas pueden verse como generalizaciones o “juicios intuitivos” que se han mostrado útiles para resolver problemas de un cierto tipo, pero su validez es relativamente incierta o carecen de una justificación formal. En este grupo se destaca por intereses propios del proyecto el enfoque estocástico, cuyo proceso de búsqueda se ve influido por aspectos aleatorios. Este aspecto, por extensión, hace inestables sus resultados para la misma instancia de un cierto problema (especialmente en un tiempo breve de ejecución).

Esta naturaleza fundamentalmente resolutoria y de fiabilidad incierta está, de entrada, reflejada en la propia denominación de la metodología. Concretamente, y a título de curiosidad, es interesante destacar que los términos “heurístico” y “estocástico” ya mencionados proceden del griego y tienen las siguientes grafías y significados originales (según el Diccionario de la Real Academia Española):

estocástico, ca.

(Del gr. *στοχαστικός*, hábil en conjeturar).

heurístico, ca.

(Del gr. *εὕρισκιν*, hallar, inventar, y *-tiko*).

Las soluciones encontradas pueden o no ser realmente las óptimas. Sin embargo, son valiosas en la medida de que no sea posible (o necesaria) una resolución exacta de dichos problemas por el coste que supondría (recursos computacionales, tiempo de ejecución que se necesitaría...).

Tomando como base la clasificación que se hace en [PLA12], se va a dividir la Metodología Heurística en dos grandes subgrupos: **Métodos Simples** y **Métodos Metaheurísticos** o “Compuestos”. Estos a su vez podrán ser catalogables como **estocásticos** en caso de que su exploración del espacio de búsqueda se apoye en valores aleatorios como ya se ha mencionado (figura 2.20).

Los **Métodos Simples** se construyen en torno a un cierto principio, como por ejemplo, escoger en cada instante la solución óptima instantánea. Este tipo de algoritmos son sencillos de diseñar e implementar. Además, son bastante eficientes y obtienen muy buenas soluciones en ciertos problemas. Sin embargo, suelen tener dificultad para salir del entorno de óptimos locales. En este subgrupo se pueden destacar los “Algoritmos de Búsqueda Local” y las “Heurísticas Constructivas”.

Los Algoritmos de Búsqueda Local, también conocidos como “de mejora iterativa”, toman una solución al problema como punto de partida. Ésta solución tiene un cierto valor asociado de la función objetivo que se intenta mejorar progresivamente. La mejora se realiza analizando soluciones candidatas generadas mediante leves modificaciones sobre la solución de referencia. Estas soluciones candidatas que se generan a partir de la modificación de la solución de referencia se denominan “estados vecinos” mientras que el proceso de modificación en sí recibe el nombre de “movimiento”.

A nivel general, en una cierta iteración, un algoritmo de búsqueda local se “mueve” de la solución de referencia generando los estados vecinos. Estos estados vecinos son evaluados para ver cuál maximiza o minimiza (según el problema) la función objetivo. Se escoge entonces el óptimo y se actualiza la solución de referencia.

Los Algoritmos Heurísticos Constructivos se caracterizan por llegar a la solución partiendo de un conjunto vacío al que van añadiendo los elementos mejor valorados, de un conjunto de soluciones factibles en cada iteración, hasta alcanzar una solución completa.

El tipo más básico y más extendido del modelo de heurística constructiva es la Heurística Voraz. Este esquema es, además, de interés particular para el proyecto, ya que se comparará su desempeño con los resultados del algoritmo evolutivo UEGO, que es metaheurístico y además estocástico.

Los **Métodos Metaheurísticos** se caracterizan porque, comúnmente, aplican técnicas genéricas de resolución de problemas y se apoyan además en métodos simples para explorar regiones concretas del espacio de búsqueda. Esta relación de “uso” de los algoritmos metaheurísticos con los métodos simples es la principal responsable de su

denominación. Se pueden definir de forma sencilla como heurísticas de propósito general. Las técnicas e ideas en las que se basan son muy variadas. Es también muy frecuente que los métodos metaheurísticos sean además estocásticos. De hecho, numerosos algoritmos metaheurísticos se inspiran en procesos físicos, como la cristalización de algunos materiales o el temple de los metales, y biológicos, como la Teoría Evolutiva de Charles Darwin, ambos con cierto grado de aleatoriedad intrínseca.

Esta estructura les facilita una visión global de los problemas, un alto grado de aplicabilidad, y, en cierto modo, la fiabilidad de la técnica que aplican.

Los métodos metaheurísticos más conocidos son los “bioinspirados” (algoritmos genéticos, meméticos, colonias de hormigas...) y los “Basados en trayectorias” (búsqueda aleatoria pura, búsqueda adaptativa pura, enfriamiento simulado...).

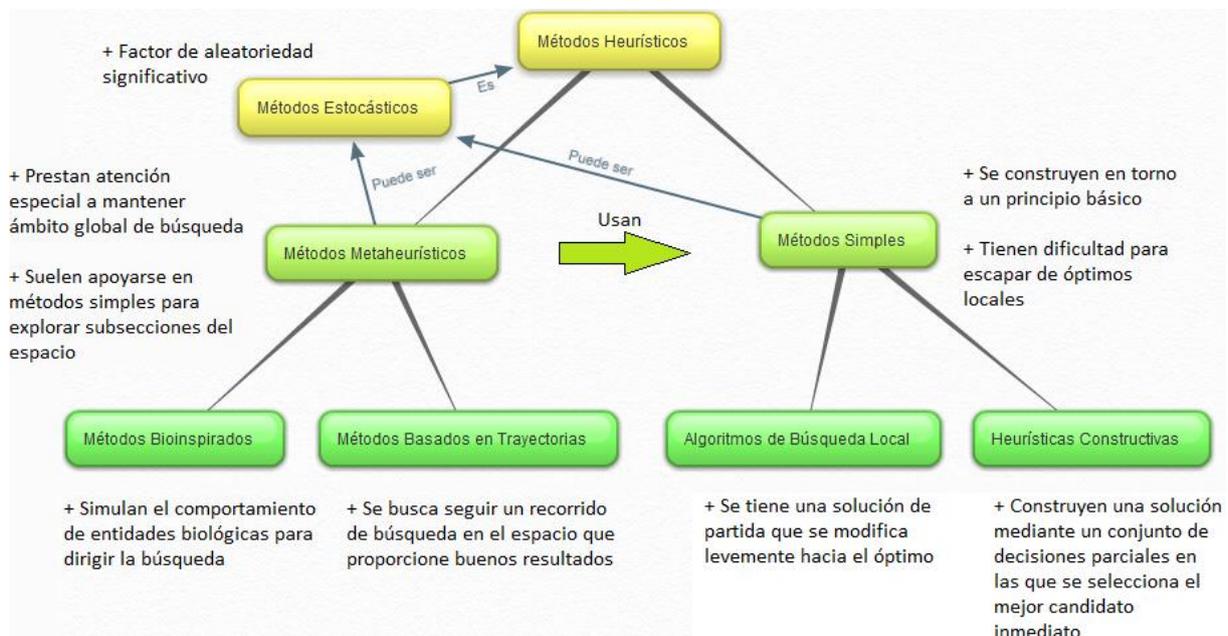


Figura 2.20.- Clasificación básica de los principales métodos heurísticos.

Los Métodos Bioinspirados simulan el comportamiento de entidades biológicas modelando el problema en sus términos. Piénsese por ejemplo en las metaheurísticas basadas en la Teoría Evolutiva. Esta teoría se trata de una metodología de optimización en sí misma en la que los propios seres vivos tienden a mejorar sus aptitudes de supervivencia (“optimizar su especie”) generación tras generación. Este proceso es, paradójicamente, tan eficaz como aleatorio e impredecible y se ajusta perfectamente a la idea de “juicio intuitivo” mencionada: no se puede demostrar formalmente ni garantizar su fiabilidad, pero ésta es un hecho.

Los Métodos Basados en Trayectorias prestan especial atención a la forma en la que se recorre el espacio de búsqueda. Se puede pensar, por ejemplo, en seguir un recorrido planificado del espacio que permita llegar al valor óptimo sin tener que realizar una exploración completa. Un enfoque contrario a este ejemplo sería una exploración sin planificación alguna (totalmente aleatoria) que garantice que no se cae en óptimos locales y que se mantiene el ámbito global de la búsqueda.

2.3.4.- Búsqueda aleatoria pura

Fundamentos

La Búsqueda Aleatoria Pura, en adelante BAP, es catalogable como una metaheurística basada en trayectorias según la clasificación de la subsección anterior. Además se caracteriza por la aleatoriedad, como se puede deducir de su propio nombre, lo que le vale la consideración de estocástico. De hecho, en [RED08] se clasifica directamente como un “Método de Búsqueda Aleatoria”.

Siguiendo este esquema algorítmico, en cada iteración se genera un punto “x” dentro del espacio de búsqueda del problema y siguiendo una distribución uniforme sobre dicho espacio. Se calcula entonces el valor de la función objetivo en el punto “x” generado.

En caso de que el valor obtenido en dicho punto sea mejor al valor registrado hasta esa iteración (menor o mayor según sea un problema de minimización o maximización respectivamente), se almacena el valor de la función objetivo como nuevo referente y el punto creado como óptimo global conocido hasta el momento. Este proceso se repetiría un número predefinido de veces (idealmente hasta el infinito).

Este esquema algorítmico, además de su sencillez, tiene como aspecto positivo su capacidad “de facto” para no quedar mantenido en todo momento el ámbito global de la búsqueda, no pudiendo quedar “atrapado” en óptimos locales. Se recomienda la lectura de [KAR63] para más información sobre sus aspectos positivos.

En contraposición, se trata de un algoritmo ineficiente por definición que, por su funcionamiento, es incapaz de resolver problemas con ciertas garantías sin ejecutarse un número elevado de veces.

No obstante, este algoritmo es interesante en el ámbito teórico. Además es de utilidad como algoritmo de control o referente en el estudio de otros métodos de optimización y como base de variantes y de otros algoritmos de mayor aplicabilidad práctica.

Esquema algorítmico general de un algoritmo de búsqueda aleatoria pura

Expresando el proceso descrito en pseudocódigo, se tiene la estructura que se presenta en el algoritmo 2.1, en el contexto de un problema de maximización.

Función BúsquedaAleatoriaPura(entero: limite): Punto

Punto: optimoEncontrado

real: valorReferente = $-\infty$

entero: contador = 0

Mientras contador < limite **hacer:**

Punto: nuevoCandidato = **GenerarPuntoEnEspacio()**

real: valorCandidato = **funciónObjetivo**(nuevoCandidato)

Si (valorCandidato > valorReferente) **entonces:**

valorReferente = valorCandidato

optimoEncontrado = nuevoCandidato

Fin Si

contador = contador + 1

Fin Mientras

devolver optimoEncontrado

Fin Función

Algoritmo 2.1.- Estructura general de un algoritmo de búsqueda aleatoria pura.

Como se puede apreciar en el algoritmo 2.1, la estructura de una búsqueda aleatoria pura guarda gran similitud con el proceso que se seguiría, por ejemplo, para buscar el máximo en un conjunto de elementos.

Para adaptar el algoritmo 2.1 a un problema de minimización bastaría con cambiar el valor de referencia inicial de $-\infty$ a $+\infty$ y la condición “(valorCandidato > valorReferente)” a “(valorCandidato < valorReferente)” en la comparación para ver si el punto generado es mejor solución.

Elementos de un algoritmo de búsqueda aleatoria pura

La resolución de un problema mediante BAP requiere especificar los siguientes elementos, siendo algunos una herencia directa de la propia definición de un problema de optimización:

Función objetivo: Se trata de la función que se pretende optimizar, parte de la definición del problema tratado y que se emplea directamente como factor discriminante de candidatos a solución.

Función de generación de puntos: Esta función opera con una distribución de probabilidad uniforme en las dimensiones del problema y sirve para generar los puntos candidatos a evaluar dentro del espacio de búsqueda (lo que equivale a “visitarlos”). Dentro de esta función se puede además inyectar cualquier tipo de control de restricciones necesario para el problema.

Límite de iteración: Este valor es simplemente una condición de parada que evita que el algoritmo siga ejecutándose indefinidamente y que puede ser tanto finito (en pruebas reales) como infinito (en condiciones ideales). La probabilidad de convergencia aumenta de forma asintótica hacia 1 conforme se eleva el límite de iteración, siendo 1 en caso de ser infinito dicho límite [RED08]:

Partiendo de φ como una distribución uniforme en el espacio de búsqueda X , $\varphi(A_x(\epsilon))$ representa la probabilidad de alcanzar un punto perteneciente al conjunto $A_x(\epsilon)$ definido en la expresión 2.10. Teniendo en cuenta que la función objetivo f es continua y que $\varphi(A_x(\epsilon)) > 0$, la probabilidad de que tras “n” iteraciones se llegue a un punto del conjunto $A_x(\epsilon)$ es:

$$\Pr(x_i \in A_x(\epsilon) \forall 1 \leq i \leq k) = 1 - \Pr(x_i, \dots, x_k \notin A_x(\epsilon)) = 1 - (1 - \varphi(A_x(\epsilon)))^k$$

Esta probabilidad converge a 1 cuando “n” tiende a infinito y el algoritmo muestra entonces una garantía asintótica.

2.3.5.- Heurística voraz

Fundamentos

La Heurística Voraz, de tipo básico-constructiva según la clasificación seguida, es el ejemplo más directo de aplicación del principio que define a las Heurísticas Constructivas: llegar una solución completa para el problema mediante la selección, en cada etapa, de la solución parcial más prometedora según un cierto criterio de selección y sin replantearse decisiones ya tomadas.

Esta naturaleza, en la que no hay una “conciencia global” del problema, queda reflejada en su propia denominación de “voraz”. Es relevante comentar que, según la bibliografía consultada, este tipo de algoritmos puede conocerse también como “ávidos” o “avariciosos”, dependiendo normalmente de la traducción que se haga de su denominación inglés: “Greedy Algorithms”.

Un ejemplo muy cotidiano que permite captar perfectamente el fundamento de este esquema algorítmico es el siguiente:

- La persona P quiere ir de la universidad donde estudia a su casa y tiene dos formas de hacerlo, en autobús, o con un compañero que puede llevarla en coche. En el momento de decantarse por una u otra opción ve que el autobús está en la parada mientras que su compañero está haciendo unas pocas fotocopias.

La persona P decide entonces tomar el autobús ya que en ese instante le permite dirigirse ya hacia su destino en lugar de esperar unos minutos a su compañero.

Esta decisión se ha tomado en base a un criterio muy simple, “irse cuanto antes”, y por lo tanto, ha sido muy rápida. Sin embargo, no ha tenido en cuenta aspectos como que el autobús tiene tiempos de parada o que viaja a una velocidad inferior al turismo de su compañero. De hecho, muy probablemente verá a lo largo del recorrido cómo su compañero adelanta al autobús.

Los Algoritmos Voraces, en adelante AV, destacan por su velocidad de ejecución (suelen tener un coste de orden de complejidad polinómico) y su sencillez de implementación. En contraposición está su dudosa utilidad en problemas de optimización globales medianamente complejos o incompatibles con una construcción puramente por etapas. Además, su resultado ante cierta instancia de un problema es determinista en contraposición a un método heurístico estocástico.

El enfoque fundamentalmente local de los AV y su agilidad de decisión les hace muy valiosos, no obstante, como optimizadores locales de algoritmos metaheurísticos. Esta idea podría ser, continuando con el ejemplo anterior, la expansión del trayecto de la persona P de un país a otro en lugar de entre dos puntos de la misma ciudad.

En esa situación el algoritmo voraz se aplicaría, por ejemplo, en el ámbito de trayectos urbanos mientras que el algoritmo metaheurístico estaría entonces a un nivel superior, como sugiere su naturaleza, decidiendo por qué ciudades pasar hasta llegar al destino.

El ámbito de aplicabilidad por excelencia de los AV es la Programación Lineal, en la que se busca optimizar funciones lineales de “n” variables (ecuación 2.11) cuyas restricciones se expresan mediante inecuaciones lineales.

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n \quad (2.11)$$

A nivel general, los AV se suelen aplicar a problemas que se pueden tratar como una secuencia de decisiones y que cumplen el Principio de Optimalidad de Bellman. Dicho principio afirma que, si una secuencia de decisiones es óptima, también lo será cualquier

sub-secuencia de la misma. Esto será cierto para un problema cuando su solución óptima se forme de la composición de la solución óptima de todos sus sub-problemas.

De esta forma, los AV en cierto modo tratan de aplicar el enfoque del Principio de Optimalidad de Bellman, en sentido inverso, buscando a construir la solución óptima global del problema mediante la composición de las soluciones óptimas de sus sub-problemas puntuales. Esta interpretación, sin embargo, no está en garantizada por dicho principio, y puede más bien interpretarse como el mencionado “juicio intuitivo” de este tipo de algoritmos.

En cualquier caso, es necesario insistir en que la metodología voraz no es incompatible con la obtención del óptimo global de un problema, simplemente depende de su naturaleza. De hecho, para ciertos problemas se pueden definir AV que encuentran siempre la solución óptima (son “óptimos”) en caso de existir, y es demostrable formalmente. Un ejemplo de algoritmo voraz con esta característica es el Algoritmo de Kruskal para árboles de recubrimiento mínimo de grafos.

Por otro lado, en ciertos problemas, el enfoque voraz puede no hallar la solución a un problema a pesar de que éste sí sea resoluble.

De estas situaciones diametralmente opuestas se puede deducir que, aunque clasificados directamente como “heurísticos” en secciones anteriores, esta naturaleza ha de estudiarse con detenimiento según el problema: Un algoritmo que siga el esquema voraz para resolver un problema sólo será realmente heurístico en caso de no poder demostrarse su optimalidad o, dicho de otra forma, que un algoritmo tenga una estructura voraz no implica intrínsecamente que sea heurístico.

Esquema algorítmico general de un algoritmo voraz

Un algoritmo voraz opera de un modo muy sencillo e intuitivo que se describe, brevemente, de la siguiente forma:

Se parte de un conjunto de soluciones candidatas “C” y se crea una solución “S” inicialmente vacía. A continuación se itera mientras queden candidatos (y no se haya llegado aún a una solución), seleccionando al más prometedor “x”, eliminándolo del conjunto de posibles y guardándolo en la solución en caso de que no viole las restricciones del problema. Finalmente se devolverá la solución encontrada en caso de existir.

Esta estructura genérica de los AV se puede ver muy claramente en el algoritmo 2.2, extraído del capítulo “Algoritmos Voraces”, de [BRA04].

Función voraz(C: conjunto): conjunto

{C es el conjunto de candidatos}

$S \leftarrow \emptyset$ {Construimos la solución inicial en el conjunto S}

Mientras ($C \neq \emptyset$ Y **NO solución**(s)) **hacer:**

$x \leftarrow \text{seleccionar}(C)$

$C \leftarrow C \setminus \{x\}$

Si factible($S \cup \{x\}$) **entonces** $S \leftarrow S \cup \{x\}$

Fin Mientras

Si solución(S) **entonces devolver** S

Si NO entonces devolver “No hay solución”

Fin Si

Fin Función

Algoritmo 2.2.- Estructura general de un algoritmo voraz.

Elementos de un algoritmo voraz

En base a lo expuesto, la definición de la resolución de un problema de optimización siguiendo un esquema voraz se plantea en los siguientes términos, algunos como consecuencia y expansión de la definición formal de este tipo de problemas:

- **Conjunto de candidatos:** Es el conjunto formado por los elementos que pueden conformar la solución. Es equivalente, por lo tanto, al espacio de búsqueda del problema y sus consiguientes soluciones candidatas (sección 2.3.1).
- **Solución (parcial):** Se trata del conjunto formado por aquellos elementos seleccionados del conjunto de candidatos que se han “ascendido” a formar parte de la solución. Este conjunto se considera como “solución parcial” hasta que no ha concluido la ejecución del algoritmo. De hecho, se va construyendo por etapas desde su estado inicial vacío, lo que caracteriza a las Heurísticas Constructivas en general.
- **Función objetivo:** Esta función es igual a la definida en la sección 2.3.1. Se trataría por lo tanto de aquella función cuyo valor se intenta optimizar (maximizar o minimizar). La carga transportada, el beneficio obtenido o el consumo de un cierto recurso son ejemplos de funciones objetivo “realistas”.
- **Función de selección o evaluación:** Se trata de la función que determina qué candidato, de entre todos los posibles, se intenta promocionar al conjunto “solución” en una cierta etapa. Es habitual (aunque no necesario) que esté relacionada directa o indirectamente con la función objetivo. En esta función se plasma el “principio intuitivo” o heurística seguida para el problema. El prototipo por excelencia de

función de selección en un algoritmo voraz consiste en escoger al candidato que, de forma individual, tiene un mejor valor de la función objetivo. Concretamente, y siguiendo el ejemplo de [BRA04], se puede pensar en una situación en la que se intente maximizar el patrimonio. En dicha situación, la función de selección podría llevar a escoger el bien más caro de los que componen el conjunto de candidatos. Por lo tanto, esta función tiene una repercusión directa en el orden en el que se evalúan los candidatos, lo que dependiendo del problema puede ser relevante y garantizar (o anular) la optimalidad del algoritmo y su condición de “heurístico puro” como ya se ha mencionado. Dado un cierto problema, una heurística será mejor que otra en la medida que permita llegar a mejores resultados.

- **Función de factibilidad:** Esta función es la encargada de decidir si la incorporación del mejor candidato seleccionado en una cierta iteración es compatible con la solución y, por lo tanto, se debe añadir (en caso contrario quedará descartado). Puede verse como una explicitación o “materialización”, de las restricciones que se definen en un problema de optimización, recogidas en una función. Piénsese por ejemplo que se está maximizando la carga transportada en un camión. Esta función verá si es posible añadir el objeto seleccionado por la función de selección o si, por el contrario, se excede la carga máxima transportable y debe descartarse en un cierto momento.
- **Función de solución:** En esta función se plasman los requisitos que debe tener una solución al problema planteado para considerarse como tal. Pensando en la resolución del camino a un cierto destino de forma voraz, debería detectar que ya se ha llegado a donde se pretendía y, por lo tanto, no se necesita seguir comprobando. Además, en última instancia será la responsable de decidir si la búsqueda realizada ha encontrado una solución (véase la decisión final del algoritmo 2.2).

Relación de problemas resueltos con algoritmos voraces

Algunos de los problemas más conocidos e icónicos que se han tratado con algún tipo de esquema algorítmico voraz son los siguientes:

- La búsqueda del camino más corto desde un cierto vértice origen al resto de vértices en un grafo ponderado. Este problema se resuelve con el conocido Algoritmo de Dijkstra.
- El Problema del Árbol de Recubrimiento Mínimo. En este problema se busca el grafo conexo, no dirigido y acíclico (denominado “árbol libre”) que interconecta todos los nodos de un grafo conexo, no dirigido y ponderado no negativamente. Este problema se puede abordar con los algoritmos de Prim y Kruskal.
- El Problema del Viajante, en el que se busca la ruta más corta, menos costosa, más rápida... según la variante, para recorrer un conjunto de ciudades sin ir más de una vez a cada una y volviendo finalmente al punto de partida.

- El Problema del Cambio de Monedas, en el que se trata de obtener la forma óptima de devolver una cierta cantidad de dinero con el menor número de monedas posible y teniendo en cuenta aquellas de las que se dispone.
- El Problema de la Planificación de Tareas, en que se organiza un grupo de tareas en base a un cierto criterio (realizar más tareas por cantidad de tiempo, minimizar tiempos de espera... según la variante).
- El Problema de la Mochila (y sus variantes). Este problema, empleado ya indirectamente como ejemplo, se define en torno a maximizar la cantidad de carga transportada en un cierto contenedor.

Se puede encontrar un análisis detallado de estos problemas desde el punto de vista de su resolución mediante AV en el capítulo dedicado a estos algoritmos en [BRA04] (el sexto en la edición consultada).

2.3.6.- Recocido simulado

Fundamentos

El Recocido Simulado (en adelante RS), del inglés “Simulated Annealing” y también conocido como “Enfriamiento Simulado” [RED08], es una metaheurística general basada en trayectorias y de carácter estocástico. Es posible encontrar información detallada de este método especialmente en [CER85] y [KIR83], considerados sus precursores.

Esta técnica es empleada en problemas de optimización con amplios espacios de búsqueda y frecuentemente discretos, pudiendo encontrar soluciones aceptables en un tiempo de ejecución relativamente corto.

Se trata de un algoritmo muy conocido y estudiado que, de hecho, ya ha sido empleado como ejemplo del concepto metaheurística en secciones anteriores sin llegar a nombrarlo directamente. Derivado de un algoritmo previo, el Metrópolis [MET53], se inspira en el proceso físico de la cristalización de los materiales en el ámbito de la metalurgia, durante el temple de los metales. Según este proceso de temple, los metales se calientan y enfrían de forma controlada para mejorar la forma en que cristalizan y minimizar sus defectos.

De forma similar a la BAP, tras cada iteración, el algoritmo trata de reemplazar la mejor solución que ha encontrado hasta el momento por una generada aleatoriamente. Sin embargo, hay una diferencia fundamental, y es que, mientras en la BAP el rango de valores generables abarca siempre todo el espacio de búsqueda, en el RS éstos se encuentran en la vecindad del estado en el que se está, como en una heurística básica de búsqueda local. Además, la probabilidad de aceptación de un nuevo estado de referencia, en caso de que

sea menos recomendable al actual, depende de la temperatura de la etapa, pudiendo seleccionarse también una solución peor valorada a la referencia anterior.

De esta forma, el algoritmo empieza en un estado de temperatura presumiblemente elevado que le permite tener una perspectiva global del espacio de búsqueda, pero se va centrando gradualmente en torno a la región más prometedora que ha encontrado, conforme la baja temperatura dificulta salir de una cierta región alcanzada.

Esquema algorítmico

La estructura del algoritmo RS, se muestra en el algoritmo 2.3.

Función RecocidoSimulado(): Punto

Punto estadoActual = **generarPuntoInicial**()

Mientras (No CondiciónParada()) hacer:

Punto estadoCandidato = **escogerVecinoAleatorio**(estadoActual)

Real VEnergética = **Valor**(estadoCandidato) - **Valor**(estadoActual)

Si (VEnergética >= 0) **hacer:** // Si es un estado mejor se toma

estadoActual = estadoCandidato

Si No:

//Escoger con probabilidad:

estadoActual = **tProbabilidad**(estadoCandidato, $e^{\frac{VEnergética}{KbTemperatura}}$)

Fin Si

Temperatura = **disminuirTemperatura**(Temperatura)

Fin Mientras

devolver estadoActual

Fin RecocidoSimulado

Algoritmo 2.3.- Estructura general de un algoritmo de recocido simulado.

Elementos de un algoritmo de recocido simulado

- **Generación de un punto inicial:** Esta etapa del algoritmo pretende simplemente tomar un punto de partida. Éste se puede generar de forma aleatoria con una distribución uniforme de probabilidad dentro del espacio de búsqueda, con

cualquier otra distribución que asigne mayor probabilidad a una región de interés, o incluso, proporcionarse directamente como un parámetro.

- **Condición de parada:** Esta condición cumple la función tradicional en estos algoritmos de resultados inciertos, determinar cuándo se ha iterado durante el número adecuado de veces. Se han estudiado variados criterios para la detención del algoritmo, siendo uno de ellos cuando el porcentaje de soluciones aceptadas está por debajo de un umbral dado [RED08]. Sin embargo, el más directo y básico que se puede plantear es continuar la ejecución mientras que la temperatura del proceso sea mayor que 0.
- **Selección de un vecino aleatorio:** Esta función se dedica a desarrollar los estados vecinos del estado desde el que se está mediante variaciones leves sobre el mismo. Posteriormente se selecciona al azar uno de los vecinos de la posición actual, generalmente con las mismas probabilidades. Sin embargo, cualquier tipo de muestreo que haga más probable la selección de un estado que mejore el valor de la función objetivo es viable.
- **Función de valoración:** Se trata de una función que asigna un valor a un cierto estado que identifica su calidad como solución. La opción más simple consiste simplemente en emplear directamente la propia función objetivo como función de valoración siempre que sea posible.
- **Escoger según probabilidad:** Según se muestra en el algoritmo 2.3, esta función entra en juego cuando el vecino escogido al azar no supone una mejora de la solución de referencia. Cuando el estado vecino aleatorio mejora (o iguala la referencia), éste se actualiza directamente como en la BAP. Sin embargo, esta función se encarga de tomar un estado vecino, a pesar de que empeore la solución de referencia, con una cierta probabilidad dependiente de la temperatura y el cambio energético (en términos del proceso de cristalización), normalmente:

$$e^{\frac{-\text{VariaciónEnergética}}{K_b \text{Temperatura}}}$$

Esta expresión, en la que “VariaciónEnergética” es igual a la valoración del estado candidato menor la del estado actual y K_b es la constante del Boltzmann, permite que el algoritmo, especialmente a temperaturas elevadas, salga de óptimos locales y pueda moverse por el espacio de búsqueda con relativa libertad. La movilidad a estados que empeoren el valor actual, obviamente, se va “perdiendo” (haciéndose más improbable conforme la temperatura es menor).

- **Disminución de temperatura:** Esta función realiza simplemente un decremento de la temperatura del “metal virtual” tras cada iteración. La reducción de la temperatura se suele hacer de forma lineal, con una función del tipo $T = \text{factor} * T$, siendo T menor que 1.

Este algoritmo logrará mejores resultados conforme más iteraciones se admitan y más suavemente se reduzca la temperatura, ya que se tarda más tiempo en perder la “movilidad global” y se puede llegar a mejores zonas. Sin embargo y como es de suponer, esto incrementa el coste computacional.

En cualquier caso y como se ha mencionado, este algoritmo da resultados aceptablemente buenos a pesar de su ineficiencia teórica (convergencia asintótica al conjunto de soluciones óptimas en ciertas condiciones [AAR89], con muchas iteraciones permitidas y enfriamiento muy lento)

2.3.7.- Algoritmos genéticos

Fundamentos

Los Algoritmos Genéticos [HOL75], en adelante AG, se enmarcan en la vertiente bioinspirada de las metaheurísticas, siendo además clasificables como estocásticos (véase la figura 2.19). Este tipo de algoritmos forman también parte de la denominada familia de “Algoritmos Evolutivos” [RED08], de los que son su representante más conocido y básico.

La familia de Algoritmos Evolutivos, en lo sucesivo FAE, no ha sido definida de forma explícita en subsecciones anteriores. No obstante, se ha hablado brevemente de su funcionamiento como ejemplo de metaheurística.

La idea subyacente de la FAE es común en todos sus miembros y consiste básicamente en la simulación de la Teoría Evolutiva de Charles Darwin mediante el modelado los candidatos a solución del problema como individuos en estado de naturaleza. En este medio se induce la competencia de dichos individuos haciendo que sólo aquellos más aptos, los que suponen una mejor solución para el problema, sobrevivan entre diversas iteraciones y acaben reproduciéndose entre sí para dar lugar a mejores individuos. En este proceso de reproducción se intentan combinar los atributos positivos de los progenitores además de incluirse variaciones o “mutaciones” aleatorias en la descendencia del mismo modo que sucede en la reproducción entre seres vivos que en una perspectiva general tienden a mejorar los individuos.

Es además interesante mencionar que esta metodología, por sus propios fundamentos teóricos, se ajusta directamente a problemas de maximización. No obstante, basta realizar

unos leves ajustes en los elementos del problema para que puedan aplicarse en problemas de minimización.

Para llevar a cabo esta simulación de estado de vida artificial basta con definir tres elementos genéricos:

- Una población definida como un conjunto de individuos de características concretas que **representen** la información de las soluciones candidatas. Esta población se puede definir como el conjunto P de “n” valores del espacio de búsqueda X:

$$P = \{x_1, \dots, x_n / x \in X\} \quad (2.12)$$

- Un esquema de selección de los individuos que “premie” o favorezca la supervivencia de sus características para futuras generaciones. Consiste por lo tanto en definir una forma de escoger a aquellos individuos que se van a reproducir y aquellos aptos para continuar existiendo.
- Un esquema de reproducción de los individuos que permita la combinación constructiva de las características positivas de los individuos (**herencia** de cualidades) así como cierta posibilidad de variación de las mismas que puedan potenciar la mejora de los individuos (**mutación**).

Es también necesario establecer una condición de parada. El más directo consiste simplemente en estipular un número máximo de iteraciones a ejecutar, tras el cual, se devuelve la mejor solución encontrada (del mismo modo que con el proceso de búsqueda aleatoria pura). Un criterio más elaborado sería mantener el proceso hasta que los cambios entre generaciones sean despreciables o, incluso tiendan a empeorar la población.

A nivel general, los algoritmos de la FAE están marcados por un gran componente de aleatoriedad y por un alto grado de aplicabilidad con buenos resultados. Esto se debe a que el marco teórico de base es:

- Fácilmente generalizable: Todas las especies de seres vivos, a pesar de tener características y entornos específicos muy distintos, se rigen por este esquema evolutivo. Por lo tanto no se necesita un conocimiento específico profundo del problema para abordarlo con esta técnica (búsqueda ciega [RED08]).
- Consistente: La mejora y adaptación de los individuos al medio, de una cierta especie entre generaciones, es un hecho contrastado. Se trata de un proceso que, a lo largo del tiempo, ha demostrado de forma práctica su validez.
- Aleatorio: La aleatoriedad, inherente al proceso evolutivo, es uno de sus pilares fundamentales de cara a la adaptabilidad de los individuos al entorno y, por ende, a la mejora de los mismos.
- Múltiple: El operar con poblaciones de múltiples individuos hace que se busque simultáneamente en diversas regiones del espacio de soluciones, lo que debe

acelerar la convergencia. Este paralelismo natura o “paralelismo implícito” ([RED08]) es además una característica que propicia la paralelización de cara a implementaciones de alto rendimiento para problemas muy complejos.

Dentro de la FAE se pueden encontrar cuatro paradigmas básicos que aplican estos principios con ciertas variaciones, partiendo de la representación de los individuos: Los Algoritmos Genéticos, los Programas Evolutivos, las Estrategias Evolutivas y la Programación evolutiva.

Específicamente, los AG se caracterizan por codificar las soluciones candidatas, los individuos, como cadenas o enteros binarios. Esta representación de los individuos, denominada “genotipo” en terminología genética, marca el resto de elementos a definir del esquema algorítmico. Siguiendo con la nomenclatura genética, cada individuo particular se considera un “fenotipo”, una concretización o instancia particular de la estructura general del mencionado genotipo compuesta por un conjunto de atributos o “genes” cuyo valor los define.

El manejo de soluciones candidatas como cadenas binarias requiere que, si una cierta propiedad a representar puede tener más de dos posibles valores, 0 y 1 (“alelos” en el ámbito de la genética), se deban emplear más bits para ese atributo en particular. Todos estos aspectos son consecuencia directa de la representación de las soluciones candidatas como cadenas binarias de longitud “m” común en el marco del problema. La definición del genotipo con el que se va a trabajar requiere no sólo especificar la longitud de las cadenas sobre las que se va a trabajar, sino también tener conciencia de su orden de aparición y tamaño dentro la cadena. Supone entonces especificar la representación de los individuos.

La codificación de un cierto individuo, en contraposición, es simplemente el entero binario que forma su fenotipo particular.

Esquema algorítmico general de un algoritmo genético

La estructura de un algoritmo genético es fundamentalmente igual a la de cualquier otro algoritmo de la FAE como ya se ha mencionado. De hecho, todo lo expuesto anteriormente, a excepción de los aspectos concretos de los AG, supone el marco teórico todos los algoritmos de la FAE. El esquema de un AG es básicamente el que se incluye en el algoritmo 2.4.

Función AGenético(Condición: criterioParada, Parámetro[]): punto

ConjuntoIndividuos: población ← **crearPoblaciónInicial**(param)

evaluarIndividuos(población)

Mientras (NO criterioParada) hacer:

ConjuntoIndividuos: progenitores ← **seleccionarProgenitores**(población)

ConjuntoIndividuos: descendencia \leftarrow **reproducir**(progenitores, param)

evaluarIndividuos(descendencia)

reemplazarIndividuos(población, descendencia)

Fin Mientras

devolver mejorIndividuo(poblacion)

Fin Función

Algoritmo 2.4.- Estructura general de un algoritmo evolutivo (genético).

Elementos de un algoritmo genético

Del mismo modo que el bloque estructural es común en toda la FAE, los componentes y etapas que definen un algoritmo genético son meros desarrollos de las bases teóricas anteriormente introducidas. De esta forma, se van a desarrollar los conceptos comentados y los elementos apreciables en el algoritmo 2.4 en el ámbito de los AG.

- **Generación de una población inicial:** Esta etapa se ejecuta, como es de suponer, una única vez al comienzo del proceso. Sirve como base o punto de partida para el resto de la búsqueda y es también conocida como “fase de inicialización”. El objetivo de este procedimiento es simplemente la generación de un cierto número, “n”, de individuos que pueden “convivir” en el entorno. Este valor “n” de individuos que pueden mantenerse “con vida” es un parámetro fundamental que se debe concretar para llevar a cabo la ejecución de un AG.

Una buena función de inicialización ha de generar un conjunto variado de individuos, siguiendo por ejemplo una distribución de probabilidad uniforme en el espacio de búsqueda. De esta forma se garantiza abarcar de entrada una zona mayor de búsqueda y mantener el ámbito global del proceso. Además, del mismo modo que ocurre en la evolución real de las especies, la poca variabilidad genética en el proceso evolutivo del algoritmo es perjudicial para el proceso. Esto se debe a que dificulta considerablemente su convergencia en la mayoría de los casos, puesto que la probabilidad de que los hipotéticos individuos similares sean todos de la vecindad del óptimo global es ínfima en problemas reales.

Esta etapa del algoritmo, no obstante, es prescindible en ciertos casos en los que se considere adecuado proporcionar directamente un conjunto inicial de individuos como punto de partida.

- **Evaluación de individuos:** La evaluación de los individuos tiene como objetivo valorar la bondad de las soluciones candidatas que se barajan en la población para guiar la búsqueda (procesos de selección de progenitores y reemplazo de individuos). Esta evaluación de las soluciones candidatas se hace mediante una función de aptitud,

que se obtiene directamente a partir de la función objetivo del problema. En el esquema algorítmico 2.3 esta tarea se lleva a cabo en la función “evaluarIndividuos”.

- **Criterio de parada:** Este criterio es simplemente el que determina que la búsqueda puede detenerse y se puede entonces devolver el mejor resultado encontrado. La necesidad de este criterio de parada ya se ha anticipado en la presentación de la FAE, habiéndose propuesto también las dos opciones principales: fijar un número de iteraciones máximo o estipular la detención cuando las variaciones entre generaciones sean mínimas. Esta necesidad surge por el simple hecho de que el resultado generalmente no se conoce a priori y, por lo tanto, generalmente hay que inducir la finalización de la búsqueda.
- **Selección de progenitores:** La fase de selección de progenitores está destinada a determinar qué individuos consiguen reproducirse y propagar sus características a las futuras generaciones, influyéndose así en la búsqueda a medio y largo plazo. Esta selección de progenitores se realiza en la función “seleccionarProgenitores” del algoritmo 2.4 y se implementa mediante los denominados “operadores de selección”, de los que se hablará posteriormente en esta misma subsección. No obstante, puede anticiparse que por norma general se debe tener algún tipo de priorización de aquellos individuos más aptos por su valía de como solución, aunque manteniéndose un mínimo de probabilidad para todos, como ocurre en la naturaleza.
- **Reproducción:** Esta etapa consiste en la combinación de las características genéticas de los progenitores, simulando la reproducción sexual entre seres vivos, para dar lugar a nuevos y mejores individuos (en un número determinado como parámetro que se puede considerar como un “nivel de fertilidad” del proceso). Los nuevos individuos heredan las buenas propiedades genéticas de sus progenitores y además se les inducen características propias. Esta función, que se muestra como “reproducir” en el algoritmo 2.4, es la que hace que el algoritmo tienda a la convergencia de forma dinámica y, por lo tanto, es de gran importancia. El esquema de reproducción se implementa mediante dos tipos de operadores, los de cruce o reproducción, que abordan la faceta hereditaria combinatoria, y los de mutación, que modifican al azar partes del fenotipo del nuevo individuo en su creación para poder llegar a zonas del espacio de búsqueda que no serían directamente alcanzables con el simple cruce de los progenitores. De estos operadores se hablará también a continuación. Es importante finalmente insistir en que el papel de la mutación forma también parte del proceso natural simulado, teniendo a grandes rasgos el mismo papel que en este tipo de algoritmos: en la naturaleza la descendencia tiene propiedades propias no heredadas que varían su adaptabilidad al entorno tendiendo a mejorarla en general.

- **Reemplazo:** Del mismo modo que se seleccionan aquellos individuos más aptos como progenitores deseables para dirigir la búsqueda en el sentido adecuado a medio y largo plazo, tras cada generación se necesita suprimir directamente aquellos individuos menos aptos para que tengan cabida en el entorno los nuevos individuos generados tras el proceso de reproducción. Esta necesidad puntual de descarte y reemplazo se verá directa incrementada conforme se aumente el nivel de fertilidad del proceso de reproducción. El proceso de reemplazo ha de verse como complementario al proceso de selección de progenitores de forma que en este tipo de algoritmos se hace realmente una selección general aplicada en dos fases: a corto plazo mediante el reemplazo y a medio y largo plazo mediante la selección de los progenitores deseables (véase la figura 2.21). Esta tarea se puede enfocar, de nuevo, mediante distintos operadores.



Figura 2.21.- Selección en dos ámbitos de los algoritmos de las FAE.

Se va a hablar finalmente de los operadores más comunes que se pueden aplicar a las tareas de selección de progenitores, reemplazo, reproducción y mutación:

Operadores de selección de progenitores

Con el objetivo de seleccionar a aquellos individuos que consiguen reproducirse y definir el conjunto “progenitores” del algoritmo 2.4 se pueden seguir principalmente las siguientes ramas [RED08]:

1.- **Muestreo directo:** El criterio seguido se rige por una norma concreta, como por ejemplo, escoger los “k” mejores según el valor de su función aptitud.

2.- **Muestreo aleatorio equiprobable:** Todos los individuos tienen la misma probabilidad de reproducirse sin importar su aptitud. Se forma entonces el conjunto de progenitores mediante ensayos simples de Bernuolli.

3.- **Muestreos estocásticos:** La selección de k individuos se lleva a cabo teniendo en cuenta tanto probabilidades calculadas como factores aleatorios. Las probabilidades que tienen los

individuos de ser seleccionados como progenitores se calculan según su valor de aptitud o el valor que la función objetivo alcanza en ellos. Como opción más básica, basta asumir que la puntuación p_i de un cierto individuo x_i de la población de P (expresión 2.12) se calcula como su aptitud (u_i) relativa:

$$p_i = \frac{u_i}{u_1 + \dots + u_n} \quad (\forall i \in [1, n]) \quad (2.13)$$

De esta forma, se cumple que $p_1 + \dots + p_n = 1$, como es de esperar en una distribución de probabilidad.

Partiendo de las proporciones de cada individuo obtenidas, por ejemplo, con la expresión 2.13. Se pueden plantear varias opciones de selección que operen sobre las mismas incluyendo cierto grado de aleatoriedad: Por sorteo, por restos, por ruleta y por torneos.

Por sorteo: Las mencionadas puntuaciones “ p ” se emplean directamente como probabilidades de ser escogidos. La selección se hace mediante “ k ” ensayos de una variable aleatoria con esta distribución de probabilidades. Como se menciona en [RED08], dado que normalmente sólo se dispone de un único generador de números aleatorios simples (por ejemplo, uniformemente distribuidos entre 0 y 1), para simular un ensayo en la distribución $\{p_1, \dots, p_n\}$ se llevan a cabo los siguientes pasos:

1º.- Se calculan las probabilidades acumuladas en base a la siguiente expresión:

$$q_0 = 0$$

$$q_i = p_1 + \dots + p_i \quad (\forall i \in [1, \dots, n])$$

2º.- Se genera un número aleatorio simple r empleando el generador aleatorio en el rango $[0, 1)$

3º.- Se elige el individuo x_i que cumpla que $q_{i-1} < r < q_i$

Para seleccionar por sorteo “ k ” individuos, los pasos 2º y 3º han de transformarse respectivamente en los siguientes 2º' y 3º':

2º'.- Se generan k números aleatorios simples de forma que $r_j = \text{Aleatorio}[0, 1) \forall j \in [1, k]$

3º'.- Para cada $j = 1, \dots, k$ se elige el individuo x_i que cumpla que $q_{i-1} < r_j < q_i$

Siguiendo este procedimiento es destacable que algunos individuos pueden ser escogidos varias veces mientras que otros no llegarán a serlo. Este es el criterio de selección predeterminado que se sigue comúnmente en los AG y tiene un buen respaldo teórico.

Por restos: A cada individuo x_i se le asignan directamente $[p_i k]$ puntos de la muestra. A continuación, los individuos se reparten los puestos disponibles según sus puntuaciones, lo que se suele hacer por sorteo como en el esquema previo.

Por ruleta: Este método, también denominado “universal”, es muy utilizado. Guarda una importante similitud al muestreo por sorteo. Cada individuo tiene asociada una probabilidad de selección igual a su puntuación asociada (expresión 2.13). Esta puntuación implica la porción de espacio que reciben de una hipotética ruleta. Seguidamente se ordenan los individuos en orden decreciente del valor su función de aptitud. De esta forma, los individuos más aptos, con porciones más significativas de la ruleta, se sitúan al principio de la misma (véase la figura 2.22). A continuación, para seleccionar un cierto individuo se genera un número aleatorio “ r ” en el intervalo $[0, 1]$ y se comprueba en qué sección de la ruleta se ubica. El individuo seleccionado es entonces el responsable de la sección correspondiente, lo que se puede calcular recorriendo los individuos ordenados de mayor a menor aptitud y acumulando sus respectivas puntuaciones hasta que el valor exceda el número aleatorio “ r ”.



Figura 2.22.- Asignación ordenada de espacio por puntuación en una “ruleta” de selección.

Por torneo: La selección se hace en este caso mediante comparación directa entre individuos. En esa vertiente se pueden distinguir dos enfoques, uno determinístico y otro probabilístico. En el enfoque determinístico se escogen al azar un número “ z ” de elementos de la población y de este subconjunto de tamaño “ z ” se toma el individuo con mejor valor de la función de aptitud. Este proceso se repite hasta alcanzar los “ k ” elementos buscados.

En el enfoque probabilístico se escoge de nuevo al azar un número “ z ” de individuos y seguidamente se genera un número aleatorio “ r ” en el intervalo $[0, 1]$. Si “ r ” es mayor a un parámetro constante dado “ l ” se selecciona el individuo con mejor valor de la función de aptitud mientras que, en caso contrario se selecciona aquel con peor valor. El parámetro “ l ” suele tener un valor en el rango $[0.5, 1]$.

Operadores de reproducción

Los operadores de reproducción simulan la reproducción sexual entre individuos, que se basa en la siguiente idea: Partiendo de unos progenitores escogidos, su descendencia tiene

la posibilidad de heredar sus mejores propiedades y, por lo tanto, mejorarlos. Esta operación debe verse como una búsqueda en profundidad en el entorno del fenotipo de los progenitores. Se trata de un proceso ineludible en todo AG.

En una cierta etapa, la aplicación de los operadores de reproducción genera una descendencia total de “s” nuevos individuos. Este proceso es comúnmente realizado mediante ensayos de Bernoulli, admitiéndose a veces la variedad excluyente. No hay necesidad real de proporcionar por adelantado un valor fijo de “s”, sino que basta con dar un valor esperado y derivado de las posibilidades de aplicación de los operadores. A mayor valor de s, más variará la población entre generaciones.

Los operadores de reproducción, dada la representación de los individuos como cadenas binarias, realizan un intercambio de segmentos de los progenitores siguiendo un cierto esquema para dar lugar a los nuevos individuos. Los esquemas de reproducción más comunes son [GES11]: Cruce de un punto, Cruce de dos puntos, Cruce uniforme.

Cruce de un punto (SPX, “single point crossover”): Tras seleccionar los individuos progenitores, se escoge, de forma aleatoria, un punto de cruce. Este punto se emplea para generar dos fragmentos diferenciados en cada uno de ellos: la cabeza y la cola. Los descendientes se generan intercambiando la cola de los dos progenitores y recibiendo, por lo tanto, características de cada uno (véase la figura 2.23 a).

Cruce de dos puntos (DPX, “double point crossover”): Se trata de una generalización del SPX en la que, una vez seleccionados dos progenitores, se escogen aleatoriamente dos puntos de cruce. Estos puntos no pueden coincidir con la cadena, para garantizar así que se dividen en tres fragmentos, dos laterales y uno central. La generación de los descendientes se realiza intercambiando el fragmento central de los padres (véase la figura 2.23 b).

Cruce uniforme (UPX, “uniform point crossover”): En este caso, cada uno de los genes del descendiente tiene la misma probabilidad de proceder de un padre que de otro. Para llevarlo a cabo, se construye una máscara de cruce binaria y se procede de la siguiente forma: Si en la posición “i” de la máscara hay un 0, entonces el descendiente toma el gen de la posición “i” del primer progenitor. Por el contrario, si hay un 1, el gen de esa posición del descendiente se toma del segundo progenitor. Además, el significado del 0 y el 1 se invierten para la generación de un siguiente individuo. El número de puntos de cruce es fijo (1’s ó 0’s de la máscara) durante toda la ejecución y se establece normalmente en $L/2$, siendo L la longitud de la cadena (véase la figura 2.23 c).

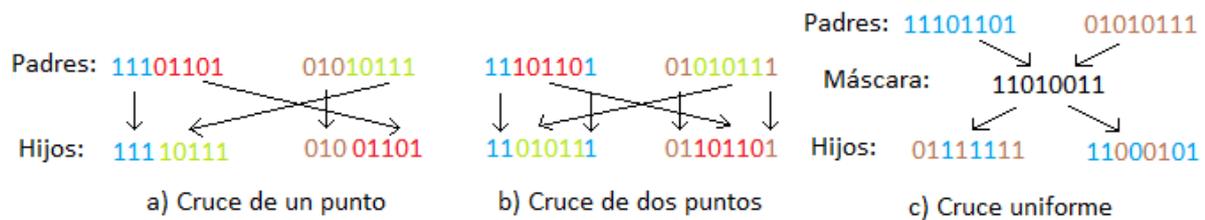


Figura 2.23.- Esquemas de Reproducción.

Operador de mutación

Este operador complementa al esquema de reproducción, siendo también un componente fundamental de todo algoritmo genético. Su función es hacer que alguno de los genes de un nuevo individuo, generado tras la aplicación de un operador de reproducción, varíe aleatoriamente. Su aplicación va, por lo tanto, asociada a la reproducción, como siguiente operación a realizar.

Como se ha mencionado anteriormente, la faceta mutativa del proceso logra que los descendientes tengan posibilidad de portar carga genética propia y no procedente de los progenitores al igual que ocurre en la naturaleza. Esto ha de verse como un complemento del proceso reproductivo: Si la reproducción buscaba realizar una búsqueda en profundidad en la región definida por el material genético de los progenitores, la mutación permite llegar a regiones del espacio de búsqueda que, en caso contrario no se explorarían, es decir, como una búsqueda en anchura.

De esta forma, el proceso de mutación hace que ningún punto del espacio de búsqueda tenga una probabilidad 0 de ser explorado en un cierto instante.

El criterio de mutación más general requiere simplemente asignar una probabilidad de mutación por gen " p_{mg} " (normalmente muy baja, del orden del 1%). Basta entonces con recorrer cada gen de los nuevos individuos generados invirtiendo el bit "i" de un cierto individuo si al generar un valor aleatorio coincide con una referencia de probabilidad " p_{mg} " de aparición (véase la figura 2.24). Otra opción también válida sería tratar la probabilidad de mutación por individuo. En este caso, si a un individuo le tocara ser mutado, se escogería al azar un determinado número de bits y se invertirían.

Operadores de reemplazo

El entorno simulado tiene capacidad para un número limitado "n" de individuos y, dado que tras aplicar el proceso de reproducción ya hay nuevos candidatos para poblar el entorno, se necesitan eliminar individuos. El objetivo del proceso es, intuitivamente, que los individuos de la población sean cada vez mejores. Sin embargo, se pueden plantear distintos esquemas de reemplazo [RED08]: Inmediato, con factor de llenado, por inserción y por inclusión.

Inmediato: Los descendientes generados sustituyen directamente a sus progenitores

Con factor de llenado: Tras evaluar la aptitud de los descendientes, se selecciona un grupo de individuos de la población con una valoración similar y se reemplazan aleatoriamente individuos de este conjunto hasta que la población alcance de nuevo su número “n”.

Por inserción: Según el tamaño relativo de la descendencia, “s”, respecto al de la población, “n”, se dan dos casos:

Si $s \leq n$ se muestrean para eliminarse “s” miembros del conjunto de progenitores según un cierto criterio (generalmente aquellos con peor valor de aptitud).

Si $s > n$ se seleccionan “n” miembros del conjunto de descendientes y se forma con ellos una nueva población. De esta forma cualquier individuo puede vivir como máximo una única generación.

Por inclusión: Se combinan los “s” descendientes con sus progenitores y en este conjunto se seleccionan “n” miembros según un cierto criterio (generalmente los más aptos).

Es importante tener en cuenta que los dos primeros esquemas de reemplazo sólo son aplicables cuando el número de descendientes generado es menor al tamaño de la población.

Descendiente: 10011011 -> 11011011 : Descendiente mutado

Figura 2.24.- Mutación de un descendiente

2.3.8.- Algoritmos genéticos niching

Fundamentos

Los Algoritmos Genéticos del tipo Niching (en adelante AGN), son una variación de los AG básicos de lo que se ha hablado en la subsección 2.1.5, como se puede deducir de la primera parte de su nombre. Por lo tanto, son también algoritmos heurísticos catalogables como estocásticos.

En los AG básicos, al igual que en todos los algoritmos descritos anteriormente, la búsqueda avanza uniformemente hacia la localización del que se espera sea el óptimo global. Se tiene, de hecho, la intencionalidad de “escapar” de los posibles óptimos locales para tratar de llegar, en última instancia, a una solución que consideren global. Este principio de funcionamiento se conoce como Optimización Unimodal, y supone la aproximación más básica de resolución de problemas de este tipo tal y como se han definido, “conformarse” con un único punto del conjunto de óptimos globales X^* (véase la expresión 2.6).

Sin embargo, en ciertas ocasiones, no sólo es de interés encontrar un punto en el que la función objetivo alcance un óptimo global, sino que interesan todos aquellos puntos en los que exista algún tipo de óptimo, ya sea local o global. Este principio de funcionamiento se denomina, en contraposición al anterior, Optimización Multimodal, y es muy utilizado, por ejemplo, en problemas de optimización de objetivo múltiple o “Multiobjetivo” (aquellos en los que la función objetivo se puede dividir en un conjunto de sub-funciones distintas que optimizar).

Los algoritmos genéticos de tipo niching, a diferencia de los básicos, están orientados a la optimización multimodal. Pretenden, por lo tanto, llevar a cabo un proceso evolutivo un tanto menos “despiadado” a nivel general en el que tengan cabida múltiples puntos de interés en distintas zonas del espacio de búsqueda. Se pretende, de esta forma, encontrar y registrar todos los “nichos ecológicos”, en los términos biológicos de los que se deriva su denominación, del espacio de búsqueda en el que haya algún tipo de óptimo.

Consiguientemente, la situación de una población evolucionada de un AG básico sería muy diferente a la que se espera lograr con la variante “niching”: Todos los individuos del AG habrían avanzado, en conjunto, en la dirección del óptimo global mediante la promoción de la genética de aquellos más aptos, efecto conocido como “deriva genética” [RED08]. Sin embargo, un AGN debería tener consciencia de múltiples regiones de interés distintas, habiendo atenuado el efecto de deriva genética de la población. Esta situación se ilustra de forma muy visual en la figura 2.25.

La atenuación de la deriva genética general de los AG básicos se puede lograr aplicando la selección y promoción de características genéticas de forma localizada. Para tal fin, el proceso no ha de basarse en el proceso evolutivo genérico de una especie global, sino en ecosistemas habitados por distintas especies sobre ciertas regiones del espacio de búsqueda. Los individuos de estas especies localizadas o “subespecies” mantienen características comunes entre sí y la capacidad de reproducirse entre ellos. De esta forma, la deriva genética se reduce a cada región o “nicho”, que son subespacios dentro del espacio de búsqueda general. Estos espacios se definen generalmente aplicando criterios de distancia y rangos de atracción o “radios” que permitan distinguir entre individuos como similares y distintos.

Es frecuente además que, en cada nicho, los recursos sean finitos y deban ser compartidos por todos los miembros de la población que lo habita en base a algún criterio y pudiendo actuar como un factor de presión selectiva. Es posible, así, controlar los recursos que se invierten en la búsqueda sobre cada zona.

Hasta ahora se ha hablado de los objetivos perseguidos por un AGN a nivel genérico. Sin embargo, existen diversos enfoques para realizar el “niching” sobre los que se puede basar un AGN particular.

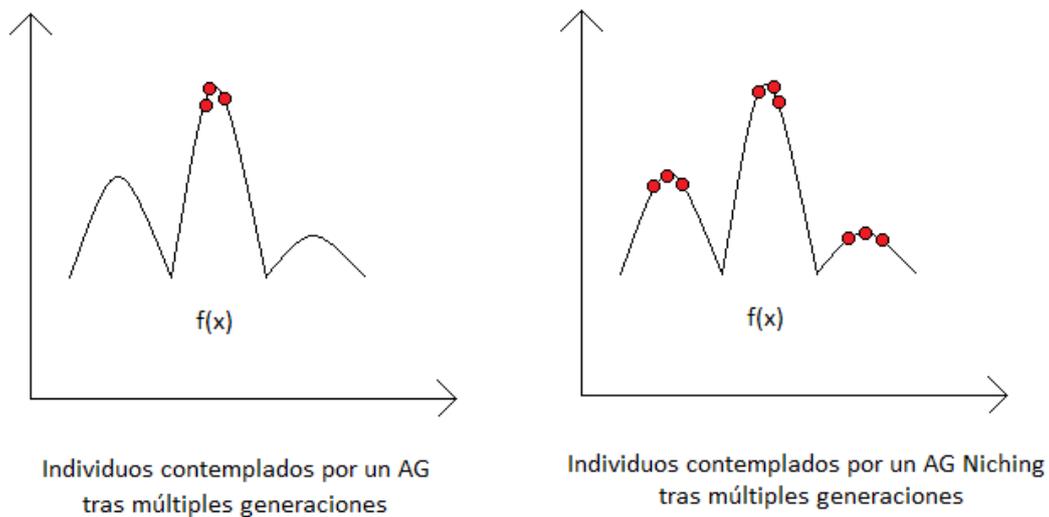


Figura 2.25.- Comparativa visual entre la pretensión general de un AG y un AG Niching.

Algunos ejemplos de técnicas niching fundamentales, son los métodos bajo la clasificación de “Crowding” y de “Clearing”, además del método conocido como “Fitness Sharing” [HOL75] [GOL87].

La idea fundamental que se sigue en el esquema de “Fitness Sharing” es la disminución de la valoración o aptitud de los individuos en torno a zonas del espacio de búsqueda densamente pobladas, es decir, con múltiples individuos similares entre sí según un radio de aceptación. Esta “devaluación” en torno a las regiones muy exploradas potencia la búsqueda sobre nuevas regiones.

La idea subyacente en los métodos “Crowding” es la inserción de nuevos individuos en sustitución de elementos similares lo que, de nuevo, actúa en detrimento de la “falta de variabilidad genética” para favorecer la exploración y mantenimiento de múltiples regiones de interés representadas.

El principio que rige la técnica “Clearing” es el trabajo con entornos de recursos limitados que se asignan a los mejores individuos de cada región manteniendo una cierta representación de la zona y devaluando a aquellos menos aptos, en lugar de compartirlos en toda la zona como el método de “Fitness Sharing”.

De estas tres vertientes se da una buena perspectiva general en [RED08] y, de forma significativamente más concisa, en [SAR98], incluyendo en ambos casos otras referencias de interés sobre este tema.

2.3.9.- Algoritmos meméticos

Fundamentos

El término “Algoritmo Memético”, en adelante AM, fue acuñado originalmente en [MOS89] al analizar aspectos innovadores comunes en algoritmos genéticos propuestos en otros artículos. Esta denominación hace referencia a un conjunto amplio de metaheurísticas basadas en poblaciones de agentes competitivos. Estos agentes mejoran las soluciones individualmente interactuando entre sí ocasionalmente.

Se trata de una metodología metaheurística catalogable como estocástica que comparte ciertos aspectos de la FAE. Sin embargo, los AM no se quedan en el marco teórico general de esta familia, sino que intentan explotar todo el conocimiento del problema del que disponen para acelerar el proceso. Aplican por lo tanto heurísticas concretas, técnicas de búsqueda local... lo que se conoce como “proceso de hibridación” [RED08].

Un algoritmo memético puede considerarse entonces como una combinación entre búsqueda global basada en poblaciones y heurísticas de búsqueda local realizadas por cada agente. Esta asociación no es opcional, sino que un AM requiere la incorporación de conocimiento específico (“hibridación”). Por este motivo, los AM son en ocasiones denominados “Algoritmos Evolutivos Híbridos” y “Buscadores Locales Genéticos”. Es además interesante destacar la denominación preferente de “agente” a los elementos que componen la población, en lugar de la propia de la FAE como “individuos”. Se pretende así resaltar la naturaleza activa de los elementos de la población en la búsqueda local que realizan, a diferencia de la naturaleza pasiva de los individuos de un AG, cuya actividad es simplemente la de estar sometidos al proceso evolutivo general [COT07].

La idea de base que inspira a los AM es la aplicación del concepto de “meme” en la búsqueda con poblaciones. El concepto de “meme”, acuñado por R. Dawkins en 1976, puede definirse como una unidad de transmisión cultural o imitación. Un meme sería una entidad equivalente a un gen cuya información persiste entre generaciones por su aptitud, sólo que en el ámbito de la evolución cultural propagándose por imitación. Esta especie de “gen cultural” se caracteriza especialmente por su longevidad y por su imitabilidad entre individuos. Ejemplos reales de este concepto serían canciones famosas, proverbios, modas o metodologías.

Esquema algorítmico general de un algoritmo memético

La estructura de un algoritmo memético se muestra en el algoritmo 2.4. Ésta estructura puede verse de un modo bastante más esquemático y gráfico en la figura 2.26.

Función AlgoritmoMemético(): Punto

conjuntoAgentes población: **inicializarPoblación()**

Mientras (NO CondiciónParada) **hacer**:

conjuntoIndividuos: m = **seleccionarAgentes**(población)

conjuntoIndividuos: m' = **reproducirAgentes**(m)

mejorarAgentesConBusquedaLocal(m')

población = **combinarYReemplazar**(población, m')

Si **convergencia**(población) **hacer**:

población = **refrescarPoblación**(población)

Fin Si

Fin Mientras

devolver mejorSolución

Fin Función

Algoritmo 2.5.- Estructura general de un algoritmo memético.

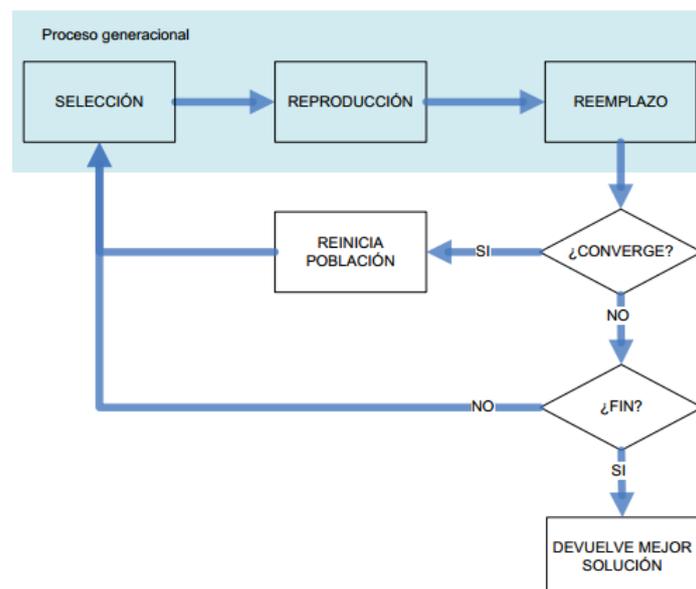


Figura 2.26.- Diagrama de flujo de un algoritmo memético [PLA12].

Elementos de un algoritmo memético

Siguiendo la base estructural presentada en el algoritmo 2.5, en un algoritmo memético se pueden encontrar los siguientes elementos:

- **Inicializar población:** Un algoritmo memético, al igual que los algoritmos de la FAE, comienza con la inicialización de una población de partida. Sin embargo, este proceso es más complejo en los AM, aplicándose normalmente una cierta heurística relacionada con el problema.
- **Seleccionar agentes:** La selección de individuos o, agentes, de forma más precisa en este contexto, escoge un subconjunto sobre los elementos de la población para su posterior reproducción. Este proceso se puede llevar a cabo, por ejemplo, siguiendo los mismos esquemas que se han mencionado para los algoritmos genéticos (por torneo, por ruleta...). El proceso de selección también induce sobre la población de agentes una presión competitiva a largo plazo.
- **Reproducir agentes:** Este proceso, que refleja la cooperación entre agentes, permite crear nuevos agentes a partir de los existentes mediante la aplicación de una serie de operadores a tal efecto. Comúnmente se aplica un operador de recombinación, uno de mutación y uno para mejora local, teniéndose consciencia además del problema que se está resolviendo.
- **Mejora de agentes con búsqueda local:** En este procedimiento, fundamental para un algoritmo memético, se realiza una mejora local de los agentes en su entorno. Esta “mejora local”, siguiendo la analogía del ámbito cultural, equivale a un proceso de aprendizaje del agente. Se caracteriza especialmente por emplear información específica del problema como factor potenciador, una diferencia fundamental con algoritmos evolutivos generales como los AG.
- **Reemplazo de agentes:** El proceso de reemplazo es equivalente al que se lleva a cabo en la FAE, pudiendo realizarse, de nuevo, con alguno de los esquemas descritos para los AG. La eliminación de unos agentes en favor de otros induce, de nuevo, presión competitiva a corto plazo.
- **Comprobación de convergencia y Reactivación:** Esta función determina si los agentes de la población han alcanzado un estado similar que dificulta la búsqueda. La inclusión de conocimiento acelera la convergencia de la población. Por lo tanto, el proceso de reactivación es muy importante en estos algoritmos. Además, en caso de que una población converja, es mejor refrescarla en lugar de mantenerla restringida a una pequeña región del dominio de búsqueda. Hay numerosas formas de llevar a cabo el proceso de reactivación, pudiendo operarse, por ejemplo, de esta forma: una

pequeña fracción p de la población se mantiene (este valor no debe ser muy alto para que la población no vuelva a converger), y el resto de individuos se crean desde cero, como en el proceso de inicialización [RED08].

Nótese además que se cuenta con una **función de aptitud** o idoneidad que, como en los algoritmos genéticos permite valorar a los distintos agentes de la población.

Se recomienda especialmente, para más información al respecto, la lectura de [COT07], donde se da una visión general pero precisa de los principios subyacentes en los AM, sus componentes y aplicaciones.

2.4.- Perspectiva general de la Computación Paralela

2.4.1.- Introducción

A pesar de que se desarrollaron avances en los sistemas monoprocesador hasta el año 2002 aproximadamente, en los 90, los multiprocesadores empezaron a adquirir importancia. Se buscaba conseguir más rendimiento para supercomputadores, servidores, nuevos programas de procesamiento intensivo..., pero la explotación del paralelismo entre instrucciones no era suficiente porque no permitía acelerar más los procesos. Además, la sobrepotenciación daba lugar a serios problemas de refrigeración a las arquitecturas monoprocesador.

Una vez se hubo madurado el concepto, se mejoró la comprensión de las aplicaciones de los multiprocesadores y se redujeron los costes de diseño, ya que a grandes rasgos había simplemente que replicar buenos diseños previos a distintos niveles de abstracción.

El desarrollo de arquitecturas paralelas tiene, fundamentalmente, dos vertientes en relación a las entidades de proceso: la agrupación de múltiples núcleos reunidos y el empleo de procesadores autónomos combinados. La agrupación de múltiples núcleos sobre agrupados como un único procesador se conoce generalmente como “multinúcleo” o “multicore”. La utilización de procesadores “completos” aplicados en conjunto recibe normalmente el nombre de “multiprocesadores”. En ambos casos, y como se ha anticipado, se explota la replicación de elementos a nivel de procesador o de las unidades internas del mismo según el enfoque [HEN06].

2.4.2.- Clasificación de las arquitecturas paralelas

A lo largo del desarrollo de la computación paralela se han definido distintas clasificaciones de las arquitecturas diseñadas que han servido como marco teórico de estudio y aplicación. La clasificación más básica y, probablemente la más conocida, es la de Flynn. Esta clasificación es simple y antigua (tiene varias décadas) pero aún es útil para tener una visión global de las arquitecturas paralelas. Se basa en el paralelismo en flujos de datos e instrucciones y da lugar a estas cuatro categorías [HEN06] [RED08]:

1. **Flujo único de instrucción, flujo único de datos (SISD)**: No explota paralelismo ni en datos ni en instrucciones. Aquí se encuadra el uniprosesor tradicional.
2. **Flujo único de Instrucción, múltiples flujos de datos (SIMD)**: Una misma instrucción es ejecutada en múltiples procesadores con diferentes flujos de datos. Explotan el paralelismo a nivel de datos: cada procesador tiene su memoria de datos mientras que la de instrucciones es común. Su eficiencia es directamente proporcional al paralelismo de datos, siendo las arquitecturas vectoriales las más extendidas de este tipo. Los SIMD triunfan a nivel gráfico, concretamente en las unidades de procesamiento gráfico o "GPU's".
3. **Flujos múltiples de instrucciones, único flujo de datos (MISD)**: Para que múltiples flujos de instrucciones sean eficaces normalmente se necesitan múltiples flujos de datos por lo que es muy poco común. A veces se usa para paralelismo redundante donde haga falta mantener el sistema ante un fallo. No hay procesadores comerciales de este tipo.
4. **Múltiples flujos de instrucciones, múltiples flujos de datos (MIMD)**: Cada procesador busca sus instrucciones y opera sobre sus datos propios. Se explota el paralelismo a nivel de hilo, que es más aplicable que el a nivel de datos. Es la arquitectura de los multiprocesadores de propósito general

2.4.3.- Arquitecturas paralelas MIMD

Las arquitecturas MIMD están muy extendidas porque, en condiciones adecuadas, hardware y software pueden proporcionar alto rendimiento a una aplicación particular (dividiéndola en hilos), ejecutar múltiples tareas distintas a la vez, o una mezcla de ambos casos. Es importante destacar que aunque originalmente los hilos eran unidades de ejecución relacionadas para un mismo fin, en la actualidad reciben este nombre incluso unidades de

ejecución con espacios de direcciones y tareas independientes. Además, se basan ampliamente en la replicación, lo que les permite tener una gran relación coste-rendimiento.

Las arquitecturas MIMD existentes se pueden agrupar en dos clases, según su número de procesadores y la organización de la memoria. Este segundo criterio, significativamente más estable en el tiempo, permite distinguir entre arquitecturas de memoria compartida y de memoria distribuida. De estos dos tipos de arquitecturas se habla a continuación:

De memoria compartida: Hay una única memoria principal con relación simétrica a todos los procesadores. El tiempo de acceso a ella es uniforme desde cualquiera de ellos. De ahí la denominación de “de Memoria Compartida” (“SMP”, del inglés “Shared Memory Processor”) o “de Acceso Uniforme” (“UMA”, del inglés “Uniform Memory Access”). Se trata del diseño más popular, extendido dentro de los MIMD e implementado de cara al gran público. Se trata de una arquitectura sencilla de diseñar aunque el número de unidades de proceso agrupables de forma satisfactoria es inferior al enfoque de memoria distribuida. En la figura 2.27 se incluye un esquema estructural de este tipo de sistemas.

De memoria distribuida: La memoria está físicamente distribuida en contraposición al tipo anterior, como se deduce de su nombre. Se utilizan distintas estructuras de conexión de los procesadores dando lugar a una red de interconexión. Esta distribución de la memoria hace rentable ampliar el ancho de banda y reduce la latencia si los datos se encuentran en la caché del nodo. El aspecto negativo es la comunicación entre procesadores, que es más compleja y requiere una gestión muy bien estudiada. En la figura 2.28 se incluye un esquema estructural de este tipo de arquitectura.

En este tipo de arquitectura la memoria se puede a su vez considerar de dos formas distintas, como un espacio de direcciones común o como un espacio de direcciones separado.

Mediante la compartición del espacio de direcciones se forma un único bloque lógico de memoria al que cualquier procesador puede acceder. Reciben el nombre de “procesadores de memoria compartida distribuida” (DSM). También se llaman “NUMA’s” (de acceso no uniforme a memoria), en contraposición a las arquitecturas MIMD de memoria compartida, dado que el tiempo de acceso depende de la localización de la palabra buscada.

Construyendo un espacio de direcciones separado hay múltiples espacios de direcciones privados lógicamente separados e inaccesibles de forma remota. Cada bloque de memoria con procesador es como un computador separado. En este caso, una misma dirección física puede ser varias localizaciones según el procesador. Este diseño es recurrente en los clusters.

La comunicación de los multiprocesadores con múltiples espacios de direcciones requiere del paso de mensajes entre las unidades de cómputo, mientras que en el otro caso, se puede usar simplemente las herramientas propias de la memoria compartida.

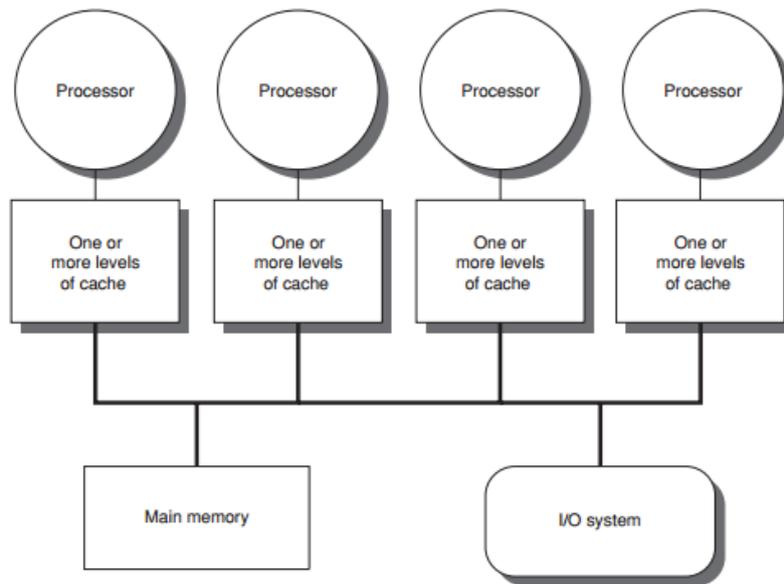


Figura 2.27.- Estructura básica de un sistema MIMD de memoria compartida [HEN06].

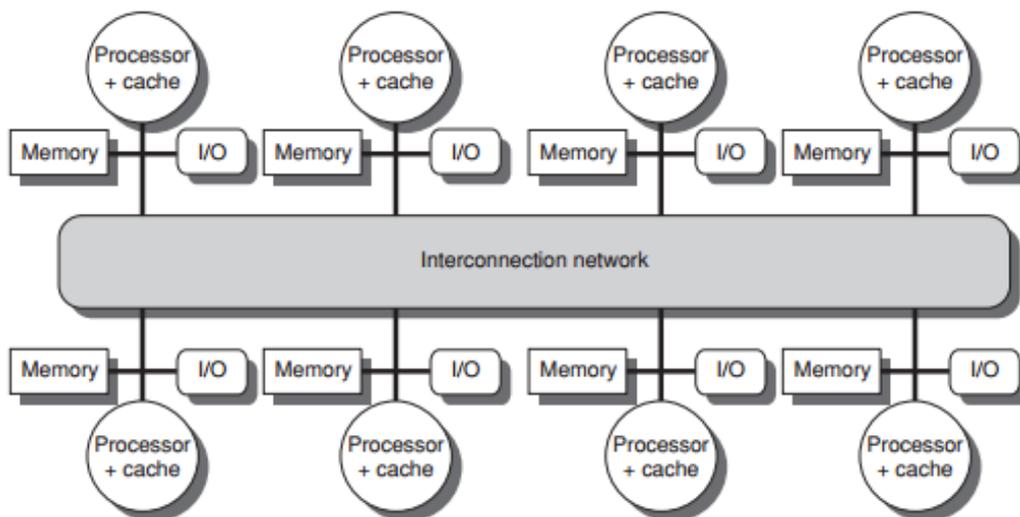


Figura 2.28.- Estructura básica de un sistema MIMD de memoria distribuida [HEN06].

2.4.4.- Retos de la computación paralela

Las arquitecturas paralelas se utilizan para resolver una misma tarea en menor tiempo, en caso de ser paralelizable, o para poder ejecutar varias tareas simultáneas de una forma más eficaz. Sin embargo hay dos importantes obstáculos (dependiendo de la arquitectura y aplicación) explicables por la ley de Amdahl:

- El nivel de paralelismo es limitado y dependiente de los problemas a resolver.
- La sincronización de entidades de ejecución autónomas supone un coste a tener en cuenta y un aspecto fundamental a controlar.

En base a lo expuesto, una recurrencia excesiva a la paralelización puede ser contraproducente en el rendimiento a partir de cierto punto. Por consiguiente, es fundamental aplicar técnicas de computación paralela de forma pertinente y sobre una arquitectura conceptualmente compatible con el problema que se pretende tratar.

En el capítulo 4 de [HEN06] se puede encontrar más información sobre la computación paralela, así como en el capítulo 2 de [RED08].

Capítulo 3. Materiales y métodos

En este capítulo se resumen los materiales empleados y la metodología seguida para el desarrollo del proyecto, concretando además los aspectos propios del mismo.

En primer lugar se hace una definición precisa del problema que se pretende abordar, en qué contexto se desarrolla y qué dos variantes se han planteado sobre el mismo criterio de optimización.

A continuación se habla sobre las etapas y metodología de trabajo seguidas para afrontar el desarrollo del proyecto.

En tercer lugar se exponen los materiales con los que se ha desarrollado el proyecto, destacando la labor y función de cada uno de ellos.

En cuarto lugar se describe en detalle el modelo de diseño de rendimiento óptico del campo solar desarrollado como criterio de optimización o función objetivo.

En quinto y último lugar se habla de los métodos de optimización que se han aplicado para hallar el diseño óptimo del campo solar, en su doble vertiente, para optimizar los parámetros de un modelo de diseño y para escoger directamente posiciones.

3.1.- Planteamiento del problema

La distribución de un cierto número de helióstatos en torno al receptor de una central de torre no es arbitraria, sino que se hace en base a un cierto criterio, o incluso tratando de satisfacer de la mejor forma posible un conjunto de criterios. La construcción del campo solar, según la distribución que se defina, supondrá en torno al 50% del coste de la central [JON07]. Es deseable por tanto plantear y valorar diseños para escoger el que mejor se ajuste a los objetivos requeridos para tener ciertas garantías de éxito. Este proceso se denominará “optimización” del campo solar o campo de helióstatos como ya se ha anticipado.

En este proyecto se fija como criterio de éxito el rendimiento óptico que logra el diseño del campo solar. Se pretende así hallar distribuciones de helióstatos que logren aprovechar al máximo posible la radiación incidente para concentrarla en el receptor. Se trata de un objetivo importante ya que, como también se ha anticipado, según su rendimiento el campo solar puede suponer hasta un 40% de pérdida energética [JON07].

Adaptando los principios que se mencionan en [RAM12] para abordar la optimización del campo solar, y reflejando además la importancia del método particular de optimización, se necesitan los siguientes elementos para esta situación:

- Un esquema de ubicación de helióstatos.
- Un modelo de evaluación del rendimiento óptico.
- Un algoritmo de optimización.

El objetivo principal de este proyecto es realizar una comparativa de los resultados de optimización de un algoritmo heurístico estocástico, UEGO, con un algoritmo heurístico determinista voraz y con un algoritmo heurístico estocástico de búsqueda aleatoria empleado como referencia de control. No obstante, en este proyecto se abordan todos los elementos con la intención de realizar un proceso de optimización completo. Concretamente, y como se introdujo en el primer capítulo, se definen dos variantes sobre la optimización del rendimiento óptico campo solar. Se mantiene, por tanto, una función objetivo común: un modelo del rendimiento óptico capaz de valorar una cierta distribución de helióstatos en la labor de redirigir y concentrar la radiación solar incidente sobre el receptor. En la figura 3.27 se refleja de forma muy ilustrativa esta situación.

En la **primera variante** se aplica la optimización sobre un conjunto reducido de variables que, en base a un modelo de diseño configurable, que se expondrá posteriormente, genera una cierta distribución de los helióstatos en torno al receptor. A diferencia del proceso que se sigue en [NOO12] por ejemplo, el número de helióstatos colocados siguiendo el modelo será directamente el que se desee ubicar en la central. De esta forma, no se aplicará el

modelo de diseño para muestrear la superficie, sino para definir el campo solar de forma implícita.

En la **segunda variante** se aplicará la optimización sobre la superficie de la central “completa”. De forma más precisa, se muestrearán la superficie de la central con un modelo de diseño no configurable y enfocado a generar siempre el máximo número de posiciones disponibles. Este modelo de diseño no se aplicará como tal, sino como discretizador de la superficie de la central para una posterior elección de posiciones para optimizar el rendimiento óptico global.

Se puede entonces definir el siguiente problema de optimización, orientado a la maximización, para la primera variante:

$$\max f(M(d)) / d \in D \quad (3.1)$$

M representa el modelo de ubicación capaz de generar un diseño completo de la planta en base a un elemento d del conjunto D . D es por tanto un conjunto no vacío definido en R^n , siendo n el número de variables con las que opera el modelo M y con un cierto rango para cada dimensión. D supone por lo tanto el espacio de búsqueda y sus elementos son las soluciones candidatas. La función objetivo es f , el modelo de rendimiento, y está definida para cada diseño generado por M , en base a un cierto d .

Además, generalizando la expresión 3.1, se define un problema de optimización alternativo en términos directos de la ubicación de los helióstatos sobre la superficie de la central y enfocado a la segunda variante:

$$\max f(x) / x \in X \quad (3.2)$$

Donde el espacio de búsqueda X se compone de soluciones candidatas que son, a su vez, conjuntos de pares de coordenadas cartesianas bidimensionales X, Y en \mathbb{R} que definen la colocación de cada helióstato tomando como referencia el receptor. La función objetivo es igualmente f , el modelo de rendimiento, y está definida para cualquier distribución físicamente válida de pares de coordenadas de la forma:

$$x = \{(x_1, y_1), \dots, (x_N, y_N)\} \quad (3.3)$$

Nótese que se trata fundamentalmente del mismo problema de optimización con la diferencia de que el espacio de búsqueda se define de forma sensiblemente distinta. Esto se debe a que en la expresión 3.2 no se tiene en cuenta cómo se generan las posiciones que definen la planta, centrándose en la ubicación individual de cada elemento del campo solar. De hecho, expresando cualquier solución candidata $M(d)$ del planteamiento previo en el conjunto de coordenadas válido al que da lugar, es también solución candidata para el problema definido en la expresión 3.2. En este enlace conceptual se basa por ejemplo [RAM12] para optimizar el modelo de ubicación, empleado como mero muestreador de

superficie, y posteriormente buscar la secuencia de posiciones óptima de entre las disponibles.

El enfoque dado al problema se puede enmarcar en los extremos del planteamiento tratado en [RAM12]. Se aborda la optimización de las variables de un modelo de ubicación pero el resultado, como conjunto de posiciones, no es a su vez optimizado. Por otro lado, se trata la optimización referente la selección de un conjunto de posiciones válidas para los helióstatos. Sin embargo este conjunto de posiciones no se obtiene de forma configurable o refinada, sino buscando la máxima densidad posible de muestreo. Con la alternativa es de esperar una optimización más rápida y con peor resultado en la función objetivo. En contraposición, con la segunda opción es de esperar un mejor resultado en la función objetivo por la gran movilidad de los helióstatos. Sin embargo, se le supone también un mayor coste asociado para instancias grandes del problema dado el aumento del espacio de búsqueda por el muestreo denso llevado a cabo. En [RAM12] se combina la generación de las posiciones disponibles mediante un modelo de ubicación (y muestreo) configurable con una optimización posterior de las posiciones disponibles. De esta forma, el proceso que se sigue en dicho artículo combina en un punto intermedio las dos vertientes planteadas.

Las condiciones contextuales en las que se plantea el problema tratado son las siguientes:

- La superficie de la central, donde se deben ubicar los helióstatos para maximizar su rendimiento óptico, es totalmente plana. Esta superficie queda definida en la Tierra mediante la latitud del receptor de la central, conociendo además su altura sobre el nivel del mar. Nótese también que se asume una situación atmosférica constante y despejada. (Véase la figura 3.1)
- El receptor es puntual y ubicado a una altura conocida sobre la superficie, con una cierta latitud terrestre. La estructura sobre la que se sitúa, es decir, la torre, sólo es relevante por su altura, siendo el resto de dimensiones despreciables. Sus capacidades de captación de radiación son perfectas desde cualquier punto del espacio (360° de recepción). (Véase la figura 3.1)
- Se trabaja con helióstatos de características comunes en toda la central. Su superficie reflectante rectangular y plana, cuyas dimensiones, base y altura, son conocidas. La superficie reflectante tiene además una anchura despreciable. Los helióstatos tienen además un índice de reflectividad común y constante con una estructura orientable en azimut-elevación. El eje de elevación se supone despreciable y el eje azimutal tiene una altura conocida, siendo el resto de dimensiones también despreciables. El sistema de control de orientación se asume ideal con operación autónoma, por lo que cada helióstato mantiene orientada su superficie, según la posición aparente del Sol, de la mejor forma posible. Cada helióstato es ubicable en la superficie mediante su punto central donde se integra con la estructura de soporte. Este punto central

mantiene además unas coordenadas constantes sobre la superficie, tomando la torre del receptor como referencia (véase la figura 3.2).

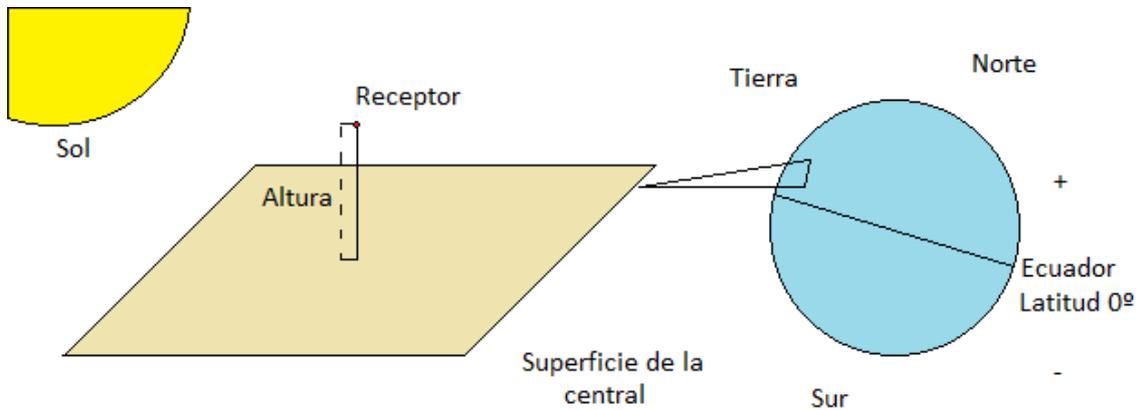


Figura 3.1.- Superficie de la central.

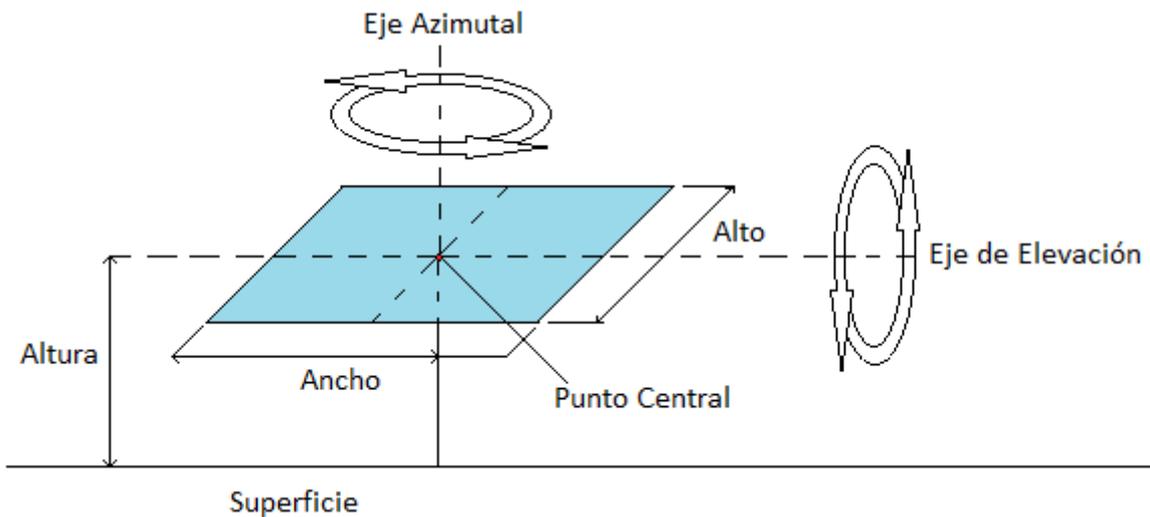


Figura 3.2.- Esquema de heliostato empleado.

3.2.- Fases y metodología de desarrollo

El proyecto se ha llevado a cabo en seis fases de desarrollo, que se listan a continuación:

- **Búsqueda bibliográfica:** En esta etapa se ha realizado una búsqueda de recursos bibliográficos y didácticos que den un soporte teórico y orienten tanto el desarrollo

del modelo del campo solar como la definición del problema de optimización así como cualquier otro aspecto a tratar en el proyecto. Se han empleado además para buscar información sobre distintos métodos y algoritmos de optimización que se han considerado especialmente relevantes.

- **Modelado del rendimiento óptico del campo solar:** En el modelado del campo solar se ha desarrollado un simulador básico enfocado a estudiar en qué medida un cierto diseño tiene un comportamiento adecuado y productivo en la concentración de la radiación solar sobre el receptor. Este componente se ha desarrollado para servir como función objetivo en el contexto del problema de optimización planteado. Proporciona por tanto un marco común de operación para el estudio, en igualdad de condiciones, de los tres algoritmos aplicados.
- **Modelado del diseño del campo solar:** Se ha buscado, estudiado y adaptado un modelo de diseño o ubicación con el que plantear la distribución de un conjunto de helióstatos, en torno al receptor, en base a un conjunto de variables que lo definen.
- **Definición de un problema de optimización:** Se ha definido formalmente un problema de optimización sobre el modelo de rendimiento óptico como función objetivo. Se han planteado dos variantes del mismo problema general. En la primera, el espacio de búsqueda se ha definido en torno a las variables que configuran el modelo de diseño. En la segunda, el espacio de búsqueda es un conjunto de posiciones aproximables por la totalidad de la superficie de la central.
- **Aplicación de métodos de optimización:** Una vez planteado el problema en términos formales, se han aplicado tres métodos heurísticos en ambas variantes del problema global: Búsqueda Voraz, Algoritmo UEGO, Búsqueda Aleatoria Pura.
- **Comparativa de resultados del proceso de optimización:** Finalmente se ha realizado un estudio comparativo, en términos de eficiencia y eficacia, de los tres métodos de optimización aplicados a la resolución del problema.

En lo referente metodología de desarrollo se ha seguido, de forma iterativa, el siguiente ciclo de actividades:

- **Análisis y diseño**
- **Implementación**
- **Pruebas**
- **Corrección (cuando es necesaria)**
- **Integración**

Las tareas de análisis y el diseño han supuesto fundamentalmente la selección, consulta y comprensión de la bibliografía para determinar con exactitud cada aspecto a implementar. Cuando se ha logrado una idea precisa y conceptual de la parte a desarrollar, se ha llevado a cabo su implementación en C++. En las tareas de desarrollo se destaca que ciertas partes se han implementado inicialmente en Java y/o C#, para una posterior transcripción, de cara a una revisión más profunda y optimización de dichas partes. Como componentes encuadrables en este grupo especial se pueden destacar el modelo de diseño y ubicación completo, y el cálculo de los factores de bloqueo y sombreado. Finalmente, el funcionamiento y resultados de cada parte implementada se han probado y analizado, en la medida de lo posible, con las fuentes bibliográficas y/o mediante consultas a los tutores. En este contexto se destacan además algunas utilidades auxiliares, desarrolladas para pruebas independientes o tareas concretas. En particular, se ha elaborado una herramienta con la que representar aproximadamente el campo solar, en vista cenital, según un conjunto de coordenadas y el radio de la circunferencia característica de los helióstatos. Se han desarrollado también tres aplicaciones básicas con las que comprobar la transcripción de puntos de los helióstatos al espacio, la orientación de los helióstatos con el Sol y cálculos relacionados con el posicionamiento solar, la radiación incidente o la conversión horaria. Estas cuatro herramientas auxiliares se exponen en el apéndice B.

3.3.- Materiales

Para el desarrollo del proyecto se han empleado distintas herramientas y recursos que se enumeran y describen brevemente a continuación.

Recursos bibliográficos

Se ha tenido acceso a las distintas fuentes bibliográficas que se listan en la sección pertinente. Los recursos bibliográficos se han empleado para:

- Conocer, en profundidad suficiente como para entender el contexto real del proyecto, el funcionamiento básico de las centrales heliotérmicas de torre.
- Aprender diversos conceptos sobre la relación entre el Sol y la Tierra, ángulos de interés y sistemas horarios.
- Aprender los fundamentos de los problemas de optimización, desde su expresión formal hasta ciertas situaciones de aplicación.
- Obtener una visión amplia, mediante una clasificación general de los enfoques algorítmicos con los que se pueden abordar.
- Profundizar en ciertos algoritmos de optimización, heurísticos y estocásticos, en su función de optimizadores.

- Comprender los fundamentos del diseño de campos solares viendo enfoques generales para su desarrollo.
- Analizar el modelado de un campo solar y cómo se puede llevar a cabo.

De la sección bibliográfica se resaltan las siguientes fuentes por su calidad y repercusión en este trabajo:

[STI01] Contiene información de gran calidad sobre los aspectos fundamentales del aprovechamiento energético del Sol en general, la energía que se genera e irradia en el Sol, la perspectiva solar desde la tierra, la captación de la radiación solar y finalmente las bases de las centrales heliotérmicas de torre. Estos contenidos se exponen en sus capítulos 1, 2, 3, 4 y 10 respectivamente.

[HON] Este curso en línea está orientado a la generación de energía eléctrica mediante células fotovoltaicas. Sin embargo, aspectos como el movimiento de la Tierra en torno al Sol, o el movimiento aparente que sigue según el Sol según se observe, así como otros contenidos comunes a cualquier tipo de aprovechamiento de la energía solar se tratan de una forma muy didáctica.

[RAM12] Este artículo da una visión muy concreta y precisa del enfoque seguido para la optimización del campo solar. Su modelo de ubicación es la base del que se ha escogido y el algoritmo NSPOC mencionado ha inspirado el algoritmo voraz con el que se ha comparado UEGO.

[NOO12] En este artículo se trata de forma concisa e instructiva cómo se puede valorar el rendimiento óptico del campo solar. Su descripción del modelo de rendimiento óptico y, especialmente su propuesta de recorrer el tiempo de forma variable, se han tomado para desarrollar la función objetivo del problema de optimización.

Recursos hardware

El proyecto se ha desarrollado en cuatro equipos de forma complementaria, cuyas características principales y funciones básicas se describen a continuación:

Primer equipo: Equipo de sobremesa con procesador AMD Athlon 64 3200+ a 2.0 GHz mononúcleo y arquitectura x64 con tarjeta gráfica integrada. El equipo cuenta con 1 GB de memoria principal (RAM) y 80 GB de disco duro. El sistema operativo instalado es Ubuntu 12.04 de 32 bits. Este equipo se ha utilizado para el desarrollo de ciertas partes del modelo de rendimiento óptico en lenguaje C++.

Segundo equipo: Equipo portátil Compaq Presario CQ57 con procesador Intel Celeron CPU B800 @ 1.5 GHz de doble núcleo y arquitectura x64 con tarjeta gráfica integrada. Se trata de un sistema MIMD de memoria compartida (véase la sección 2.4). El equipo cuenta con 4 GB de memoria principal (RAM) y 250 GB disco duro. El sistema operativo instalado es Windows 7 Home Premium de 64 bits. Este equipo se ha utilizado para desarrollar y probar ciertas

partes aisladas del modelo de rendimiento y del modelo de ubicación en lenguaje Java. En este equipo se ha desarrollado una utilidad auxiliar de representación bidimensional del campo solar en C#. Finalmente se ha empleado para la redacción de esta memoria.

Tercer equipo: Equipo portátil Asus F551C con procesador Intel Core i3 3217U @ 1.8 GHz de doble núcleo, arquitectura x64 de tipo MIMD de memoria compartida y con tarjeta gráfica integrada. El equipo cuenta con 4 GB de memoria principal (RAM) y 500 GB de disco duro. El sistema operativo instalado es Lubuntu 14.04 de 64 bits. Este equipo se ha utilizado, de forma complementaria al primero, para el desarrollo de ciertas partes del modelo de rendimiento óptico, así como para la implementación del modelo de ubicación completo, el desarrollo y/o enlace con los algoritmos de optimización. Sobre este equipo se han hecho además las pruebas de ejecución principales sobre las que se habla en el capítulo siguiente.

Cuarto equipo: Equipo portátil Asus X552CL-XX338H con procesador Intel Core i7 3537U @ 2.0 GHz de cuatro núcleos, arquitectura x64 de tipo MIMD de memoria compartida. Su tarjeta gráfica, externa, es una NVIDIA GeForce GT710M con 1GB GDDR3. El equipo cuenta con 8 GB de memoria principal (RAM) y 1TB de disco duro. El sistema operativo instalado es Lubuntu 14.04 de 64 bits. Este equipo se ha empleado únicamente para complementar el estudio de la aceleración lograda por la versión paralela del modelo de rendimiento óptico.

Recursos software

Como herramientas software se han empleado dos tipos de utilidades para desarrollar el proyecto. En primer lugar se han utilizado las siguientes herramientas de desarrollo:

Geany 0.21: Este editor avanzado, instalado en el primer equipo, se empleó para desarrollar el modelo de rendimiento óptico, en C++, durante las fases iniciales del proyecto. Sin embargo, dejó de usarse tras estas primeras etapas. El compilador empleado es GCC 4.8.2.

Code::Blocks IDE v13.12: Este entorno de desarrollo integrado se instaló en el primer y tercer equipo, como reemplazo del editor Geany al tener funciones más avanzadas, para llevar a cabo la implementación global del proyecto en C++. Con este entorno se desarrolló una utilidad con la que realizar cálculos de posicionamiento solar y conversión horaria entre otros. El compilador empleado es GCC 4.8.2.

Eclipse Indigo: Este entorno de desarrollo, instalado en el segundo equipo, se empleó para el desarrollo de ciertos componentes aislados de los modelos de rendimiento y ubicación en Java, de cara a refinar y hacer pruebas detalladas de los mismos. El entorno de Java empleado es el JDK 1.6.

Visual Studio 2010 Ultimate Edition: Este entorno de desarrollo, instalado en el segundo equipos, se ha empleado para desarrollar, en C# (Net Framework 4.0), un visualizador del campo solar en vista cenital con el que representar los resultados de la ubicación y optimización. Se han desarrollado también dos utilidades para transcribir coordenadas de

los helióstatos al espacio tridimensional y para orientar helióstatos con el Sol (véase el apéndice B).

Microsoft Mathematics 4.0: Esta utilidad de cálculo se ha utilizado para representar ciertas funciones así como realizar cálculos sencillos a lo largo del desarrollo.

Microsoft Excel 2010: Esta herramienta se ha utilizado para la realización de gráficas y tablas con los resultados de los experimentos y mediciones que se incluyen en el cuarto capítulo.

Microsoft Word 2010: Esta aplicación se ha empleado única y exclusivamente para la redacción de esta memoria del proyecto.

Wolfram Alpha: Esta utilidad de cálculo en línea se ha empleado para representar y calcular funciones más complejas como complemento a Microsoft Mathematics. Disponible en <http://www.wolframalpha.com/>

Applets de [STI01]: En [STI01] hay herramientas en línea para calcular ciertos aspectos relativos al posicionamiento solar, cálculo horario... que se han usado como criterio de corrección de las partes correspondientes del proyecto.

Applets de [HON]: En [HON] hay herramientas en línea para calcular ciertos aspectos relativos al posicionamiento solar, la densidad de radiación en una zona... que se han usado como criterio de corrección de las partes correspondientes del proyecto. Destaca especialmente el cálculo del posicionamiento solar, cuya representación gráfica es muy descriptiva.

Bubbl.us: Herramienta en línea para desarrollar mapas conceptuales. Con esta utilidad se han elaborado los esquemas referentes a la clasificación de los algoritmos de búsqueda y optimización en el capítulo 2. Disponible en <https://bubbl.us/>

Algoritmo UEGO: Se ha empleado una versión existente del algoritmo UEGO, que incluye a GASUB, sobre el que se ha incluido la configuración y funciones pertinentes para abordar la resolución del problema de optimización.

OpenMP: Se ha utilizado esta conocida API de programación concurrente para llevar a cabo una paralelización sencilla y efectiva de ciertos aspectos del proyecto de los que se hablará posteriormente.

3.4.- Modelo de ubicación

El modelo de ubicación desarrollado para aplicar sobre sus variables de configuración el proceso de optimización se basa directamente en el descrito en [RAM12], operando sobre las mismas ocho variables y seis expresiones para definir una cierta distribución de

helióstatos. De hecho, la principal fuente de diferencias surge fundamentalmente de la necesidad de completar algunos detalles que no se mencionan explícitamente y que, por lo tanto, se han resuelto de forma particular.

Como se anticipó, este esquema de ubicación sigue la misma filosofía que el tradicional “intercalado radial” (“radial staggered”). Por lo tanto, se apuesta por una distribución circular aproximada formando anillos intercalados para minimizar la posibilidad de bloqueo y sombreado entre helióstatos.

El primer aspecto a tener en cuenta es que se manejarán los helióstatos como circunferencias sobre la superficie, algo habitual en la bibliografía y que no se menciona directamente en el citado artículo (aunque pueda deducirse del contexto). En base a la figura 3.2 y los grados de libertad del helióstato ilustrado, es posible inscribirlo en una circunferencia en la que puede moverse libremente sin tocar a ningún otro helióstato que no corte esta circunferencia.

El radio r de la circunferencia circunscrita de un cierto helióstato sobre la superficie se determina, de forma sencilla, imaginándolo paralelo a la superficie, que es cuando más espacio ocupa sobre la misma (véase la figura 3.3).

Para determinar r en la figura 3.3 basta con aplicar el Teorema de Pitágoras, obteniendo la siguiente expresión:

$$r = \frac{\sqrt{\text{alto}^2 + \text{ancho}^2}}{2} \quad (3.4)$$

Donde alto y ancho son las dos dimensiones de la superficie del helióstato. Sobre este radio de la circunferencia característica de los helióstatos se puede añadir además una distancia extra que llevaría a manejar circunferencias mayores. Esta distancia dependerá, por ejemplo de aspectos como las necesidades espaciales para realizar labores de mantenimiento de los helióstatos. En base a esta distancia radial, la mínima separación segura entre helióstatos será, por tanto, el doble de dicho radio característico, o lo que es lo mismo, el diámetro de la circunferencia característica.

La suma de este diámetro más un cierto espacio extra que se quiera añadir determina el valor de referencia R_{min} :

$$R_{min} = \sqrt{\text{alto}^2 + \text{ancho}^2} + \text{distanciaExtra} \quad (3.5)$$

Otro detalle a tener en cuenta es el sistema de coordenadas respecto al cual se describen las posiciones de los helióstatos (del centro de sus circunferencias características) en el modelo

de ubicación. Concretamente se opera en coordenadas polares, es decir, en radio R (metros) y ángulo θ (radianes) de desplazamiento. Este sistema es, obviamente, el más sencillo de aplicar por el tipo distribución circular. La referencia de la distancia angular o azimut sobre la superficie se mide desde el Norte, siendo éste la ubicación de 0 rad de azimut. Esta coordenada crece en el sentido de las agujas del reloj hasta llegar a la misma dirección Norte. Por el contrario, la distancia radial se mide como la distancia entre el punto concreto y la ubicación de la torre con el receptor. Esta situación se ilustra en la figura 3.4.

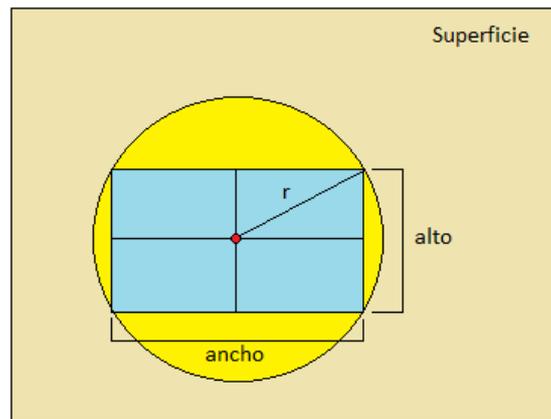


Figura 3.3.- Vista cenital de un helióstato.

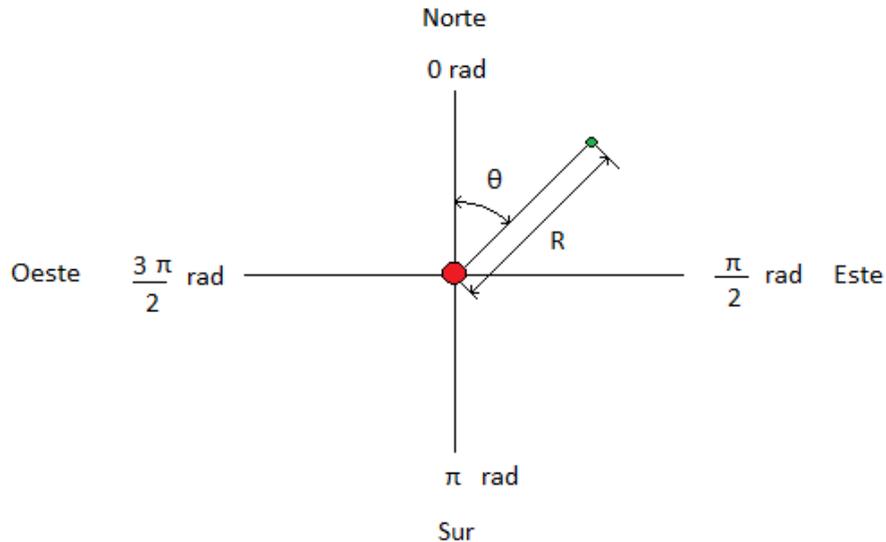


Figura 3.4.- Sistema de coordenadas polares empleado en la ubicación.

Partiendo de estos dos conceptos, la concepción circular de los helióstatos sobre la superficie y el sistema de coordenadas que se emplea, se puede entonces profundizar sobre el modelo de ubicación en sí:

La distancia radial base de la n -ésima fila R_n se determina en primera instancia mediante la siguiente expresión recursiva [RAM12]:

$$R_n = a_o + (a_1 + 1)R_{n-1} \quad (3.6)$$

Sobre esta expresión se definen dos variables del modelo:

Variable a_o : Espaciado inicial entre filas de helióstatos.

Variable a_1 : Incremento espacial entre filas.

La expresión 3.6 determinará el radio base de la n -ésima fila a partir de la anterior, por lo que se necesita especificar al modelo de ubicación la distancia original R_o :

Parámetro R_o : Distancia radial base de la primera fila de helióstatos.

Es importante destacar además que el radio base de las filas no pasa a ser directamente el valor obtenido según la expresión 3.6, sino el máximo entre ese valor candidato y la suma de la distancia de la fila anterior y la distancia mínima ya mencionada R_{min} . Se consigue de esta forma que el modelo no pueda solapar filas en caso de una mala configuración ya que, como mínimo, el radio de la siguiente fila incluirá la distancia de seguridad de colocación de helióstatos:

$$R_n = \max(R_{n-1} + R_{min}, a_o + (a_1 + 1)R_{n-1}) \quad (3.7)$$

Un aspecto muy interesante es el hecho de contemplar que las filas de helióstatos no tengan por qué ser circulares [RAM12]. Esto se consigue mediante la adición de un incremento ΔR dependiente del azimut del helióstato dentro de una cierta fila θ , en base a la siguiente expresión [RAM12]:

$$\Delta R = \begin{cases} d_\theta \theta & \text{si } 0 < \theta \leq \pi \\ d_\theta (2\pi - \theta) & \text{si } \pi < \theta < 2\pi \end{cases} \quad (3.8)$$

Nótese que, de forma previsoramente, cuando se habló de R_n se nombró como “radio base” de la n -ésima fila. Esto se debe a que, realmente el radio concreto de un helióstato en una cierta fila será igual al radio R_n propio de la fila más el incremento ΔR propio de su valor azimutal.

De la expresión 3.8 se extrae una nueva variable para el modelo de ubicación:

Variable d_θ : Corrección de la distancia radial según la posición azimutal.

Cuando la variable d_θ sea positiva, entonces los helióstatos estarán más próximos al receptor en la zona norte del campo solar que los de la zona sur. Por el contrario, cuando d_θ sea negativa, los helióstatos en la zona sur serán los que estén más próximos al receptor. Además, en caso de ser $d_\theta = 0$, se podrían generar estructuras perfectamente circulares.

En lo referente a la separación de los helióstatos dentro de una misma fila, ésta se calcula mediante el trazo de circunferencias de un cierto radio cuyo valor se obtiene de forma recursiva tomando como referencia la posición del helióstato anterior. De forma más concreta, al ubicar una posición en una cierta fila, la próxima tendrá una posición angular dependiente de la anterior: Cuando se determina una posición, se trazan dos circunferencias. La primera tiene como centro el receptor y el radio definitivo de la posición recién determinada. La segunda tiene como centro el punto central de dicha posición y un radio D calculado en base a una cierta expresión de la que se hablará posteriormente. El corte entre ambas circunferencias que esté más avanzado sobre la primera (con un recorrido en el sentido de las agujas del reloj), determinará la coordenada azimutal de la próxima posición. La primera posición de la fila, no obstante estará siempre alineada con el Norte (0 rad).

Este proceso se ilustra en la figura 3.5. En dicha figura se puede apreciar como la posición azimutal del helióstato de centro morado se determina en base a una circunferencia de radio D trazada desde el centro del anterior y el corte que realiza en una circunferencia principal cuyo radio es el de dicho helióstato anterior. Es importante destacar de este procedimiento que el centro morado de la figura 3.5 no tiene por qué quedarse a ese radio puesto que así sólo se determina el valor azimutal. Por consiguiente se deberá determinar su distancia radial mediante la suma del radio base de la fila R_n y el incremento ΔR que corresponda como ya se ha mencionado.

Este procedimiento no se menciona en [RAM12], no quedando realmente claro cómo se mide e interpreta la separación angular de un helióstato respecto al anterior. Tras probar distintos enfoques se ha decidido finalmente seguir el sistema descrito con circunferencias.

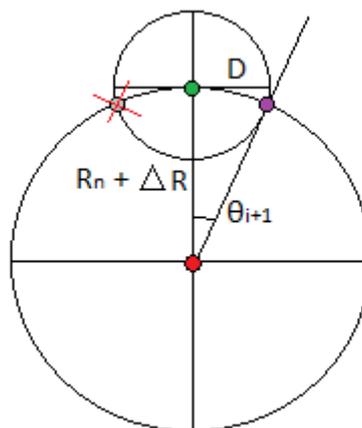


Figura 3.5.- Determinación de la posición azimutal de un helióstato respecto al anterior.

La distancia que se aplica a la separación entre helióstatos en la misma fila viene dada por la siguiente expresión recursiva, referida a la primera fila [RAM12]:

$$D_{\alpha}^1 = D_{\alpha-1}^1 + e_{\theta}\theta \quad (3.9)$$

Donde α indica helióstato dentro de la fila. Como se trata de una expresión recursiva, será necesario entonces indicar el primer valor, D_0^1 sobre el que construir la secuencia. Como se puede apreciar en la expresión 3.9, se incluye también una nueva variable para el modelo:

Variable e_{θ} : Variación de la distancia azimutal.

Teniendo en cuenta además que la primera posición de la fila tendrá siempre un azimut de 0 rad, este cálculo nunca se hará para un mismo helióstato, sino siempre pensando en el siguiente. De esta forma, el primero tendrá un azimut de 0 rad y determinará directamente el azimut del segundo y éste, a su vez, determinará el del tercero, y así sucesivamente. Nótese además que se debe controlar también que la distancia D no sea inferior a R_{min} que, por la forma de espaciado azimutal establece también la distancia de seguridad. Nótese que en [RAM12], sin embargo, se baraja una distancia D_{min} para el espaciado azimutal con la misma descripción que R_{min} , pero ésta tampoco se llega a concretar.

Es importante destacar en este contexto que realmente se distinguen dos tipos de filas: primarias y secundarias.

Las filas primarias se caracterizan por ser “totalmente calculadas”, es decir, porque se aplican los procesos descritos hasta ahora tanto para la distancia radial como para la distancia azimutal.

Por el contrario, de las filas secundarias sólo se calcula la distancia radial de base y el incremento de cada posición concreta. Las posiciones azimutales de estas filas secundarias se determinan simplemente mediante la intercalación de la que inmediatamente anterior (ya sea primaria o secundaria). De esta forma el azimut de un cierto helióstato de una fila secundaria será el ángulo medio de los dos helióstatos que tiene delante.

La aplicación directa de este sistema llevaría a determinar, en radio y ángulo, la primera fila, que sería primaria. El resto de filas serían simplemente secundarias, es decir, intercaladas unas tras otras como se ha descrito. Este sistema, sin embargo, supondría un gran desperdicio de espacio dado que siempre habría el mismo número de helióstatos por fila. Basta con asumir que se trata de filas circulares para pensar que la longitud de cada fila crece conforme se aumenta el radio. Por tanto, una cierta fila primaria puede contener cada vez más helióstatos en ella.

Este problema, ya mencionado en la revisión bibliográfica, se soluciona mediante la formación de grupos diferenciados. De esta forma no hay una única fila primaria en el posicionamiento, sino que generalmente habrá varias formando grupos con la siguiente estructura: Una fila primaria y X filas secundarias intercaladas entre sí. Entre grupos se dejará además un cierto espacio extra de forma que, el radio base de la fila primaria de un

nuevo grupo tendrá la siguiente separación con la última fila secundaria del grupo anterior sobre la que le correspondería normalmente [RAM12]:

$$\Delta = (1 + a_0 + a_1 R)\delta + \epsilon \quad (3.10)$$

Donde R es el radio base que tendría la nueva fila primaria en caso de no realizar ningún espaciado extra (expresión 3.7). De esta expresión surgen dos nuevas variables del esquema de ubicación:

Variable ϵ : Distanciado extra de las líneas de transición, las primarias de nuevos grupos.

Variable δ : Incremento de la distancia en las líneas de transición según la distancia radial.

La variable ϵ determina el espacio extra en una línea de transición para reducir posibles efectos de bloqueo y sombreado. La variable δ establece un espacio extra proporcional a la distancia radial de la fila.

En base a la existencia de múltiples filas primarias, y con el objetivo mencionado de ajustar los helióstatos que caben por fila, es necesario generalizar la expresión 3.9 para aplicarla sobre cualquier fila primaria en lugar de sólo a la primera [RAM12]:

$$D_\alpha^\alpha = D_{\alpha-1}^\alpha + e_\theta \theta \quad (3.9)$$

Como se puede deducir en comparación de ambas expresiones, el índice superior α indicará la fila primaria de cada grupo mientras que el inferior sigue siendo la posición concreta dentro de dicha fila primaria. De esta expresión definitiva para el espaciado azimutal es muy importante destacar que, su aplicación directa para ángulos desde 0 a 2π rad puede llegar a desequilibrar las filas de forma importante. Por lo tanto, y como no se describe en [RAM12] sobre qué intervalo angular se aplica realmente, se opta por construir las filas por clonación entre el hemisferio Este y Oeste. De esta forma no solo se reducen a la mitad las iteraciones, sino que se garantiza una estructura simétrica que se muestra además en las figuras de ejemplo en [RAM12]

Dada la generalización de la distancia D , se generaliza también el primer espaciado azimutal D_0^α , dependiendo de la fila primaria de la que se trate, según la siguiente expresión [RAM12]:

$$D_0^\alpha = (b + 1)D_0^{\alpha-1} \quad (3.12)$$

En base a dicha expresión, la separación azimutal inicial de cada fila primaria puede alterarse con el radio base de su grupo, debiendo guardar también la mencionada distancia de seguridad. En cualquier caso, la primera separación inicial D_0^1 sigue siendo necesaria, aunque se tratará finalmente como una variable. Por consiguiente, las dos últimas variables para el esquema de ubicación son:

Variable b : Dependencia azimutal con la distancia radial del grupo.

Variable D_0^1 : Primera separación azimutal de la fila primaria inicial.

Es importante tener en cuenta también que se ha hablado de grupos como una fila primaria totalmente calculada y un conjunto de filas secundarias intercaladas entre sí, sin embargo no se ha llegado a concretar el número total de filas que conforma un grupo. En [RAM12] se propone como ejemplo la siguiente distribución de filas por grupo: 2-3-3-4-4-5-5-6-6-7-7... que obtiene resultados adecuados en las pruebas.

En este proyecto, no obstante, se ha optado por una distribución de filas por grupo levemente más equilibrada: 2-2-3-3-4-4-5-5-6-6-7-7...

Este esquema de ubicación, como ya se ha destacado, permite muestrear posiciones formando estructuras más complejas que simples circunferencias mediante el ajuste de sus variables dando lugar a filas siempre circulares, separación constante entre grupos... Esta variabilidad hace al esquema bastante interesante.

Como ejemplos, en la figura 3.6 se incluye una distribución de 98 helióstatos con un espacio considerable entre grupos distintos y formando circunferencias perfectas en las filas. En la figura 3.7 se puede apreciar una distribución de 55 helióstatos en la que el valor negativo de la variable d_θ hace que los helióstatos estén más próximos al receptor al sur del mismo. En contraposición, en la figura 3.8 se muestra una distribución de 90 helióstatos en la que, el valor positivo de d_θ , hace que estén más cerca al norte del receptor.

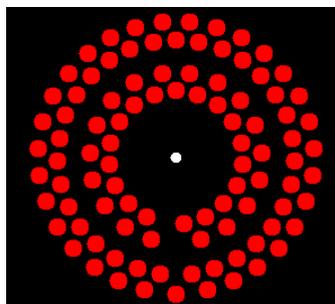


Figura 3.6.- Distribución considerablemente espaciada en circunferencias perfectas.

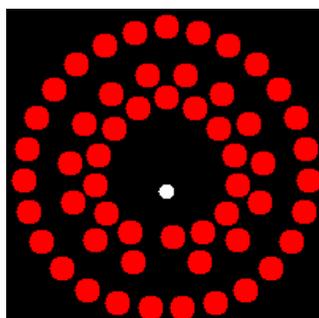


Figura 3.7.- Distribución considerablemente espaciada en circunferencias más próximas al Sur.

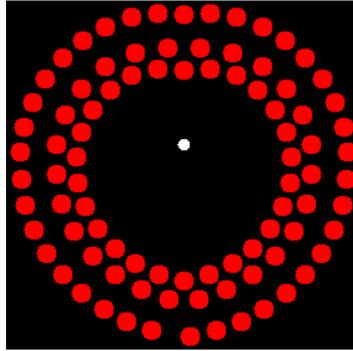


Figura 3.8.- Distribución considerablemente espaciada en circunferencias más próximas al Norte.

3.5.- Modelo de rendimiento óptico

Nomenclatura principal empleada

α	Altitud solar ($^{\circ}$)
δ	Ángulo de declinación ($^{\circ}$)
A	Azimut solar ($^{\circ}$)
A_H	Azimut de la superficie reflectante del heliostato ($^{\circ}$)
E_H	Elevación de la superficie reflectante del heliostato ($^{\circ}$)
η	Factor de eficiencia óptica instantánea del campo solar
$\eta_{año}$	Factor de eficiencia óptica promedio anual del campo solar
$\eta_{año,l}$	Factor de eficiencia óptica ponderada con la densidad de radiación promedio anual del campo solar
η_{aa}	Factor de atenuación atmosférica
η_{cos}	Factor coseno
σ_{ref}	Constante de reflectividad de los heliostatos
$\eta_{bloqSom}$	Factor de bloqueo y sombreado
ω	Hora angular ($^{\circ}$)
I_D	Densidad de radiación directa instantánea (W/m^2)

ϕ	Latitud (°)
θ_z	Zenit solar (°)

3.5.1.- Sistemas de coordenadas de la central

Para realizar el análisis de la central se trabaja con un sistema de coordenadas cartesianas tridimensional. El eje *E* va de Oeste a Este, el eje *N* va de Sur a Norte y el eje *Z* va desde la superficie hacia el cielo. El origen del sistema, (0, 0, 0), se sitúa en la base de la torre del receptor (véase la figura 3.9).

En este sistema de coordenadas, y partiendo del planteamiento del problema de la sección 3.1, el receptor es el punto (0, 0, z_0) siendo z_0 la altura del receptor. Además, cada helióstato queda definido mediante la posición de su punto central (e_h, n_h, z_h). Sin embargo, dado que los helióstatos tienen la misma altura, se pueden expresar directamente como la dupla (e_h, n_h) que determina su ubicación en la superficie.

Los ejes se pueden expresar como tres vectores unitarios:

$$\begin{aligned}\vec{e} &= (1, 0, 0) \\ \vec{n} &= (0, 1, 0) \\ \vec{z} &= (0, 0, 1)\end{aligned}\tag{3.13}$$

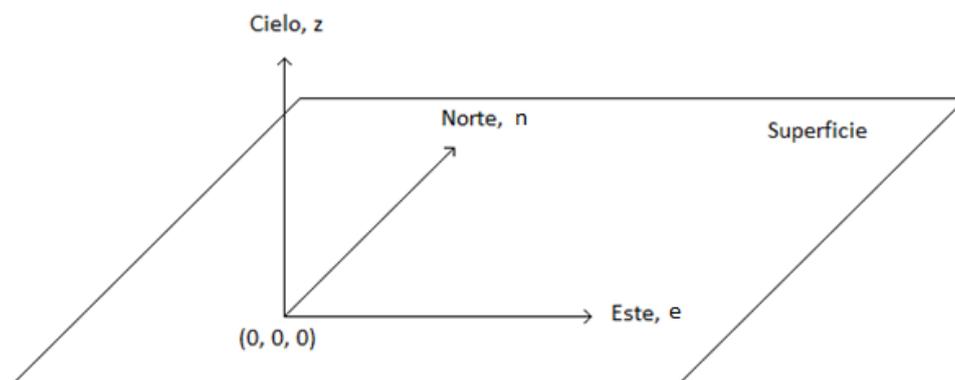


Figura 3.9.- Sistema de coordenadas.

3.5.2.- Cálculo del ángulo de declinación

El ya mencionado ángulo de declinación δ (véase la sección 2.2.2), aquel que forman el plano ecuatorial y una línea trazada desde el centro de la Tierra al centro del Sol, varía con el

movimiento de traslación de la Tierra. Por lo tanto, este ángulo ha de calcularse según el día del año. Conocido el día del año, comprendido en el rango [1, 366] (para años bisiestos), se puede aproximar el ángulo de declinación mediante la siguiente expresión [STI01]:

$$\delta = \text{asen}(0.39795 \cos[0.98563(N - 173)]) \text{ (}^\circ\text{)} \quad (3.14)$$

Esta expresión, donde N es el mencionado número de día, aproxima el ángulo de declinación con precisión suficiente para los cálculos posteriores (margen de error en torno a un grado).

De hecho, este ángulo realmente no se requiere por sí mismo, pero se empleará para obtener las horas de amanecer y anochecer de un cierto día, así como estimar la posición aparente del Sol tal y como se percibe desde la torre del receptor.

3.5.3.- Hora de amanecer y anochecer

El intervalo de tiempo que interesa para simular y medir el rendimiento óptico del campo solar en un día completo va únicamente desde el amanecer hasta el anochecer, es decir, cuando “es de día”.

Es posible obtener la hora angular (véase la sección 2.2.4) del anochecer, $\omega_{\text{anochecer}}$, para un cierto día y latitud. Ésta depende del ángulo de declinación y puede calcularse según la siguiente expresión dado que se asume un horizonte plano [STI01]:

$$\omega_{\text{anochecer}} = \text{acos}(-\tan \delta \tan \Phi) \text{ (}^\circ\text{)} \quad (3.15)$$

Si $(\tan \delta \tan \Phi) \geq 1$ no se pone el Sol

Si $(\tan \delta \tan \Phi) \leq -1$ no sale el Sol

Donde Φ es la latitud de la torre de la central y δ el ángulo de declinación.

La hora angular del amanecer se puede obtener, por definición, simplemente invirtiendo el signo de la del anochecer:

$$\omega_{\text{amanecer}} = -\omega_{\text{anochecer}} \quad (3.16)$$

Conociendo el momento del amanecer y el anochecer de un cierto día es posible además calcular las horas de Sol de dicho día según la siguiente expresión, teniendo en cuenta que cada la Tierra rota 15° cada hora:

$$\text{Horas de luz solar} = \frac{2\omega_{\text{anochecer}}}{15} \quad (3.17)$$

Este espacio de tiempo será el que se estudie en cada día de análisis.

3.5.4.- Posicionamiento aparente del Sol

Es necesario determinar la posición aparente del Sol desde el punto de vista de la torre con el receptor en cada instante en el que se calcule el rendimiento óptico. La posición solar se utilizará para orientar los heliostatos correctamente y comprobar en qué grado esta orientación genera bloqueos y/o sombreados al resto.

La posición aparente del Sol puede determinarse para una latitud y momento concretos, pudiendo quedar definida mediante dos ángulos, la altitud (α) y azimut (A) en el sistema de coordenadas de la figura 3.10. Como se puede apreciar en dicha figura, la altitud solar α es el ángulo formado por una línea desde el centro del Sol (denominado "rayo central") hasta el origen de coordenadas, con el plano desde donde se observa. Por el contrario, el azimut solar A es el ángulo medido desde el Norte hasta la proyección del rayo central sobre la superficie en el sentido de las agujas del reloj. Nótese además que se superpone el sistema de coordenadas angular de la posición aparente del Sol con el definido para la central.

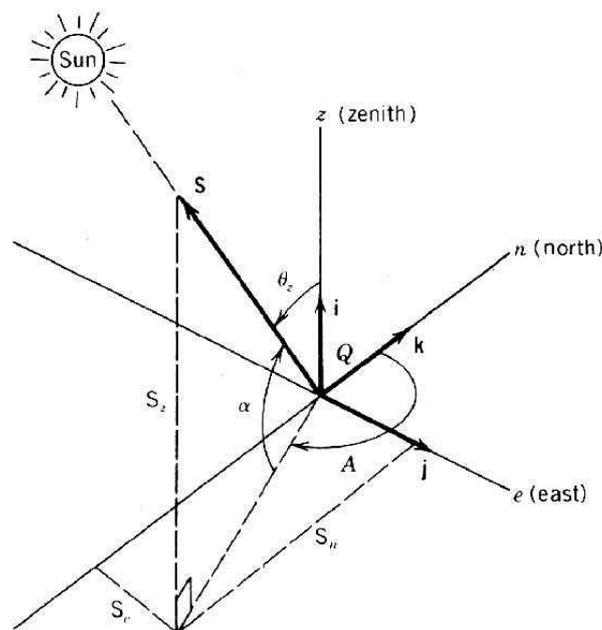


Figura 3.10.- Sistema de coordenadas para el posicionamiento aparente del Sol [STI01].

La altitud solar α se puede aproximar mediante la siguiente expresión [STI01]:

$$\alpha = \text{asen}(\text{sen } \delta \text{ sen } \Phi + \text{cos } \delta \text{ cos } \omega \text{ cos } \Phi) \text{ (}^\circ\text{)} \quad (3.18)$$

El azimut solar A se puede aproximar mediante la siguiente expresión [STI01]:

$$A = \text{acos}\left(\frac{\text{sen } \delta \text{ cos } \Phi - \text{cos } \delta \text{ cos } \omega \text{ sen } \Phi}{\text{cos } \alpha}\right) \text{ (}^\circ\text{)} \quad (3.19)$$

$$\text{Si } \text{sen } \omega > 0 \rightarrow A = 360^\circ - A$$

$$\text{Si no } \rightarrow A = A$$

El vector S que se muestra en la figura 3.10, dirigido hacia el Sol desde la ubicación de la central, tiene las siguientes componentes en z, n y e [STI01]:

$$\begin{aligned} S_z &= \text{sen } \alpha \\ S_e &= \text{cos } \alpha \text{ sen } A \\ S_n &= \text{cos } \alpha \text{ cos } A \end{aligned} \quad (3.20)$$

La posición aparente del Sol habrá de ser calculada en cada instante en el que se estudie el comportamiento del campo solar dado que, mientras que su trayectoria depende del día del año y la latitud desde donde se observa, el punto concreto sobre la trayectoria varía según el instante del día (véase la figura 3.11).

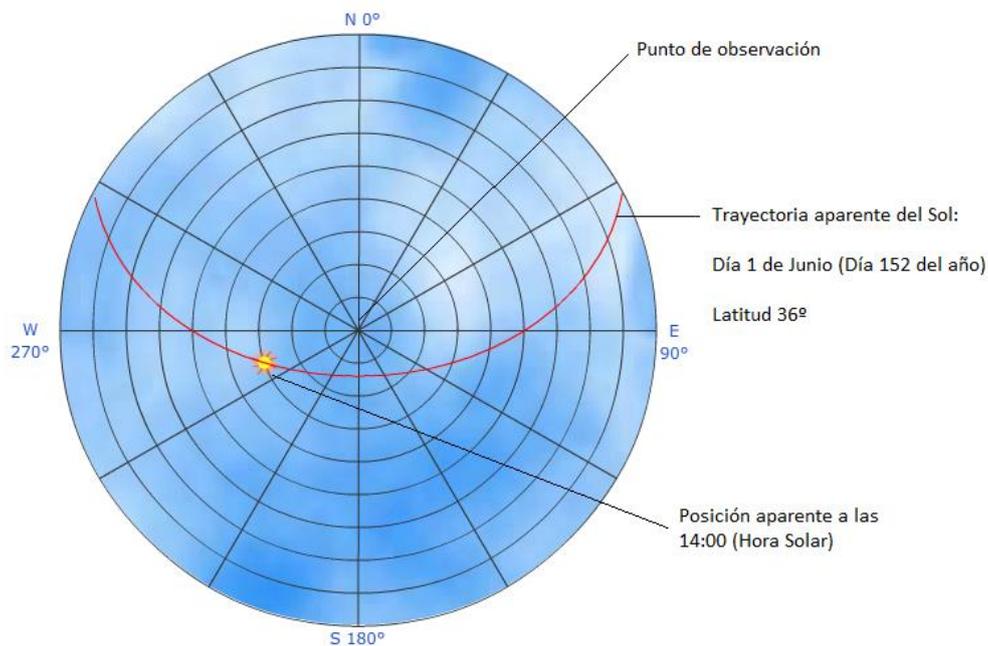


Figura 3.11.- Posición aparente del Sol en ubicación y momento concretos (adaptado de [HON]).

3.5.5.- Densidad de radiación directa instantánea

La densidad de radiación sobre la superficie solar es de $6.33 \times 10^7 \text{ W/m}^2$ aproximadamente. Sin embargo, la dispersión de esta radiación sobre el espacio hace que la densidad de radiación que llega realmente a la atmósfera terrestre sea muy inferior, aproximadamente de 1367 W/m^2 (tomando la unidad astronómica como distancia entre el Sol y la Tierra). Este valor se puede considerar constante a lo largo del año aunque, obviamente variará con la distancia real entre el Sol y la Tierra a lo largo del año, dada su trayectoria elíptica [STI01].

Sin embargo, la radiación solar que finalmente incide en la superficie terrestre es considerablemente inferior por los siguientes motivos [HON]:

- Efectos atmosféricos como la absorción y la dispersión
- Variaciones atmosféricas locales como la concentración de nubosidad y contaminación
- Latitud de la ubicación de incidencia
- Estación del año y momento del día

Estos factores afectan tanto a la energía que finalmente se recibe como en el espectro de las ondas que llegan a la superficie terrestre. Como se puede apreciar, obviando la componente química de la composición y estado de la atmósfera, influye directamente el ángulo de incidencia sobre la superficie.

La densidad de radiación directa incidente sobre la superficie de la tierra es, aproximadamente de 900 W/m^2 .

Se hace una exposición detallada sobre la radiación solar y las condiciones en las que llega a la atmósfera y a la superficie terrestre en el capítulo 2 de [STI01]. Este tema también se trata con profundidad en [HON].

La densidad de radiación incidente se puede estimar a partir del concepto de “Masa Aérea” (“Air Mass” AM). La AM se puede definir como la longitud del camino que recorre la luz a través de la atmósfera normalizada con el camino más corto posible. Cuando el Sol está justo sobre la posición estudiada: 1.00 unidades de AM. La AM cuantifica la atenuación de la radiación conforme recorre la atmósfera [HON]. Esta medida puede calcularse en base a la siguiente expresión [HON]:

$$AM = \frac{1}{\cos \theta_z + 0.50572(96.07995 - \theta_z)^{-1.6364}} \quad (3.21)$$

Donde θ_z es el zenit solar (véase la figura 3.10), que se puede obtener de la altitud solar de forma sencilla:

$$\theta_z = 90^\circ - \alpha \quad (3.22)$$

En base a la AM se puede aproximar la densidad de radiación directa incidente mediante la siguiente expresión empírica [HON]:

$$I_D = 1.353 \cdot [(1 - 0,14h)0,7^{(AM^{0.678})} + 0,14h] (W/m^2) \quad (3.23)$$

3.5.6.- Formulación del modelo

La eficiencia o rendimiento óptico instantáneo η se calcula como el producto de los distintos factores de eficiencia del campo solar, ya mencionados en el capítulo 2.

En el modelo de rendimiento desarrollado se ha optado por considerar los siguientes factores instantáneos (considerando el resto como de máxima eficiencia):

$$\eta = \eta_{cos} \cdot \eta_{bloqSom} \cdot \eta_{aa} \cdot \sigma_{ref} \quad (3.24)$$

Donde η_{cos} es igual al factor coseno, $\eta_{bloqSom}$ es igual al factor de bloqueo y sombreado, η_{aa} es el factor de atenuación atmosférica y σ_{ref} es igual a la constante de reflectividad común de los helióstatos. Todos estos factores, adimensionales, se enmarcan dentro del rango real [0, 1] a priori, donde 0 se asocia con un rendimiento nulo y 1 con el rendimiento máximo posible (aunque se puntualizará posteriormente el rango del factor de atenuación atmosférica).

El rendimiento óptico en promedio anual se obtiene de la siguiente expresión [NOO12]:

$$\eta_{año} = \frac{\sum_{day=1}^{365} \int_{sunrise}^{sunset} \eta(t) dt}{\sum_{day=1}^{365} \int_{sunrise}^{sunset} dt} \quad (3.25)$$

Como se puede apreciar, el rendimiento óptico promedio anual se calcula simplemente sumando el factor de rendimiento instantáneo a lo largo del año y dividiéndolo por el número de muestras tomadas.

Sobre la expresión 3.25 se puede además incluir una ponderación con la densidad de radiación propia de cada instante de medición a lo largo del año [NOO12]:

$$\eta_{año, I_D} = \frac{\sum_{day=1}^{365} \int_{sunrise}^{sunset} I_D(t) \eta(t) dt}{\sum_{day=1}^{365} \int_{sunrise}^{sunset} I_D(t) dt} \quad (3.26)$$

Nótese finalmente que, al tratarse de un conjunto de helióstatos, cuando se habla del factor de rendimiento del campo, éste se calcula como el promedio de la situación en cada

instante. Incluyendo este detalle explícitamente, la expresión 3.25 quedaría de la siguiente forma:

$$\eta_{\text{año}} = \frac{\sum_{day=1}^{365} \int_{sunrise}^{sunset} \sum_{i=1}^n \eta_i(t) dt}{n \sum_{day=1}^{365} \int_{sunrise}^{sunset} dt} \quad (3.27)$$

Donde η_i hace referencia al factor de rendimiento instantáneo del heliostato i y n al número total de heliostatos de la central. Del mismo modo podría introducirse esta puntualización sobre la expresión 3.26.

3.5.7.- Factor coseno

El factor coseno η_{cos} de un cierto heliostato en un instante de tiempo, como se trató en la revisión bibliográfica (sección 2.1.5.2), es una medida porcentual de la superficie útil que puede reflejar radiación incidente hacia el receptor según su orientación (véase la figura 3.12).

Asumiendo un sistema de orientación ideal capaz de orientar el heliostato de la mejor forma posible, de modo que la normal de su superficie reflectante es la bisectriz de ángulo formado por la dirección de la radiación solar incidente y una línea hacia el receptor desde el centro del heliostato, este factor depende de la posición aparente del Sol en cada instante y de la posición del heliostato respecto a la torre del receptor. Concretamente, y como se anticipó en la sección 2.1.5.2, el factor coseno de un cierto heliostato es igual al coseno del ángulo de incidencia de la radiación solar, θ_i , sobre su superficie (véase la figura 3.12). Es necesario, por tanto, obtener el ángulo θ_i de dicho heliostato para calcular su factor coseno.

El ángulo θ_i de un heliostato i puede determinarse teniendo en cuenta que es el ángulo medio del que forman el rayo solar central S y el vector de reflexión R desde el centro del heliostato al receptor por definición, es decir de $2\theta_i$. Este ángulo se puede calcular mediante la siguiente expresión [STI01]:

$$\cos 2\theta_i = \frac{(z_0 - z_i) \text{sen } \alpha - e_i \cos \alpha \text{ sen } A - n_i \cos \alpha \cos A}{\sqrt{(z_0 - z_i)^2 + e_i^2 + n_i^2}} \quad (3.28)$$

Donde z_0 es la altura del receptor, α la altitud solar instantánea, A el azimut solar instantáneo y z_i , n_i y e_i las coordenadas del punto central del heliostato en zenit, norte y este respectivamente (véase la figura 3.13). A partir de este ángulo doble, el ángulo de incidencia (comprendido entre 0 y 90 °) puede calcularse de la siguiente forma:

$$\theta_i = \frac{\arccos 2\theta_i}{2} \quad (3.29)$$

Finalmente, el factor coseno del heliostato i , $\eta_{\cos,i}$, puede entonces calcularse como el coseno de su ángulo de incidencia θ_i obtenido en la expresión 3.29:

$$\eta_{\cos,i} = \cos \theta_i \quad (3.30)$$

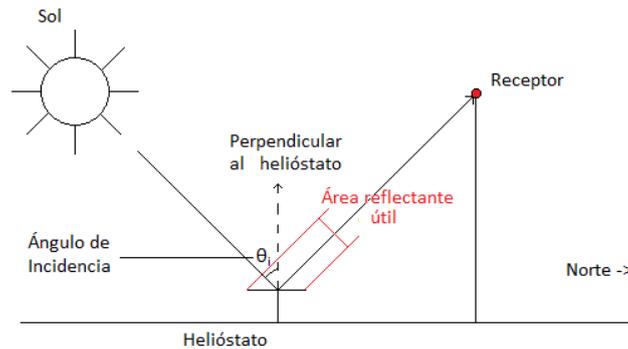


Figura 3.12.-Definición gráfica del factor coseno.

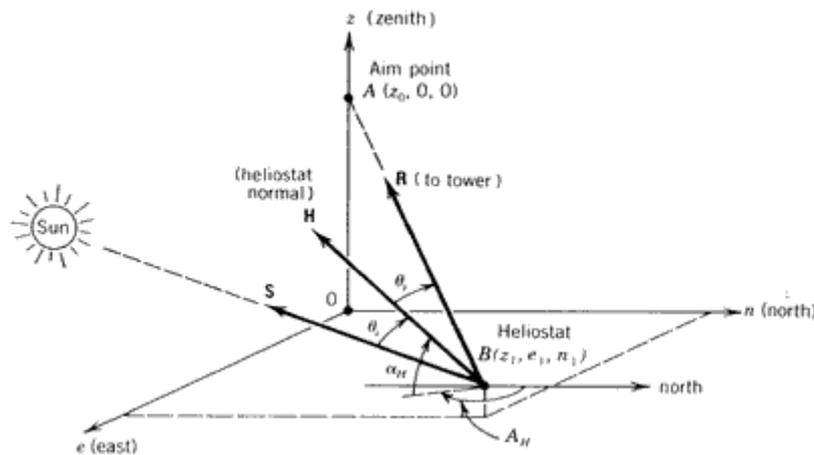


Figura 3.13.- Situación angular para el cálculo del factor coseno [STI01].

3.5.8.- Factor de atenuación atmosférica

El factor de atenuación atmosférica, como se expuso en el capítulo 2 (véase la sección 2.1.5.4), mide las pérdidas energéticas ocasionadas en el campo solar en el trayecto de cada heliostato hacia el receptor. Para este cálculo se ha escogido el modelo empleado en [EWE] y [NOO12], que asume una visibilidad de hasta 40 km entre heliostato y receptor en día claro (sin características especiales de nubosidad, contaminación... en la atmósfera). El cálculo del

factor de atenuación atmosférica de un cierto heliostato siguiendo este modelo se puede determinar según la siguiente expresión [EWE]:

$$\eta_{aa,i} = \begin{cases} 0.99321 - 0.0001176d_{rec,i} + 1.97 \cdot 10^{-8}d_{rec}^2 & \text{si } d_{rec,i} \leq 1000m \\ \exp(-0.0001106d_{rec,i}) & \text{si } d_{rec,i} > 1000m \end{cases} \quad (3.31)$$

Donde $d_{rec,i}$ es la distancia del heliostato i al receptor.

En [STI01] por ejemplo se aplica un modelo para este cálculo que distingue entre días claros y nubosos, en [NOO12] se referencian además otros modelos para este cálculo que tienen en cuenta otros factores (niveles de contaminación, situación climática...) en lugar de únicamente la distancia. Sin embargo, en el propio artículo de [NOO12] se anticipa que un cálculo más complejo y realista de este factor supone un aumento prácticamente despreciable en condiciones normales.

Nótese que este factor, tal y como se calcula, es constante para una cierta disposición del campo al depender sólo de la distancia al receptor. Por lo tanto, no es necesario recalcarlo en cada instante. Es interesante observar también que por la propia expresión 3.31 no se ajusta completamente al rango $[0, 1]$, sino al rango $(0, 0.9)$ aproximadamente.

3.5.9.- Factor de reflectividad

El factor de reflectividad de los heliostatos, como se vio en la sección 2.1.5.3, es una medida de su capacidad de redirección de la radiación incidente hacia el receptor. A grandes rasgos, este factor depende de las propiedades físicas del material con el que se elabora la superficie reflectante de cada heliostato así como de su estado de limpieza y mantenimiento.

Este factor, como ya se ha anticipado, se asume constante e igual en todos los heliostatos de la central, en un cierto valor del rango real $[0, 1]$, incluyéndose consiguientemente como un parámetro.

3.5.10.- Orientación de los heliostatos

Se ha hecho referencia en numerosas ocasiones a la orientación de los heliostatos, su importancia de cara a captar y redirigir la radiación correctamente hacia el receptor. Este aspecto tan característico de los heliostatos supone una compleja tarea de control que en este modelo se supone ideal, sin ningún tipo de retardo ni error de enfoque. De hecho, para

el cálculo del factor coseno (expresión 3.30) no hace falta obtener explícitamente la orientación de las superficies reflectantes. Sin embargo, sí es importante determinar cómo están orientados los helióstatos con el fin de calcular los factores de bloqueo y sombreado.

Los helióstatos con los que se trabaja, orientables en Azimut-Elevación, tienen en cada instante un cierto ángulo de elevación y azimut en su superficie reflectante (véase la figura 3.2).

La orientación de los helióstatos, descrita de forma detallada en [STI01], requiere calcular el vector de reflexión R , dirigido desde el helióstato al receptor, que se puede determinar en base a la posición del helióstato respecto al receptor. Este vector, en las condiciones ideales definidas, está siempre correctamente dirigido y puede obtenerse mediante esta expresión en sus tres componentes en el contexto de la figura 3.13 [STI01]:

$$R = \frac{(z_0 - z_1)i - e_1j - n_1k}{\sqrt{(z_0 - z_1)^2 + e_1^2 + n_1^2}} \quad (3.32)$$

Donde i, j y k son vectores unitarios en las direcciones z, e y n respectivamente. La variable z_0 es la altura del receptor y z_1, n_1 y e_1 son las coordenadas del punto central del helióstato. Nótese además que, tal y como se define R en la expresión 3.32, se trata de un vector unitario.

Conocido el vector R del helióstato se necesita calcular el ángulo de incidencia θ_i , que, como es de suponer, varía con la posición aparente del Sol. El cálculo de este ángulo ya se ha mostrado con las expresiones 3.28 y 3.29. No obstante, se puede calcular también a partir de la siguiente expresión que hace uso de las componentes del vector R obtenido y la posición aparente del Sol (de hecho, la 3.28 se deriva de ésta) [STI01]:

$$\cos 2\theta_i = R_z \sin \alpha + R_e \cos \alpha \sin A + R_n \cos \alpha \cos A \quad (3.33)$$

Desde la expresión 3.33 se obtendría el ángulo de incidencia θ_i mediante la expresión 3.29.

Es posible entonces determinar, para la situación solar, la elevación E_H que el helióstato debe tener través de la siguiente expresión [STI01]:

$$\sin E_H = \frac{R_z + \sin \alpha}{2 \cos \theta_i} \quad (3.34)$$

El azimut A_H requerido para la superficie reflectante es calculable finalmente teniendo en cuenta la posición solar, el ángulo de incidencia y la propia elevación ya calculada:

$$\sin A_H = \frac{R_e + \cos \alpha \sin A}{2 \cos \theta_i \cos E_H} \quad (3.35)$$

Estos dos ángulos, E_H y A_H , cumplen los siguientes requisitos [STI01]:

Ángulo	Situación 0°	Rango	Dirección positiva
Elevación del helióstato E_H	Horizontal (superficie reflectante hacia el cielo)	0 a 90 °	Ascendente
Azimut del helióstato A_H	Superficie reflectante hacia el norte	0 a 360 °	Sentido de las agujas del reloj

Tabla 2.1- Propiedades del movimiento de orientación de los helióstatos.

En la figura 3.15 se pueden ver cuatro ejemplos de orientación de un helióstato con sus ángulos. En la figura 3.14 se muestra un helióstato de frente (visto desde el norte: azimut 0° y elevación 90°) con los sentidos de movimiento positivos indicados mediante flechas.

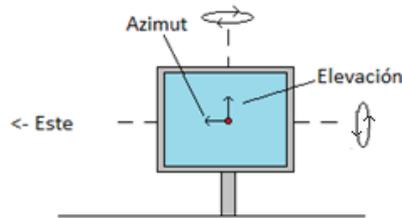


Figura 3.14.- Vista frontal de un helióstato desde el Norte.

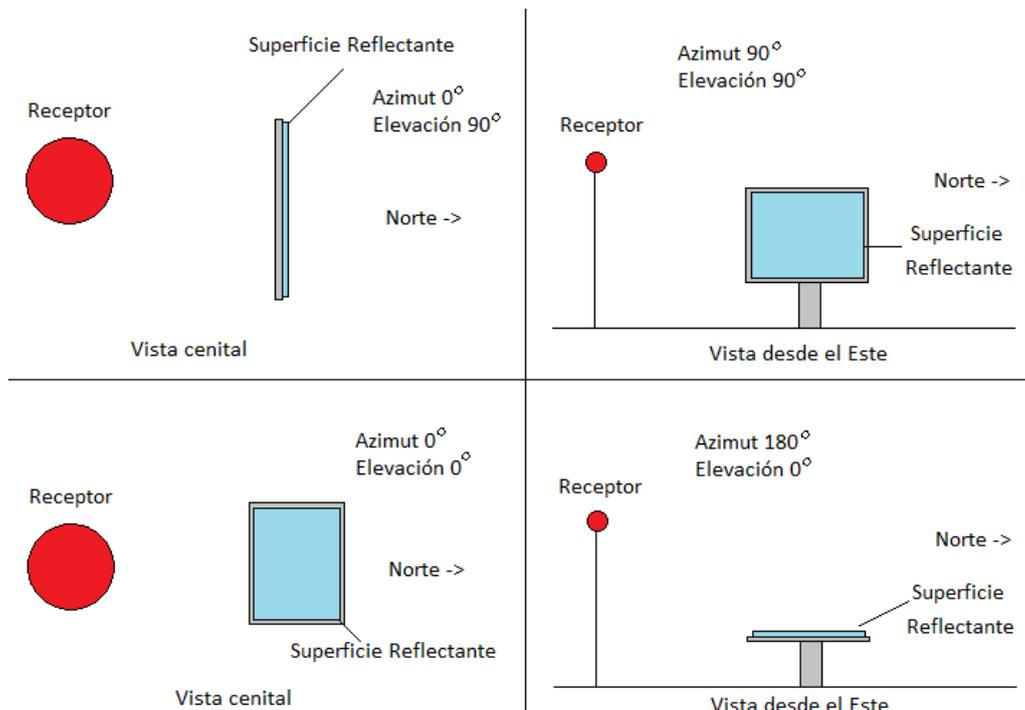


Figura 3.15.- Ejemplos de orientación de un helióstato.

3.5.11.- Factor de bloqueo y sombreado

3.5.11.1- Introducción

El factor de bloqueo de un cierto heliostato es una medición del porcentaje de flujo que redirige y que no llega finalmente al receptor al verse interceptado por otro heliostato del campo. El factor de sombreado de un cierto heliostato es el mismo concepto con la diferencia principal de que, en lugar de analizar la radiación reflejada desde dicho heliostato hacia el receptor, se estudia si algún otro heliostato bloquea parte de la radiación incidente desde el Sol. Estos dos conceptos, tratados ya en la sección 2.1.5.5, se ilustran de forma esquemática en las figuras 3.16 y 3.17. El cálculo del bloqueo y el sombreado en un campo solar medianamente grande requiere un procesamiento intensivo y muy costoso de trazado de rayos (“raytracing”) desde cada heliostato al receptor y del Sol a cada heliostato respectivamente. Este coste, obviamente, repercute en cualquier proceso de optimización que requiera múltiples estudios del campo solar en distintas situaciones. De las múltiples herramientas que permiten su análisis se puede nombrar Tonatiuh, que ya se referenció en el capítulo anterior.

Un enfoque común es que las propias distribuciones de los heliostatos minimicen estos dos problemas, como ya se ha mencionado, con diseños como el de intercalación radial. De esta forma se permiten subprocesos de decisión en los que se obvia este factor (al tener una repercusión mínima en comparación al factor coseno) en casos en los que se generan campos mayores al número real de heliostatos a ubicar finalmente (cuando se emplean los modelos de ubicación para muestreos “seguros” de la superficie) como en [RAM12] y [NOO12] por ejemplo. Este enfoque permite agilizar considerablemente el proceso de optimización.

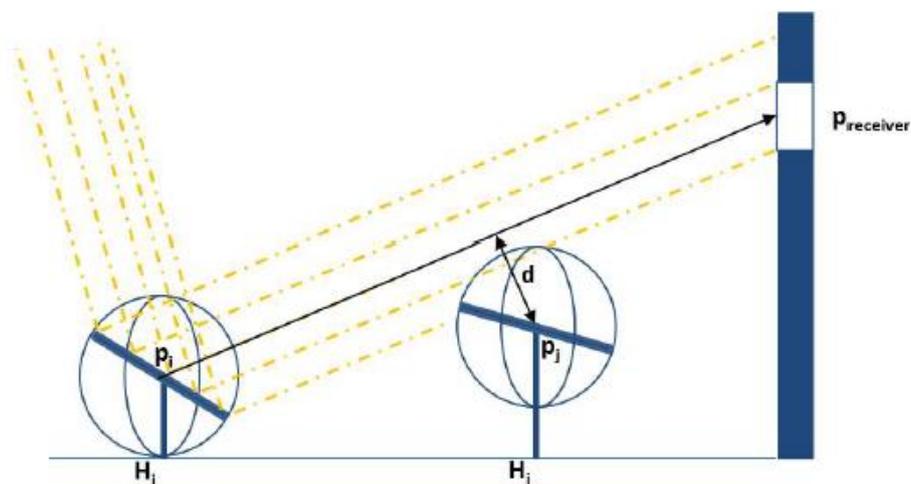


Figura 3.16.- Bloqueo parcial de H_j a H_i [EWE].

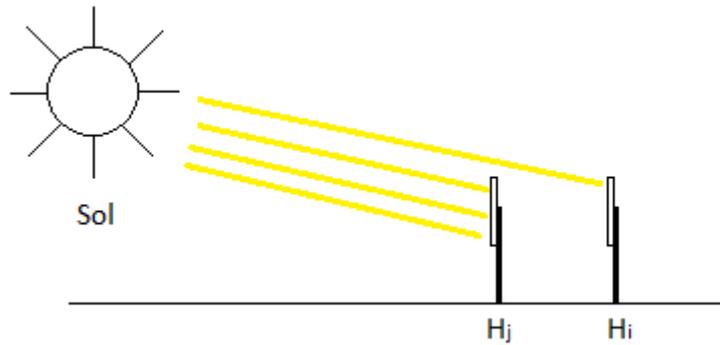


Figura 3.17.- Sombreado parcial de H_j a H_i .

En cualquier caso, un modelo de rendimiento del campo solar debe tener capacidad de estudiar también este factor cuando sea necesario, especialmente de cara a valoraciones generales desacopladas del diseño: es posible que una cierta distribución tenga un factor de bloqueo y sombreado mínimo, pero un modelo de rendimiento general no debería conocerlo a priori, sino simular y estudiar su comportamiento para llegar, si es verdaderamente el caso, a esa misma conclusión.

Un cálculo exacto del bloqueo y sombreado en el campo solar requeriría estudiar, para cada helióstato, el comportamiento de la radiación incidente y reflejada con el resto de los helióstatos de la planta, mediante el estudio del comportamiento de múltiples rayos de luz. Éste proceso tendría un coste computacional $O(n^2)$ para cada helióstato (siendo n el número total de helióstatos), teniendo además en cuenta la complejidad del estudio detallado del comportamiento de la radiación.

Para reducir el coste computacional el enfoque mayoritario es delimitar, según un cierto criterio, un rango de interés para cada helióstato. De esta forma sólo se estudian las relaciones de la radiación incidente y reflejada con un pequeño subconjunto de toda la planta que realmente podría interferir significativamente. En [EWE] por ejemplo se trata detalladamente el diseño y estudio de un árbol de candidatos a estudiar en este contexto. Es un tema que también se aborda en [NOO12] y [YAO09]. En [YAO09] por ejemplo se traza simplemente una circunferencia que determina la “zona de interés” de un cierto helióstato y se estudian únicamente los que están dentro de dicha circunferencia (véase la figura 3.18).

Se puede conseguir así reducir la complejidad algorítmica de este proceso de $O(n^2)$ a $O(nm)$ por helióstato [NOO12], siendo m el número de candidatos a estudiar de dicho helióstato según el criterio de selección escogido.

En lo referente a la simplificación del estudio del comportamiento de la radiación, se puede optar principalmente por discretizar la superficie reflectante de los helióstatos con un número reducido de muestras como se hace por ejemplo en [EWE] [NOO12] [YAO09].

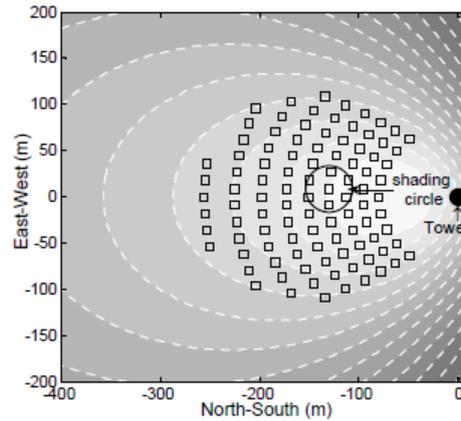


Figura 3.18.- Circunferencia de interés para el bloqueo y sombreado [YA009].

En este proyecto se toma como referente principal el cálculo del factor bloqueo y sombreado que se hace en [NOO12], respecto a la metodología de base, por su sencillez y efectividad aparente: Se trabaja con listas de candidatos de bloqueo/ sombreado y, además, los puntos de muestreo se proyectan directamente hacia receptor y Sol para la comprobación de si cortan a algún otro helióstato.

3.5.11.2- Muestreo del helióstato

Los helióstatos tienen superficies reflectantes orientadas según su posición y la del Sol en un cierto instante. Como superficies, se trata de un espacio continuo, por lo que la primera consideración a hacer es su muestreo en un número finito de puntos que estudiar. Este muestreo se hace mediante la construcción de un mallado de puntos sobre la superficie reflectante en torno al centro. De esta forma se da lugar a un sistema de coordenadas cartesianas bidimensional propio de dicha superficie en la que el centro del helióstato es el $(0,0)$ local y el (e_i, n_i, z_i) general (en el sistema de coordenadas de la torre) de forma constante y aunque la orientación varíe por la propia estructura de los helióstatos con la que se trabaja.

Nótese además que el número de muestras a generar se determina con un parámetro, la resolución de muestreo s . Esta resolución se aplica en las dimensiones X e Y del cuadrante superior derecho de forma que, por ejemplo, un helióstato de 2x2 metros con una resolución de 1 metro tendrá 9 muestras, como se ilustra en la figura 3.19.

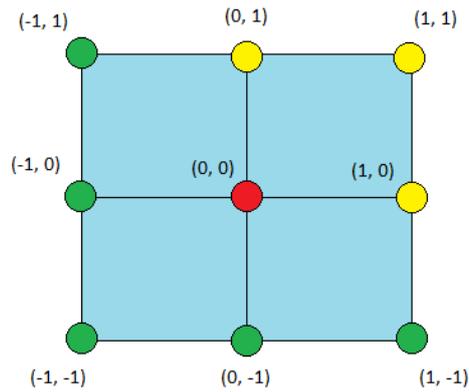


Figura 3.19.- Discretización de la superficie reflectante del helióstato 2x2 con $s=1$.

En concreto, se toma el ancho de la superficie reflectante (para la dimensión X), se divide entre 2 para obtener la longitud en X de dicho cuadrante, y se divide finalmente por la resolución s truncando el resultado. Este proceso se repite con el alto de la superficie reflectante para la dimensión Y. Así, en el ejemplo se obtiene que $(2/2/1) = 1$, es decir, una muestra en ambas dimensiones (además del cero). Este funcionamiento orientado a un único cuadrante permite recorrer sólo dicho cuadrante (en amarillo sobre la figura 3.19), incluyendo el $(0, 0)$ y obteniendo el resto de coordenadas mediante inversión en el momento de muestreo. De esta forma, a partir del $(1, 0)$ se genera el $(-1, 0)$, del $(0, 1)$ se obtiene el $(0, -1)$ y así sucesivamente.

3.5.11.3- Determinación de bloqueo y sombreado

En un cierto helióstato, en un instante determinado, para comprobar si la radiación que refleja consigue llegar al receptor (o es bloqueada), al igual que para ver si toda su superficie reflectante puede captar la radiación incidente del Sol (o es sombreada) y como se ha anticipado, se toma como base el sistema de [NOO12].

En concreto, en un cierto instante todos los helióstatos del campo solar tienen una orientación en elevación y azimut (E_H y A_H), conocida la mejor posible según su posición respecto al receptor y la posición aparente del Sol. En este contexto, los helióstatos se ven entonces como planos igualmente discretizados cuyos puntos de muestra se utilizan directamente como "focos emisores de luz". Es decir, en lugar de contemplar una simulación realista en la cual la radiación parta desde el Sol y se calcule su comportamiento global, se sigue el criterio de [NOO12]: cada punto de muestra se proyecta en la dirección que interesa según se esté calculando el factor de bloqueo o de sombreado. De esta forma, para un cierto helióstato i con x puntos de muestreo (véase la figura 3.19) se trazan dos rectas por cada punto x (véase la figura 3.20) y se comprueba que realmente tengan posibilidad de alcanzar

su objetivo. Se estudiará entonces la posición relativa entre las rectas correspondientes a rayos de luz con el resto de elementos del espacio, los planos definidos por los heliostatos, aplicando geometría básica.

La primera recta está dirigida hacia el receptor, donde se espera que la radiación reflejada llegue sin cortar con ningún otro plano (la definición general de la recta en el espacio se puede encontrar en el apéndice A (A.3)). Esta recta queda definida por dos puntos, el punto $(0, 0, z_0)$ que es el receptor puntual con el que se trabaja, y el punto de muestra del heliostato adaptado a las coordenadas globales (e, n, z) según la orientación de la superficie y la ubicación del punto central en el sistema de coordenadas de la torre (véase el apéndice A, sección 8).

La segunda recta se dirige desde la superficie del heliostato en la dirección de la posición aparente del Sol. Ésta queda entonces definida por el mismo punto del heliostato en coordenadas (e, n, z) y el vector director S hacia el Sol.

Se cuenta además, para cada heliostato, con dos listas [NOO12], una con las referencias de aquellos heliostatos que podrían bloquearlo y otras con las listas de aquellos que podrían sombreado. El criterio de inclusión en cada lista se tratará en la siguientes subsecciones, por lo que basta con saber que en un cierto instante, un heliostato tiene registrados los heliostatos principales que podrían interferir respecto a bloqueo y sombreado.

Con las rectas definidas, conociendo el número de muestras del heliostato, y los otros heliostatos que se deben considerar, se estudia entonces la posición relativa de la recta dirigida al receptor con los planos (véase el apéndice A sección A.4) definidos por los heliostatos en la lista de candidatos de bloqueo. Del mismo modo, se estudia la posición relativa de la recta hacia el Sol con los planos correspondientes a los candidatos de sombreado. Este estudio de posiciones relativas requerirá ver si cada recta corta al plano general estudiado para, en caso de que corte, verificar que dicho punto de corte corresponde realmente al rectángulo del heliostato (véase el apéndice A secciones A.5 y A.6).

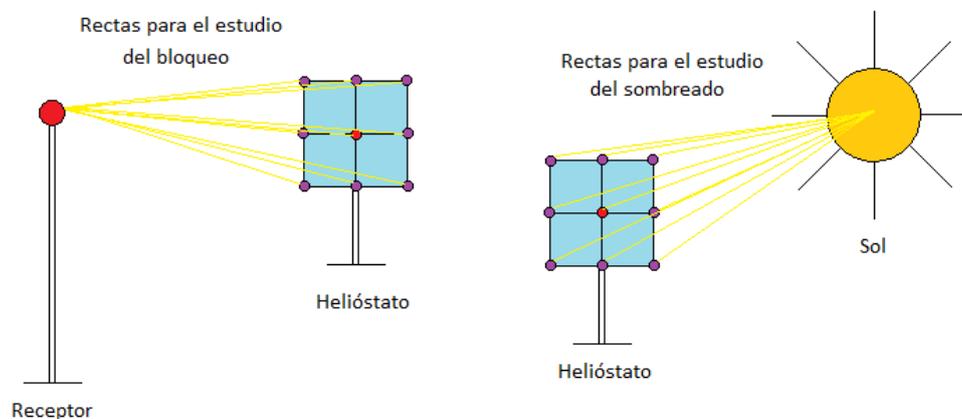


Figura 3.20.- Rectas para el estudio del bloqueo y sombreado.

Es interesante destacar que se probó inicialmente un enfoque alternativo que dependía de la posición solar y la orientación del heliostato del que se buscan sus candidatos de bloqueo en cada instante. En base a esta orientación, y al diámetro de la circunferencia característica del heliostato a estudiar i , se definía sobre la superficie un triángulo entre dichos vértices y el punto $(0, 0)$ (véase la figura 3.22). Se consideraban entonces como candidatos a bloquear al heliostato i a aquellos cuya circunferencia característica cortaba el triángulo formado. Sin embargo, este enfoque se descartó por ser más costoso e impreciso, aunque tendía a reducir la lista de candidatos a los más significativos de cada iteración.

Nótese también que, antes de proceder al estudio de distancias punto-segmento, se comprueba si la posición angular permite el bloqueo o, directamente es imposible por estar en cuadrantes opuestos y no trae cuenta estudiar las distancias.

Es importante finalmente recordar que la selección de un cierto heliostato como candidato para bloqueo (y sombreado) es un filtro a priori, siendo necesario el estudio de rectas y planos ya mencionado, en base a su orientación instantánea.

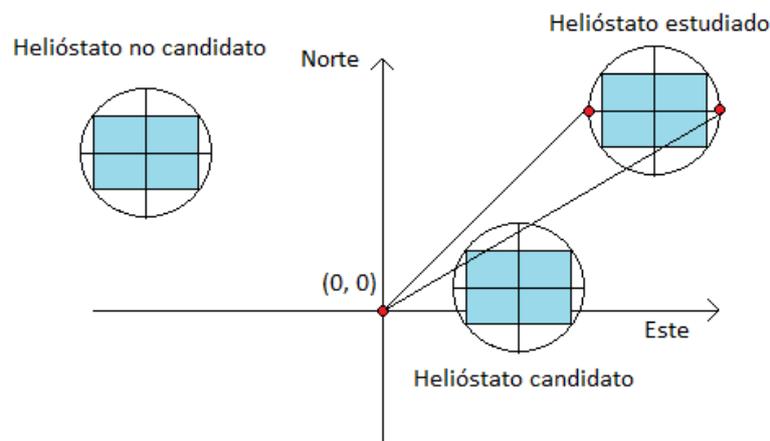


Figura 3.22.- Selección descartada de candidatos de bloqueo.

3.5.11.5- Candidatos de sombreado

La selección de los candidatos a considerar como “sombreadores potenciales” del heliostato i se hace prácticamente del mismo modo que para el bloqueo. Por consiguiente, se traza un segmento en la dirección del Sol (tomando como extremo un punto “en el infinito”), y se estudian las distancias pertinentes (pudiendo también hacer filtros a priori con los ángulos de la posición azimutal de “los candidatos a candidatos”).

Sin embargo, es importante destacar que el listado correspondiente al sombreado se limpia y se recalcula en cada instante de medición para el heliostato según la posición solar. Esto se debe a que el criterio de selección ya no depende de la posición de los heliostatos respecto al receptor, sino al Sol, que “se mueve” a lo largo del día.

3.5.12.- Muestreo del tiempo

3.3.12.1.- Introducción

El modelado de la central tiene en cuenta la actividad de la misma durante todo el año, por lo que, en esencia, se necesita descomponer todo un año en “momentos de muestreo”.

Dado que el tiempo es una magnitud continua, ha de discretizarse para poder llevar a cabo un análisis. Además, como el número de muestreos repercute directamente en el tiempo de simulación se va a intentar “recorrer el tiempo” con el menor número de muestras posibles intentando no renunciar a la credibilidad del resultado. En este contexto se aplica la idea indicada en [NOO12], que consiste en muestrear el tiempo de forma irregular. En concreto, en lugar de iterar con un avance constante en el tiempo como se puede pensar a priori, se busca recoger más muestras en los instantes más significativos de la central simulada, cuando la posición del Sol es determinante, reduciendo así el número de muestras cuando la situación es menos relevante.

Supóngase que se toma directamente como “día” el intervalo de luz solar, el nivel de relevancia de muestras podría tener un interés como se ilustra en la figura 3.23. Como se puede apreciar en dicha figura, los instantes próximos al mediodía (incluido), son los más relevantes, ya que es cuando el azimut solar cambia más rápido respecto al tiempo [NOO12]. Sin embargo, no se concreta en [NOO12] cómo se realiza el muestreo ni la valoración real de los instantes del día, por lo que se han ideado dos enfoques distintos de los que se hablará a continuación.

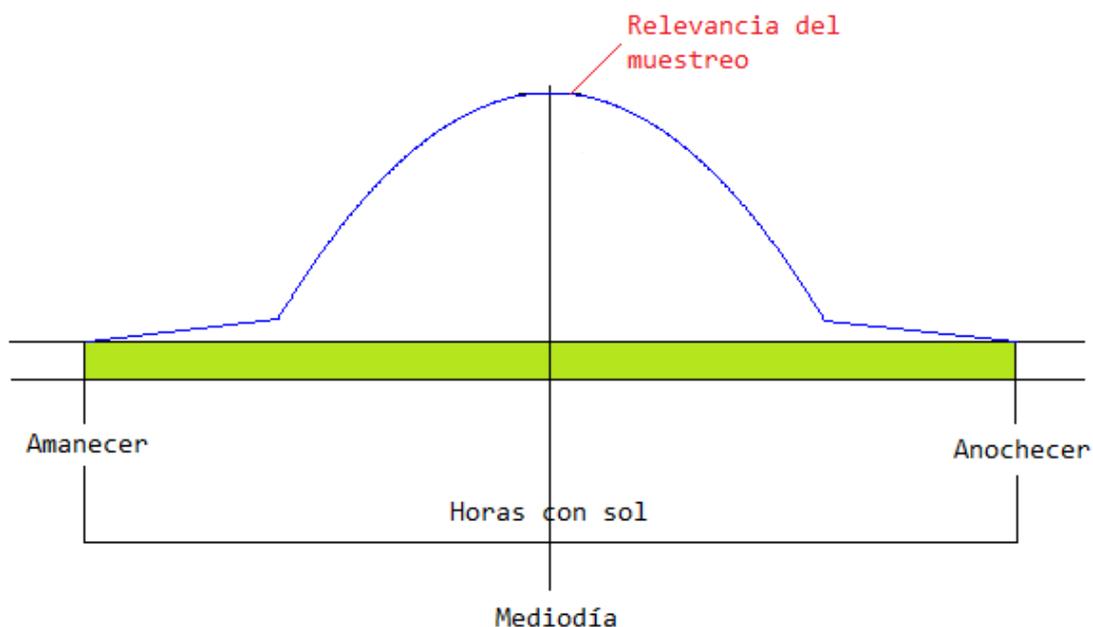


Figura 3.23.- Ejemplo de valoración de las horas de muestreo.

Asumiendo el nivel de relevancia como una parábola definida entre el amanecer y el anochecer, el “tamaño del incremento” o avance en el tiempo tiene una forma también parabólica, aunque inversa al interés: Cuanto menor es el incremento en el tiempo, más muestras se toman en un mismo espacio de tiempo. En la figura 3.24 se muestran simultáneamente ambas magnitudes suponiendo un comportamiento parabólico.

Se proponen entonces dos enfoques para “avanzar en el tiempo” dando más “importancia” (tomando más muestras/ avanzando más lentamente) en las zonas considerables como de mayor interés. En el primero de ellos, los incrementos de tiempo siguen directamente una función parabólica mientras que el segundo propone una función definida a trozos.

En ambos casos, el incremento se obtiene de una función *Incremento*, en grados/radianes que se suma al instante T para pasar al instante $T+1$:

$$T_i = T_{i-1} + \text{Incremento}(\omega) \quad (3.37)$$

Donde T es el instante a avanzar, que se obtiene de forma recursiva con la suma del *Incremento*, que depende del instante (hora angular), ω .

Nótese que la aplicación de la expresión 3.37 de forma que la función *Incremento*(ω) sea un valor constante para cualquier hora angular llevará directamente a realizar un muestreo del tiempo en intervalos constantes o “muestreo constante”. Este enfoque, a pesar de pretender aplicar el principio de “muestreo selectivo” que se propone en [NOO12], se ha tenido también en cuenta como opción en el desarrollo del modelo.

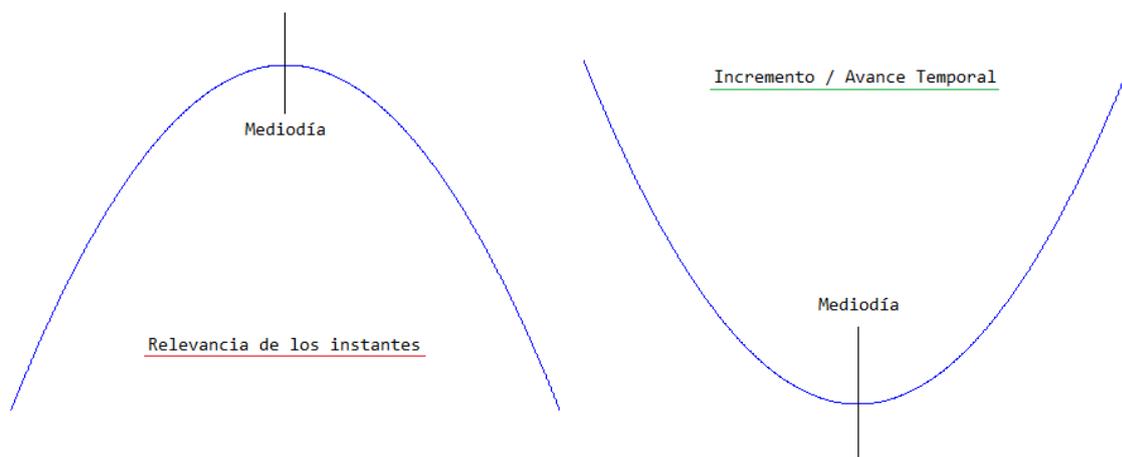


Figura 3.24.- Relevancia de los instantes e incrementos en el tiempo.

3.5.12.2.- Función de incremento parabólico

Sea I el incremento a añadir a la hora angular para avanzar. La función, de forma general, es la siguiente:

$$I = p^2 + m \quad (3.38)$$

Donde la variable m define el mínimo incremento de tiempo. La variable p da al incremento la forma parabólica buscada

La variable p debe ser un factor dependiente de la hora angular, pero con las adaptaciones necesarias para hacer que el espacio en el que se mueve la función sea el deseado.

Supóngase que se desea que la mínima variación sea de 1 minuto (una medida del rendimiento óptico cada minuto). Sabiendo que 1 hora supone una variación de 15° , el mínimo se determina con un simple factor de conversión:

$$1 \text{ minuto} * (15^\circ / 60 \text{ minutos}) = 1/4 = 0.25^\circ = m$$

Supóngase que se desea que la máxima variación sea de 30 minutos (una medida del rendimiento óptico cada media hora) para las zonas de bajo interés.

Para determinar p toma como referencia la hora angular ω , que va desde el amanecer al anochecer. Además, a fin de que el incremento obtenido tome un avance de 30 minutos como máximo, hay que multiplicar ω por un cierto factor. Dado que 30 minutos suponen una variación de la hora angular de 7.5° , para que el máximo de la función incremento tome ese valor hay que determinar el valor de p de la fórmula base: $p^2 + 0.25 = 7.5$; $p^2 = 7.25$; $p = 2.692582$

Como p debe ser 2.692582 en los instantes de más espaciado de muestras (incrementos más grandes), es decir, el amanecer y el anochecer, p se descompone en el siguiente valor:

$$p = (\omega \cdot 2.692582) / \omega_{amanecer}$$

Siendo ω el instante (hora angular) y $\omega_{amanecer}$ el momento del amanecer también en hora angular. De esta forma, en los instantes de mínimo interés, las muestras alcanzarán el máximo espaciado, 30 minutos (determinado por el factor 2.692582).

La función incremento queda así definida para un mínimo de un minuto y un máximo de 30:

$$I = \left(\frac{\omega \cdot 2.692582}{\omega_{amanecer}} \right)^2 + 0.25 \quad (3.39)$$

La forma del incremento parabólico es, aproximadamente, la siguiente:

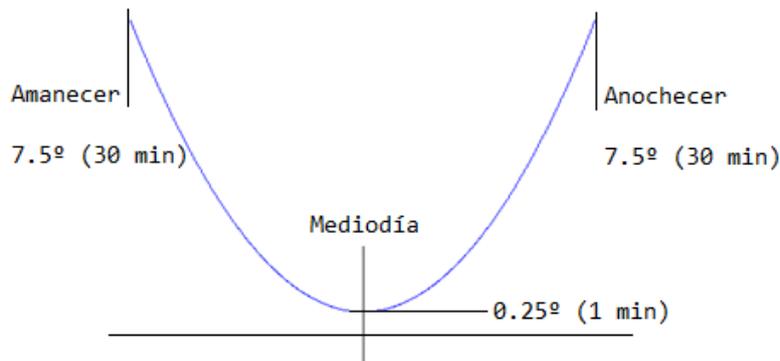


Figura 3.25.- Relevancia de los instantes e incrementos en el tiempo.

3.5.12.3.- Función de incremento estacionado

Partiendo de la evolución parabólica del interés de muestreo, esta función Incremento es simplemente una función definida a trozos. Cada uno de estos trozos especifica el incremento a aplicar entre instantes de tiempo según el momento del día (en la zona amanecer-anochecer) en la que se esté, con la siguiente forma (suponiendo 3 tipos de incremento):

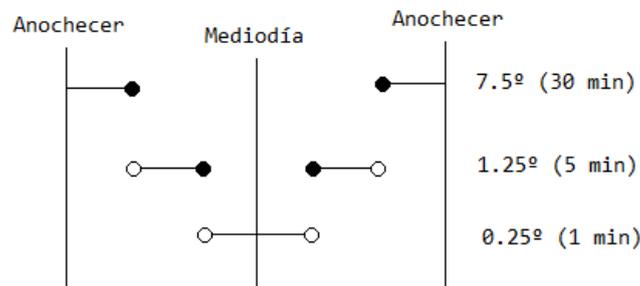


Figura 3.26.- Distribución de la función incremento (estacionado).

La distribución de franjas se hace tomando un cierto día como referencia con X horas de Sol (12 por ejemplo). Si bien es cierto que el número de horas de sol variará durante el año, se asume que el porcentaje de relevancia se mantendrá constante, por lo que simplemente se hace esta distribución (para muestreos de 3 tipos):

3/12 horas de máximo interés -> 25% -> (+0.25°)

5/12 horas de medio interés -> 41.67% -> (+1.25°)

4/12 horas de mínimo interés -> 33.33% -> (+7.5°)

Nótese que esta distribución de importancia se ha hecho de forma estimada y es susceptible a ajustarse con criterios formales o más contrastados así como de definir más intervalos.

3.5.13.- Ciclo de simulación

El cálculo del factor de rendimiento óptico del campo, conocidas las posiciones los distintos helióstatos sobre la superficie en torno al receptor, así como la información pertinente del campo solar según se ha descrito en secciones anteriores (latitud y altura de la torre, altura sobre el nivel del mar si se desea ponderar el cálculo con la intensidad, dimensiones de los helióstatos, tipo de muestreo...), se lleva a cabo básicamente de la siguiente forma:

Función CalcularRendimientoÓptico(ConjuntoHelióstatos conjunto, parámetros)-> real[0,1]:

Inicializar (variables y listas de candidatos)

rendimientoInstantaneo = 0 //Se van acumulando las mediciones del año

totalMuestrasAño = 0 //Se guarda el total para el promedio

ConstruirListaCandidatosBloqueo() //Este listado es fijo para cada helióstato

Para cada día en periodoTemporal(Año) **hacer:**

CalcularTramoDiario(día, latitud) //Obtener las horas de sol

instante = **CalcularAmanecerHoraAmanecer()** //Hora angular del amanecer

anochecer = amanecer * (-1)

Mientras instante < anochecer **hacer:** //Se sigue en las horas de sol

CalcularPosiciónSolarInstantánea()//Posición solar aparente

OrientarHelióstatos()//Orientar espejos con el Sol hacia el receptor

ConstruirListaCandidatosSombreado()//Depende del instante

//Medir densidad de radiación instantánea

Para cada helióstato *i* en conjunto **hacer:**

CalcularFactorCoseno(helióstato, posicionSolar)

CalcularBloqueoSombreado(helióstato, conjunto)

TomarAtenuaciónAtmosférica(helióstato)//Se calcula una vez
//porque depende solo de la distancia al
//receptor

rendimientoInstantaneo = rendimientoInstantaneo +
 $((\eta_{bloqSom,i}) * (\eta_{cos,i}) * (\eta_{aa,i}))$

//Medida acumulada en cada instante

Fin Para

//Incluyendo la densidad de radiación habría que multiplicar
//“rendimientoInstantaneo” con la densidad de ese instante antes de
//acumularla. Este producto se haría fuera del recorrido de los
//heliostatos pero antes de pasar al siguiente instante (al ser común la
//densidad para todos. Se registra la densidad medida también

totalMuestrasAño = totalMuestrasAño + 1

instante=**AplicarAvanceTemporalDiario**(instante)//Siguiente momento

Fin Para

Fin Mientras

factorRendimientoPromedio=(rendimientoInstantaneo* η_{ref})/totalMuestrasDelAño

// η_{ref} se asume: Constante & común

//En la opción ponderada se divide por la insolación acumulada en lugar de por
// totalMuestrasDelAño (véase la expresión 3.27 y su contexto)

Devolver factorRendimientoPromedio

Fin Función

Algoritmo 3.1.- Cálculo del rendimiento óptico del campo solar.

Como se puede apreciar, se trata simplemente de la implementación de las funciones del modelo (expresión 3.27).

Nótese finalmente que la inclusión de la densidad de radiación para ponderar el rendimiento óptico supondría simplemente multiplicar al final de cada instante por dicha densidad de radiación se indica comentada en rojo sobre el propio algoritmo 3.1.

3.5.14.- Paralelización del ciclo de simulación

El proceso que se describe en el algoritmo 3.1, que permite obtener una valoración del rendimiento óptico de un cierto campo solar, es muy costoso en términos de tiempo de cómputo. La carga recae, superando sensiblemente el 90% según las pruebas realizadas, en el proceso de orientación de los helióstatos con el Sol y en el estudio del factor de bloqueo y sombreado. Sin embargo, tanto esos procesos como el cálculo del factor coseno y el factor de atenuación atmosférica, son tareas desacopladas y fácilmente paralelizables, dado que son referentes a cada helióstato. En el “peor de los casos” (para el estudio del bloqueo y sombreado) hay simplemente necesidad de “observación” (sólo lectura) del estado de otros helióstatos. Por consiguiente, los cálculos internos asociados a la simulación y evaluación del rendimiento son susceptibles de realizarse en paralelo y lograr así una aceleración del proceso general.

Durante el proceso de optimización será necesario evaluar en numerosas ocasiones el rendimiento óptico de campos solares en distintas configuraciones, por lo que resulta de utilidad tratar de agilizar el proceso. En este contexto, y teniendo en cuenta que se ha trabajado en un entorno MIMD de memoria compartida UMA, se ha empleado la API OpenMP para explotar el paralelismo de los procesos mencionados, la orientación y el cálculo del factor de bloqueo y sombreado.

OpenMP es una interfaz de programación de aplicaciones o “API”, por sus siglas en inglés, que permite desarrollar programas paralelos en arquitecturas de memoria compartida mediante C, C++ y Fortran. Se forma por un conjunto de directivas del compilador, funciones y variables de entorno para definir la ejecución concurrente. Se trata de una herramienta multiplataforma y sencilla de usar que permite indicar los puntos de ejecución paralelos, así como los puntos de sincronización, mediante simples directivas destinadas al compilador [RED08] aplicadas generalmente a las estructuras iterativas. Estas cualidades se ajustan perfectamente al marco en el que se realiza la paralelización: No estaba inicialmente prevista, sino que se plantea en una etapa avanzada del proyecto para realizar experimentos y mediciones más rápidamente. OpenMP ha permitido incluir secciones de ejecución paralela con un esfuerzo mínimo, sin alterar estructuralmente la base, y de forma satisfactoria.

Concretando los elementos paralelizados con OpenMP sobre el algoritmo 3.1, se trata de las regiones correspondientes a las siguientes funciones:

- **“ConstruirListaCandidatosBloqueo()”**: El listado de candidatos de bloqueo, constante durante todo el proceso, se construye en paralelo muy fácilmente al requerir simplemente la lectura de posiciones de otros helióstatos y la escritura en una sección de la memoria propia de cada helióstato. No existe por tanto ninguna condición de carrera ni necesidad de sincronización.

- **“OrientarHelióstatos()”**: El proceso de orientación de helióstatos tiene las mismas facilidades de paralelización que la selección de los candidatos de bloqueo, al ser propia de cada helióstato y calculable según la posición aparente del Sol y la situación de dicho helióstato en base al receptor. De esta forma, se puede indicar sin problemas al compilador que la estructura iterativa “for” en la que se realiza la orientación se distribuya entre tantos hilos como unidades de proceso estén disponibles.
- **“ConstruirListaCandidatosSombreado()”**: El listado de candidatos al sombreado proporciona las mismas facilidades de paralelización que las dos secciones ya mencionadas, por lo que se puede incluir sin ningún peligro en una sección paralela de OpenMP.
- **“Para cada helióstato i en conjunto hacer”**: Esta sección del cálculo es también paralelizable, siendo el factor coseno, el factor de atenuación atmosférica y el factor de bloqueo y sombreado exclusivamente propios de cada helióstato como se ha anticipado. Sin embargo, no basta con definir y solicitar una ejecución en paralelo ya que el acceso a la variable “rendimientoInstantaneo”, compartida y resultado acumulativo de la situación instantánea de cada helióstato del campo solar, supone una condición de carrera. Por consiguiente, se debe velar por una escritura controlada y serializada a esta variable. En cualquier caso, este aspecto se logra también muy fácilmente, gracias a las propiedades de OpenMP, enmarcando la variable en una directiva de sección crítica.

Con esta simple declaración de secciones de ejecución paralela sobre el cuerpo del algoritmo 3.1 que permite OpenMP, y como se detallará en el capítulo siguiente, se logra una aceleración del 30% aproximadamente, en el entorno de pruebas, según los experimentos realizados. Además, es importante insistir de nuevo en el mínimo impacto estructural que tiene este proceso sobre la implementación del algoritmo 3.1.

3.6.- Algoritmos aplicados a la optimización del campo solar

3.6.1.- Introducción

Se han aplicado tres algoritmos al problema de optimizar el diseño del campo solar sobre las dos variantes definidas para el problema, la optimización de las variables de un modelo de ubicación derivado de [RAM12] y la selección de un conjunto de posiciones disponibles

densamente distribuidas, buscando en ambos casos maximizar el rendimiento óptico del campo solar.

A nivel general, los algoritmos aplicados al problema en ambos casos, y con las importantes adaptaciones pertinentes de cada enfoque, son los siguientes:

- Búsqueda aleatoria pura (heurístico estocástico).
- Algoritmo de carácter voraz (heurístico determinista).
- Algoritmo evolutivo UEGO (heurístico estocástico).

De los dos primeros esquemas algorítmicos se habló en detalle en las secciones 2.3.4 y 2.3.5 respectivamente, por lo que sólo se destacarán los detalles más relevantes de su aplicación a este problema. En contraposición, el algoritmo UEGO aún no se ha tratado específicamente a pesar de que se ha nombrado anteriormente. Por tanto, de este optimizador, especialmente importante para el proyecto, sí se hará una explicación detallada. Se expondrá también su variante GASUB para problemas de localización discreta dado que es el optimizador que se usa en la segunda vertiente del problema tratado.

Se mostrará además, en la línea de la segunda variante, el sistema con el que se ha muestreado la superficie de la central con la pretensión de generar una superficie discreta aproximable por la superficie completa de dicha.

En la figura 3.27 se da una visión de conjunto de la aplicación de los tres métodos de optimización nombrados al problema planteado.

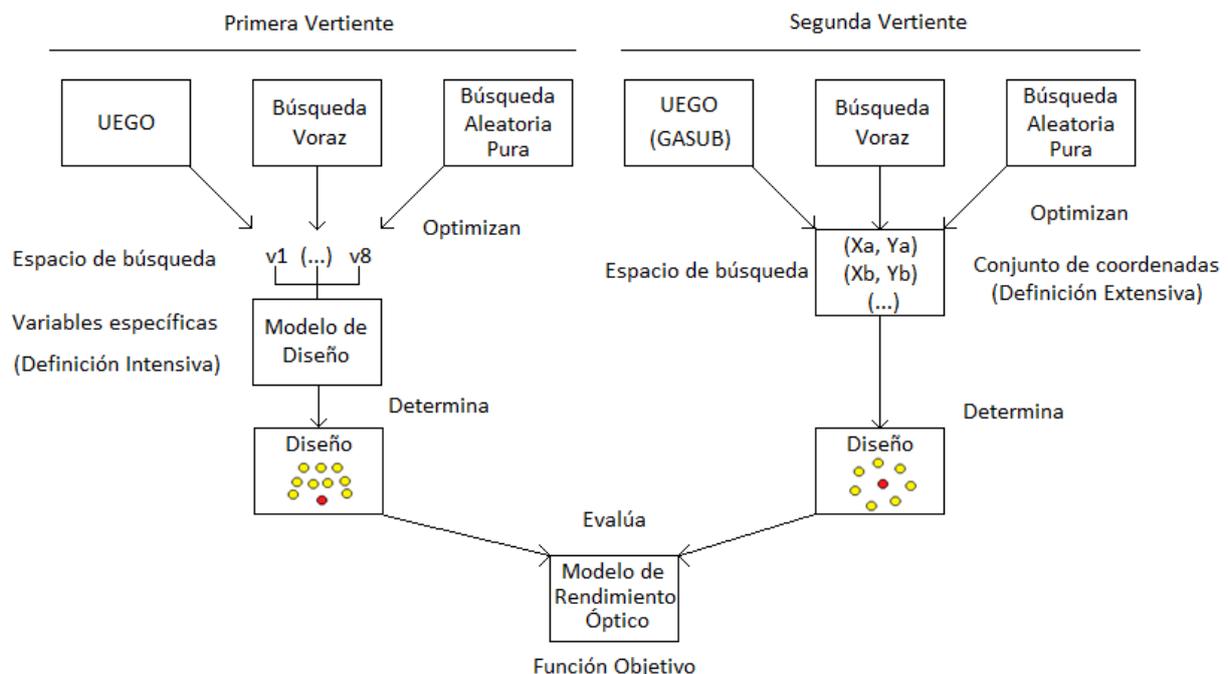


Figura 3.27.- Diagrama global del proyecto.

3.6.2.- Búsqueda aleatoria pura

Este esquema algoritmo es el método de búsqueda estocástica “por excelencia”, ya que la aleatoriedad rige toda la búsqueda (véase la sección 2.3.4 para más información de este enfoque). Recordando algunos de sus rasgos más especiales, su característica más positiva es la capacidad intrínseca para mantener el ámbito global de la búsqueda, ya que puede alcanzar cualquier punto del espacio de búsqueda en cada iteración. En contraposición, tiene un interés fundamentalmente teórico dado que no aplica ningún tipo de criterio real de búsqueda y el tiempo de convergencia no lo hace práctico para problemas reales.

Adaptando esta técnica al problema tratado se plantea el siguiente algoritmo, construido sobre el algoritmo 2.1 y teniendo en cuenta que el modelo de ubicación opera con 8 variables reales:

Función **O**CentralModeloBusquedaAleatoriaPura(entero: limiteIteraciones, Central: centralOptimizada, conjunto<Rango<R⁸>>: rangos): Punto<R⁸>

Punto<R⁸> : optimoEncontrado

real: valorReferente = $-\infty$

entero: contador = 0

Mientras contador < limite **hacer**:

Punto<R⁸>: nuevoCandidato = **GenerarPunto<R⁸>**(rangos)

centralOptimizada.**Rediseñar**(nuevoCandidato)

real: valorCandidato = **modeloRendimientoÓptico**(centralOptimizada)

Si (valorCandidato > valorReferente) **entonces**:

valorReferente = valorCandidato

optimoEncontrado = nuevoCandidato

Fin Si

contador = contador + 1

Fin Mientras

Devolver optimoEncontrado

Fin Función

Algoritmo 3.2.- Esquema de optimización de búsqueda aleatoria pura con modelo de ubicación.

Como se puede apreciar en el algoritmo 3.2, la estructura es prácticamente igual al esquema genérico con mínimas variaciones.

En primer lugar, se define el espacio de búsqueda como un conjunto en R^8 , una dimensión para cada variable del modelo de ubicación de helióstatos. En cada dimensión se cuenta además con que haya un rango mínimo y máximo en el que la función esté definida. El resultado devuelto por el procedimiento será un valor del espacio de búsqueda, es decir, con la siguiente estructura:

$$x^* = (x_1, \dots, x_8) / x_i \in [x_{ia}, x_{ib}] \quad (3.40)$$

Donde x^* representa el óptimo encontrado y es un valor en R^8 en el que el valor de cada dimensión i está dentro de un rango definido en el intervalo $[x_{ia}, x_{ib}]$ de R^i , siendo x_{ia} y x_{ib} los extremos inferior y superior de dicho rango. El espacio de búsqueda se formará entonces por soluciones candidatas con la misma estructura que se muestra en la expresión 3.40.

La generación de valores aleatorios, con la que se hace una exploración en anchura del espacio de búsqueda, se hace siguiendo una distribución uniforme de probabilidad en R^8 a cargo de la función "GenerarPunto< R^8 >". Nótese además que esta función recibe el rango admisible de cada dimensión, en donde se ha definido la función objetivo. La función objetivo es, como ya se ha anticipado, el modelo de rendimiento óptico, que opera directamente analizando el comportamiento de la central con el diseño correspondiente al nuevo candidato a óptimo. Este matiz se indica en la función "Rediseñar", que simplemente llevaría a cabo el reinicio de las posiciones del campo solar y su generación con los valores del nuevo punto estudiado.

3.6.3.- Algoritmo de carácter voraz

El algoritmo de carácter voraz aplicable a este problema no coincide exactamente con la definición genérica hecha en la sección 2.3.5, y a diferencia del que se aplicará posteriormente. Esto se debe a que el modelo de ubicación no puede funcionar sin la totalidad de sus parámetros, es decir, no se puede seguir exactamente la política de una heurística constructiva en la que se añade por etapas la mejor solución parcial hasta llegar a una solución completa. Se complementa por tanto con aspectos estructurales propios de una búsqueda local (según la clasificación seguida en el capítulo 2). En concreto, la necesidad de completitud en las soluciones candidatas (véase la expresión 3.40) se aborda asumiendo

la que “solución parcial” tendrá el mínimo valor de su rango de definición en aquellas dimensiones que aún no hayan sido exploradas.

Se hace entonces una búsqueda, dimensión tras dimensión (como NSPOC en [RAM12]), fijando en cada una de ellas el valor de su rango que mejor rendimiento óptico genera en la central. Este proceso se lleva a cabo secuencialmente, sin considerar el impacto de otras dimensiones ni replantear decisiones ya tomadas. El criterio heurístico de esta técnica es, consiguientemente, que el óptimo aislado que se encuentre en cada dimensión conformará el óptimo global del problema. A nivel algorítmico, el proceso descrito tendría la siguiente estructura en pseudocódigo:

Función OCentralModeloVoraz(Central: centralOptimizada, conjunto<Rango<R⁸>>: rangos): Punto<R⁸>:

Punto<R⁸> : optimoEncontrado = Punto<R⁸>(rango[1].Mínimo... rango[8].Mínimo)

Para cada dimensión d **en** R⁸ **hacer**:

d.**EstablecerEn**(rango[d])

real: medición

real: optimoDimensionD = rango[d].**Minimo**()

centralOptimizada.**Rediseñar**(optimoEncontrado)//Diseño “de inicio”

real: eficienciaMaxMedida = **ModeloRendimientoÓptico**(centralOptimizada)

Mientras dimensión[d].**SePuedeAvanzar**() **hacer**:

d.**Avanzar**()

optimoEncontrado.**EscribirDimensión**(d, d.**Valor**())

centralOptimizada.**Rediseñar**(optimoEncontrado)

medición = **ModeloRendimientoÓptico**(centralOptimizada)

Si medición > eficienciaMaxMedida **hacer**:

eficienciaMaxMedida = medición

optimoDimensionD = d.**Valor**()//Actualizar el mejor hallado

Fin Si

Fin Mientras

optimoEncontrado.**EscribirDimensión**(d, optimoDimensionD)

//Se deja finalmente el que mayor valor inmediato ha generado

Fin Para Cada

Fin Función

Algoritmo 3.3.- Esquema del algoritmo de optimización voraz por modelo de ubicación.

Del algoritmo 3.3 se puede destacar que no cuenta con una función de factibilidad porque la función objetivo (el modelo de rendimiento óptico) está definida en los rangos de cada dimensión. No hay ninguna función que detecte que se alcanza una solución porque, colocar un número dado de helióstatos según un conjunto de parámetros del modelo de ubicación ya es una solución válida implícitamente. La función de selección es también implícita, ya que, aunque no se nombra directamente, el proceso de recorrer el rango de cada dimensión real, y el estudio de su efecto mediante el estudio directo de la función objetivo para finalmente escoger el mejor encontrado cumple esta tarea. Nótese finalmente que se cuenta, en cada dimensión, con un avance mínimo con el que muestrearlas. Este valor de mínimo avance no tiene por qué ser común en todas las dimensiones.

3.6.4.- Búsqueda aleatoria pura de acceso directo

Este algoritmo se trata simplemente de un optimizador estocástico por búsqueda aleatoria pura del que ya se ha hablado con anterioridad en la sección 3.6.2. Sin embargo, los términos en los que se plantea, aunque se pretende optimizar la misma función objetivo, son sensiblemente distintos a los enfoques que operan sobre el modelo de ubicación descrito ya que corresponde a la segunda vertiente del problema definido. En este caso se trabaja la colocación de los helióstatos “directamente sobre la superficie”, por lo que se le ha añadido la denominación de “de acceso directo”. Con este enfoque se prescinde, por lo tanto, del modelo de ubicación con resultado vinculante discretizando la superficie para aprovechar el máximo posible de la superficie. De esta forma, se tiene una gran densidad de muestreo con el fin de que se pueda aproximar por la totalidad de la misma. En este contexto, la búsqueda se realiza escogiendo N posiciones aleatorias en cada iteración, de las muestreadas, siguiendo una distribución uniforme.

Con este enfoque, del mismo modo que la operación sobre el modelo de ubicación llevaba a un espacio de búsqueda de soluciones ligadas a las distintas variables de dicho modelo (véase la expresión 3.40), el espacio de búsqueda X se compone de soluciones candidatas con la siguiente estructura:

$$x = \{(x_1, y_1), \dots, (x_N, y_N)\} / (x_i, y_i) \in P \quad (3.41)$$

Donde x es un conjunto de N coordenadas, siendo N el número total de helióstatos a ubicar. El conjunto P es aquel formado por las posiciones posibles muestreadas sobre la superficie de la central.

En base a lo expuesto, el algoritmo de búsqueda aleatoria pura se puede adaptar a este enfoque como se muestra en el algoritmo 3.4.

Función OCentralDirectaBusquedaAleatoriaPura (Central: centralOptimizada, entero: limiteIteraciones): Conjunto<CoordenadasXY>:

Conjunto<CoordenadasXY> posicionesLibres = **MuestreoCentral**(centralOptimizada)

Conjunto<CoordenadasXY> óptimoEncontrado

real: valorReferente = $-\infty$

entero: contador = 0

Mientras contador < limite **hacer**:

Conjunto<CoordenadasXY> soluciónCandidata =
EscogerNPosiciones(posicionesLibres)

centralOptimizada.**Rediseñar**(soluciónCandidata)

real: valorCandidato = **modeloRendimientoÓptico**(centralOptimizada)

Si (valorCandidato > valorReferente) **entonces**:

valorReferente = valorCandidato

optimoEncontrado = soluciónCandidata

Fin Si

contador = contador + 1

Fin Mientras

Devolver óptimoEncontrado

Fin Función

Algoritmo 3.4.- Algoritmo de búsqueda aleatoria de ubicación directa.

En este con texto se ha de tener en cuenta la función “MuestreoCentral” que se muestra al comienzo del algoritmo 3.4. Esta función, como se deduce de su nombre, divide la superficie de la central en un conjunto de posiciones válidas. Se cuenta con que este proceso obtenga una serie de posiciones válidas y seleccionables en conjunto. En un sentido estricto no

tendría por qué corresponder realmente al algoritmo de búsqueda, pudiendo éste recibir directamente un conjunto de posiciones válidas pre-creadas. En cualquier caso, la función “MuestreoCentral” se ha incluido directamente en el algoritmo 3.4 para destacar que se pretende operar directamente sobre “toda” la superficie, realizando una discretización siempre lo más densa posible de la misma y asumiendo que la función de muestreo realiza adecuadamente esta labor.

El muestreo de la superficie de la central que se ha diseñado sigue un esquema de circunferencias concéntricas formadas a su vez por las circunferencias características de los helióstatos. Puede verse, por consiguiente, como un caso particular de un esquema de distribución radial. Este muestreo se hace indicando el radio a partir del cual se empiezan a generar posiciones, tomando como referencia la torre del receptor. Con esta indicación y conociendo las dimensiones de los helióstatos se van formando anillos de gran densidad hasta alcanzar un radio máximo indicado como parámetro como se puede apreciar en la representación aproximada de la figura 3.28.

Realizar la distribución de las posiciones con este enfoque se hace, en primer lugar, determinando el número de filas ubicables entre el radio mínimo y el máximo mediante la siguiente expresión:

$$NúmeroDeFilas = \text{truncar} \left(\frac{radMax - radMin}{d} \right) + 1 \quad (3.42)$$

Donde $radMax$ y $radMin$ son los límites establecidos para la distribución, d es el diámetro de la circunferencia característica de los helióstatos y la función *truncar* devuelve un valor entero sin considerar decimales.

El número de helióstatos (circunferencias características) que se pueden ubicar en cada fila se obtiene, a su vez, mediante la distribución de la longitud de la circunferencia de dicha fila entre la longitud que abarca cada helióstato sobre la misma:

$$PosicionesEnFila = \frac{2 * \pi * radFila}{d} \quad (3.43)$$

Donde $2 * \pi * radFila$ calcula la longitud de la fila como circunferencia de radio “ $radFila$ ” y d es, de nuevo, el diámetro de la circunferencia característica de los helióstatos.

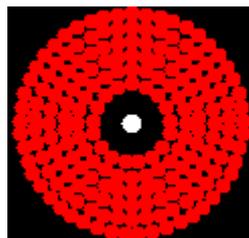


Figura 3.28.- Muestreo denso de la superficie de la central de forma radial.

El objetivo de este proceder es contar, de forma sencilla, con un conjunto de posiciones aproximable a la totalidad de la superficie disponible para poder asumir que la búsqueda se lleva a cabo en toda la superficie. No obstante, hay que tener en cuenta que se trata de una aproximación y que realmente no se está abordando la superficie general por el coste tan elevado que supondría. Según lo expuesto, el muestreo se hace también con un modelo de ubicación espacial con la particularidad de que no es configurable y busca siempre la máxima densidad. Por lo tanto, el diseño resultante sería definible de forma implícita mediante la numeración de las distintas posiciones, dado que se generan de forma determinista, indicando el número de posición de cada helióstato (N valores definirían la planta, siendo N el total de helióstatos). De esta forma, una formulación alternativa y válida del espacio de búsqueda como selección de un conjunto de posiciones tendría las siguientes secuencias como soluciones candidatas:

$$x = (x_0, \dots, x_P) / x_i \in \{0, 1\} \text{ y } \sum_{i=0}^P x_i = N \quad (3.44)$$

Donde P es igual al total de posiciones válidas muestreadas sobre la superficie de la central, cada elemento x_i denota la ubicación (1) o ausencia (0) de un helióstato en la i -ésima posición disponible, y la suma de helióstatos (o posiciones empleadas) debe ser igual al total de helióstatos a colocar N . El óptimo x^* será por lo tanto el elemento de X que mejor rendimiento óptico logre para el campo solar.

3.6.5.- Algoritmo voraz de acceso directo

Este algoritmo se trata de un optimizador voraz (OV) básico y, por lo tanto, se puede clasificar como heurístico determinista. Al igual que con la búsqueda aleatoria pura, la denominación añadida de “acceso directo” pretende indicar que opera sobre la superficie de la central comprobando directamente distintas posiciones.

En cada ciclo se ubica un nuevo helióstato en la posición disponible que maximice el rendimiento óptico general de la central. Este proceso se repetirá hasta haber ubicado todos los helióstatos disponibles (o haber agotado todas las posiciones). De esta forma se irá conformando el campo solar de la central etapa tras etapa, como se plantea la heurística voraz más tradicional. Cada decisión de ubicación se resuelve escogiendo en cada etapa la mejor opción disponible y sin ningún tipo de perspectiva de futuro ni replanteamiento de decisiones ya tomadas.

El esquema algorítmico del proceso descrito se muestra a continuación, asumiendo el espacio de búsqueda descrito en torno a la expresión 3.41:

Función OCentralVorazDirecta(Central: centralOptimizada): Conjunto<CoordenadasXY>

Conjunto<CoordenadasXY> posicionesLibres = **MuestreoCentral**(centralOptimizada)

Conjunto<CoordenadasXY> diseñoResultado

Mientras (posicionesLibres != \emptyset && centralOptimizada.**HeliostatosLibres** != \emptyset) **hacer**:

Real: eficienciaMaxMedida = $-\infty$

real: eficienciaMedida = $-\infty$

Helióstato: heliostato = centralOptimizada.**HeliostatosLibres**.**Siguiente**()

Posición: posReferencia

Para cada posición *pos* **en** posicionesLibres **hacer**:

heliostato.**UbicarEn**(pos)

eficienciaMedida = **ModeloRendimientoÓptico**(centralOptimizada)

Si eficienciaMedida > eficienciaMaxMedida **entonces**:

posReferencia = pos

eficienciaMaxMedida = eficienciaMedida

Fin Si

Fin Para

heliostato.**UbicarEn**(posReferencia) //Se deja en la mejor libre encontrada

posicionesLibres.**Eliminar**(posReferencia)//Se quita de las libres

Fin Mientras

Devolver centralOptimizada.**Posiciones**() //Se devuelve el conjunto de coordenadas

Fin Función

Algoritmo 3.5.- Algoritmo voraz de ubicación directa.

Como se puede apreciar en el algoritmo 3.5, se devuelve directamente el conjunto de coordenadas óptimo para la central en lugar de los parámetros del modelo de ubicación que la definen. A nivel de funcionamiento, éste es simple: escoger en cada etapa la mejor ubicación libre para un nuevo helióstato teniendo en cuenta el diseño generado sólo hasta esa etapa y sin opción de cambiar ubicaciones previas como ya se ha comentado.

La función objetivo del algoritmo es la propia del problema, la que calcula el rendimiento óptico del campo solar de una central. Sobre este campo solar hay un conjunto de

helióstatos con coordenadas conocidas que definen la solución parcial del problema, y que se completará al terminar la optimización. La función de selección del algoritmo consiste simplemente en la aplicación de la función objetivo, de forma directa, sobre el resultado que generan las distintas opciones disponibles (posiciones libres) combinadas con la solución parcial que ya se tiene. Respecto a una función que compruebe que una solución parcial alcance el rango de solución completa, ésta no es necesaria porque, por la propia estructura del algoritmo, se alcanzará una solución completa al haber ubicado todos los helióstatos (o agotado las posiciones libres, en cuyo caso se puede considerar que no existe una solución real). En lo referente a una función de factibilidad, ésta es, de nuevo, implícita y se forma por la verificación de no ubicar más helióstatos de los disponibles así como por la selección de un conjunto de posiciones distribuidas de forma correcta y segura. Estas posiciones se muestrean sobre la superficie del mismo modo que se describió en la búsqueda aleatoria pura.

3.6.6.- Algoritmo UEGO

Fundamentos

El Algoritmo UEGO [ORT99], “Universal Evolutionary Global Optimizer”, es de tipo metaheurístico bioinspirado basado en poblaciones, siendo además clasificable como estocástico. Este algoritmo comparte algunos aspectos y enfoques comunes de algoritmos previamente comentados, especialmente de los AGN y AM, por lo que se recomienda especialmente la lectura desde la sección 2.3.7 a 2.3.9.

UEGO toma como base el algoritmo GAS (“Genetic Algorithm Species based”) [JEL98], tratando de mejorar la precisión de sus resultados y su paralelismo de cara a una implementación de alto rendimiento. Este algoritmo, por su funcionamiento, es apto para resolver problemas de optimización multimodales (con múltiples óptimos locales), pudiendo también descubrir su estructura.

UEGO se basa en mantener una población de especies que referencian a distintas regiones del espacio de búsqueda general. Las especies han de verse como “ventanas” de exploración sobre el espacio de búsqueda global. Estas especies son identificables por un único individuo de referencia (el de mejor valor encontrado en la zona), su valoración de aptitud (función de adecuación [RED08]) y un cierto radio (véase la figura 3.29). Este individuo es el centro de la subpoblación y su radio determina el área de influencia, es decir, un subdominio del espacio de búsqueda dónde se ubican individuos considerados como similares.

Nótese entonces que, en base a lo expuesto, se hace necesario contar con una medida de distancia en el espacio de búsqueda. De esta forma, en problemas combinatorios se puede emplear la distancia Hamming, que es igual al número de posiciones en que dos palabras de

la misma longitud difieren entre sí, mientras que en problemas con números reales se puede considerar por ejemplo la distancia Euclídea:

Dados dos puntos $P = (p_1, \dots, p_n)$ y $Q = (q_1, \dots, q_n)$ en un espacio n -dimensional, su distancia euclídea, $d_E(P, Q)$ es igual a $\sqrt{\sum_{i=1}^n (p_i - q_i)^2}$.

En el proceso de búsqueda, ésta se dirige hacia subdominios más pequeños del espacio de búsqueda mediante la creación de nuevas especies con un menor radio de influencia. Este enfoque es especialmente eficaz para problemas de tipo radio niche en las que hay varios óptimos locales distribuidos de forma dispar en el espacio de búsqueda. En este tipo de funciones no se puede determinar el radio niche adecuadamente ya que si es demasiado pequeño la búsqueda resulta inefectiva, y si es demasiado grande aquellos óptimos locales cercanos entre sí no podrán distinguirse [JEL01].

El radio de las distintas especies, con el que se trabaja en cada etapa o nivel del proceso, no se escoge arbitrariamente, sino que se sigue una formulación matemática exponencial en la que el primer valor, r_1 , coincide siempre con todo el dominio de búsqueda para ir reduciéndose y concentrándose paulatinamente en regiones prometedoras de forma similar al proceso de temple. Esta evolución de los valores del radio queda muy bien ilustrada en la figura 3.29. El motivo de la necesidad de partir con un radio inicial que abarque el espacio completo es obvio: no se puede descartar a priori ninguna región del espacio de búsqueda.

Los radios con los que va a operar durante la búsqueda se calculan a priori según el esquema mencionado y se almacenan en una lista ordenada decrecientemente. Hay un radio asociado a cada nivel, por lo que si el radio de una cierta especie coincide con el valor “ i ” de la lista de radios, se puede decir entonces que la especie se creó en el nivel “ i ”. Según se llegue a cada nivel, se cargará el radio asociado, así como dos límites de ejecución de la función objetivo de los que se hablará posteriormente.

Es importante destacar además que una cierta especie no es estática, sino que puede moverse por el espacio conforme la búsqueda avanza. Este movimiento ocurriría cuando el valor de una nueva solución encontrada en la zona es mejor que el del centro empleado como referencia. En este caso, el nuevo punto se convertiría en el centro y la ventana definida quedaría entonces desplazada en su dirección (véase la figura 3.31).

UEGO realiza por lo tanto una búsqueda global basada en especies que, a su vez, son optimizadas internamente. Esto lleva a descomponerlo en dos módulos fundamentales asociados:

El primero se encarga de la gestión general de las distintas especies y permite darle carácter global a la solución hallada al cubrirse todo el espacio de búsqueda. Estas especies son entidades dinámicas que en el proceso de búsqueda pueden crearse, combinarse... de hecho, originalmente se parte con una única especie o “especie raíz”.

El segundo componente es un optimizador local independiente que se aplica sobre las distintas subpoblaciones para dirigir las independientemente hacia los óptimos de su entorno o “ventana”. Esta modularidad hace al algoritmo susceptible a una mejor adaptación al problema abordado mediante la selección de un optimizador local especializado.

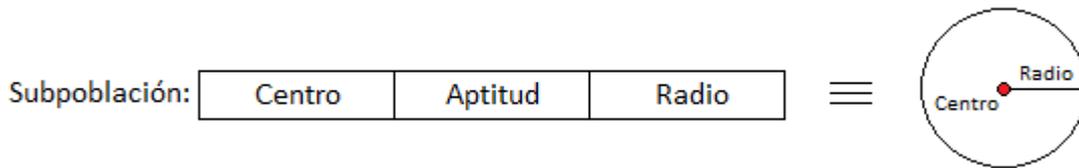


Figura 3.29.- Representación de una subpoblación.

Durante su ejecución, UEGO mantiene la lista de individuos que definen cada especie con la que está operando, pero no se tiene en cuenta ningún tipo de relación de parentesco entre ellas. Por lo tanto, los individuos que definen las especies son autosuficientes tanto para generar nuevas especies como para desplazarse en el espacio de búsqueda. Esta autosuficiencia característica es la clave principal de que el algoritmo tenga un paralelismo intrínseco muy apto para una implementación paralela.

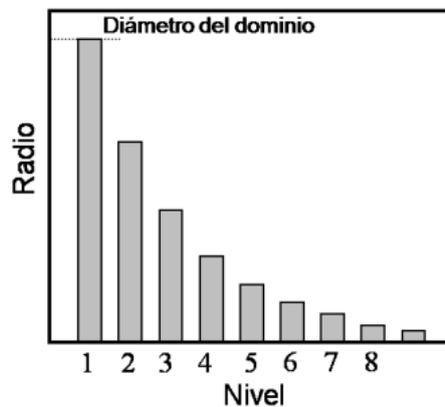


Figura 3.30.- Disminución exponencial del radio entre niveles [PLA12].

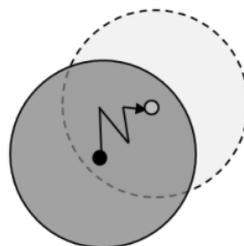


Figura 3.31.- Desplazamiento de una especie al cambiar su representante [PLA12].

Esquema algorítmico general de UEGO

La estructura esquematizada de UEGO se muestra en el algoritmo 3.6, derivado directamente del que se muestra en [JELO1] para hablar posteriormente sobre sus funciones y parámetros.

Función AlgoritmoUEGO():

Init_species_list

Optimize_species(n[1])

Repetir desde i = 2 **hasta** levels **hacer:**

Establish(r[i], new[i], n[i])

Create_species(new[i]/ length(species_list))

Fuse_species(r[i])

Shorten_species_list(max_spec_num)

Optimize_species_list(n[i]/max_spec_num)

Fuse_species(r[i])

Fin Repetir

Fin AlgoritmoUEGO

Algoritmo 3.6.- Esquema del algoritmo evolutivo UEGO.

Elementos, parámetros y detalles de UEGO

- **Init_species_list:** Este procedimiento crea una nueva lista de especies que consta de un único individuo. Esto se hace escogiendo aleatoriamente un punto del espacio de búsqueda y asociándole el primer nivel y/o radio. Este radio coincide con el diámetro del dominio de búsqueda de la función o problema a optimizar.
- **Establish(r[i], new[i], n[i]):** Este procedimiento asocia, para cada nivel alcanzado hasta el máximo “levels”, el valor de un radio r[i] correspondiente y dos números que indican máximo de evaluaciones de la función objetivo. Concretamente, new[i] indica el número máximo de evaluaciones que se pueden realizar en un cierto nivel para crear especies, mientras que n[i] delimita el número máximo de evaluaciones que se pueden realizar en un nivel dado durante el proceso de optimización de todas las especies.

- **Create_species(evals):** Para cada una de las especies se crea una sub-lista de soluciones que se escogen aleatoriamente de la ventana de la especie. Una vez creada la sub-lista, se van formando parejas de soluciones de modo que se puedan combinar cada una de ellas con el resto (véase la figura 3.32).

Cada vez que se selecciona una pareja, se calcula el punto medio de la sección que las conecta (línea que une las dos soluciones), y se calcula el valor de la función para tal punto medio. Si el valor en este punto es peor que los valores de las soluciones que forman la pareja, entonces significa que dicho punto medio está en un valle mientras que las soluciones pertenecen a dos colinas diferentes, por lo que se opta por incluir las dos soluciones en la lista de especies original como centros de dos nuevas especies (véase la figura 3.29). Cada una de estas nuevas especies recién insertadas tienen como radio aquel asociado al nivel en el que este ejecutándose el algoritmo en ese momento. El parámetro *evals* del procedimiento “*Create_species(evals)*” es un límite superior del número de evaluaciones que se pueden realizar en la creación de las especies.

Es además importante comentar que, como se puede apreciar en el algoritmo 3.6, *evals* se traduce a $new[i] / length(species_list)$, es decir, la división del número máximo de evaluaciones para creación de especies del nivel concreto entre la longitud de la lista de especies. De esta forma, cada especie de la lista tiene un número fijo de evaluaciones o “presupuesto” (*budget_per_species* [RED08]) igual a dicho cociente. Por lo tanto, el número de nuevos puntos, NP, que se pueden generar en cada especie está acotado por la siguiente expresión y teniendo en cuenta que el punto medio del segmento que une los extremos aleatorios también es evaluado [RED08]:

$$NP + \binom{NP}{2} \leq budget_per_species \quad (3.45)$$

Desarrollando la expresión anterior, la cantidad total de nuevos puntos posibles por especie se puede determinar mediante la siguiente expresión [RED08]:

$$NP = \frac{\sqrt{(1 + 8 * budget_per_species)} - 1}{2} \quad (3.46)$$

- **Fuse_species(radius):** En este procedimiento, si los centros de cualquier par de especies están a una distancia inferior al radio (*radius*) dado, entonces las dos especies se funden en una sola (véase la figura 3.32). La especie resultante tendrá como centro aquel de las dos que tenga el mejor valor, y se le asociara como nivel (y

por tanto como radio) el menor de las dos especies. De esta forma recibirá el mayor radio de las dos originales.

- **Shorten_species_list**(max_spec_num): Este procedimiento se encarga de eliminar especies en caso de que la lista donde se almacenan sea más extensa que el máximo permitido (el parámetro *max_spec_num*). Las especies de mayor nivel son eliminadas antes, por lo que se van guardando las subpoblaciones con radio mayor. De este modo, la especie raíz de nivel 1, cuyo radio es el diámetro del espacio de búsqueda, siempre se mantiene. Se conserva de esta forma el ámbito global de la búsqueda.

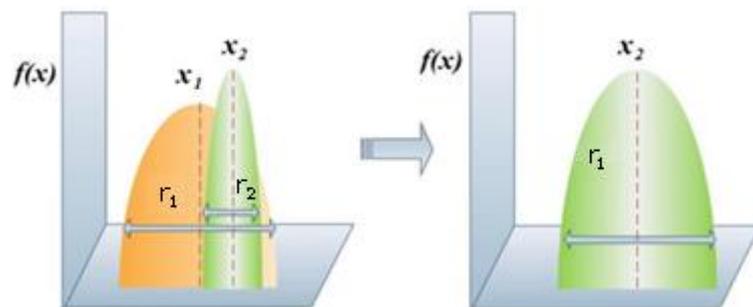


Figura 3.32.- Fusión de dos especies [RED08].

- **Optimize_species_list**(evals): Este procedimiento es el encargado de optimizar cada una de las especies. La optimización de cada especie tiene asociado un número máximo de evaluaciones de la función objetivo, y toma como punto de partida el centro de la misma, moviéndose en la región definida por su radio (véase la figura 3.31). Si el proceso de optimización encuentra un punto solución mejor que el centro, entonces este nuevo punto pasa a ser el centro de la especie, de modo que la ventana, y por tanto la región de búsqueda, se desplazan. El radio de la especie, no obstante, se mantiene siempre constante.

En este procedimiento es donde se efectúan las mutaciones de los individuos para intentar producir descendientes con un mejor valor. El criterio de reemplazo es determinista. Se podría decir que el tipo de reemplazo es por inclusión, ya que este procedimiento se va quedando con las mejores soluciones (los centros de las especies). En el caso de que para algún *i* la lista de especies sea menor que el tamaño máximo permitido (*max_spec_num*), el número de evaluaciones debido a la optimización de las especies en el nivel *i* será menor que el calculado a priori $n[i]$ (véase algoritmo 3.6, *Optimize species*), por lo que el costo total del algoritmo será dependiente del problema.

Parámetros de UEGO

En lo referente a los parámetros, los más importantes son los relacionados con los diferentes niveles [JEL01]: los radios ($r[i]$) y el número de evaluaciones de la función que se utilizan en los mecanismos de creación y optimización de especies ($new[i]$ y $n[i]$). En [JEL01] se describe un sistema para el cálculo adecuado de dichos parámetros en función de aquellos parámetros proporcionados directamente por el usuario.

Los parámetros explícitos que recibe UEGO del usuario son los siguientes, con su denominación abreviada entre paréntesis:

evals (“N”): Es el número máximo de evaluaciones de la función objetivo que el usuario permite para todo el proceso. Se trata de una cota superior por lo que la búsqueda puede concluir con un número inferior de llamadas a dicha función. No obstante este valor debe permitir el adecuado desarrollo de cada especie estudiada para alcanzar unos resultados de calidad.

levels (“L”): Es el nivel máximo a alcanzar, es decir, el que tendrá el mínimo radio. Al determinar el número de niveles, éste valor especifica también el número de etapas o generaciones (véase el algoritmo 3.6). Si bien es cierto que un valor alto proporcionará mayor fiabilidad a la búsqueda, su incremento desproporcionado hará la convergencia del algoritmo muy lenta.

max_spec_num (“M”): Determina la longitud máxima de la lista de especies, es decir, el número de especies que pueden existir y optimizarse de forma simultánea. Por lo tanto, es necesario contar con un número adecuado de subespecies para el tipo de función de forma que se pueda realizar una búsqueda en anchura a una escala considerable.

min_r (“ r_1 ”): Es el radio asociado con el nivel máximo (por lo tanto, el mínimo radio (véase la figura 3.30)). Este valor puede verse como la “resolución” de la búsqueda a la hora de mantener independientes las ventanas de búsqueda. Por consiguiente, es normalmente interesante que se trate de un valor pequeño para que se mantengan independientes las especies y se conserven los distintos óptimos locales próximos entre sí.

Para más información sobre los parámetros, y la relación existente entre ellos, consúltese [JEL01].

Algoritmo SASS de Solis y Wets como optimizador local en UEGO

Como ya se ha introducido, la arquitectura modular de UEGO permite que su componente de gestión de especies e iteraciones sea independiente del algoritmo de optimización que se aplica sobre las regiones que definen las especies.

Para abordar la resolución de la primera vertiente del problema, sobre el modelo de ubicación, se ha empleado una estrategia denominada “de Búsqueda Estocástica con agente

único”, SASS, del inglés “Single Agent Stochastic Search”. A grandes rasgos, una estrategia “SASS” implica que la búsqueda se realiza operando sobre un único vector solución, como por ejemplo el algoritmo de Recocido Simulado del que se habló en la sección 2.3.6. En contraposición, un método “multi-agente” (MSASS), supondría trabajar manteniendo un conjunto de vectores solución.

Esta técnica tiene como ventaja relevante que no requiere que la función objetivo sea continua ni derivable, lo que supone un aumento considerable de su aplicabilidad.

En concreto, se ha empleado algoritmo de Solis y Wets [SOL81] para realizar la optimización de las especies. Este algoritmo se incluye a continuación, tal y como se describe en [MCD94], con un enfoque minimizador:

Begin SASSSolisWets(Scnt, Fcnt, ex, ct, σ_{ub} , σ_{lb} , Maxlte)

 Seleccionar aleatoriamente: x_0 //Inicializar el vector de búsqueda

$b_0 = 0$ //Inicializar el vector parcial

$k = 1$, scnt = 0, fcnt = 0, $\sigma_0 = 1$

while $k < \text{Maxlte}$

if scnt > Scnt **then** $\sigma_k = \text{ex} * \sigma_{k-1}$

if fcnt > Fcnt **then** $\sigma_k = \text{ct} * \sigma_{k-1}$

if $\sigma_{k-1} < \sigma_{lb}$ **then** $\sigma_k = \sigma_{ub}$

$\xi_k = N(b_k, \sigma_k I)$ //Generar vector aleatorio gaussiano multivariado

if $\Phi(x_k + \xi_k) < \Phi(x_k)$ **then**

$x_{k+1} = x_k + \xi_k$

$b_{k+1} = 0.4\xi_k + 0.2b_k$

 scnt = scnt + 1, fcnt = 0

else

if $\Phi(x_k - \xi_k) < \Phi(x_k) < \Phi(x_k + \xi_k)$ **then**

$x_{k+1} = x_k - \xi_k$

$b_{k+1} = b_k - 0.4\xi_k$

 scnt = scnt + 1, fcnt = 0

else

$$x_{k+1} = x_k$$

$$b_{k+1} = 0.5 * b_k$$

$$fcnt = fcnt + 1, scnt = 0$$

$$k = k + 1$$

End while

End SASSolisWets

Algoritmo 3.7.- Algoritmo SASS de Solis y Wets.

Este algoritmo comienza, como es habitual, con una solución inicial aleatoria x_0 , que se toma ya como referencia (la mejor solución hasta el momento). Además, se hace la inicialización del contador de iteraciones “k”, el número de éxitos “scnt” y el de fracasos “fcnt” (siendo el éxito y el fracaso la mejora y el empeoramiento del valor de la función objetivo Φ en una nueva solución generada respecto a la referencia respectivamente). En esta etapa inicial se definen también los valores b_0 y σ_0 que rigen la exploración de la zona desde la referencia.

La generación de una nueva solución que valorar, x' se hace a partir de la referencia que se tiene en una cierta iteración, x , mediante la siguiente expresión, en su vertiente positiva:

$$x' = x \pm \xi \tag{3.47}$$

Donde ξ es una varianza del tamaño de la perturbación sobre la referencia, dependiente de la iteración, y que se controla indirectamente según el número de éxitos y fracasos. Concretamente, ξ es un vector de números aleatorios $\xi = (\xi_1, \dots, \xi_d)$, siendo “d” la dimensión del espacio de búsqueda. Los componentes de este vector, en una cierta iteración k, se obtienen siguiendo una distribución gaussiana o normal con media b_i para $i \in [1, d]$ y una desviación típica σ definida por los límites superior e inferior del valor de x_i , x_i^+ y x_i^- respectivamente:

$$\xi_i = N(b_i, \sigma(x_i^+ - x_i^-)) \tag{3.48}$$

En caso de que el valor de la función objetivo Φ en la solución candidata x' , generada con la vertiente positiva de la expresión 3.47, sea menor al de la referencia, x , es decir, si:

$$\Phi(x') < \Phi(x) \tag{3.49}$$

Se toma entonces el punto x' como nueva solución de referencia o mejor solución encontrada hasta el momento. En caso contrario se repite el proceso descrito para la expresión 3.47, pero en su vertiente negativa, y generando x'' .

Si se ha encontrado una nueva mejor solución, se considera la iteración positiva y se actualizan los valores de b según la siguiente expresión dependiente de si se aceptado x' o x'' :

$$b_i = \begin{cases} 0.2b_i + 0.4\xi_i & \text{si } \Phi(x') < \Phi(x) \\ b_i - 0.4\xi_i & \text{si } \Phi(x'') < \Phi(x) \end{cases} \quad i = 1, \dots, d \quad (3.50)$$

En caso contrario, la iteración se considera negativa y los valores de b se recalculan en base a la siguiente expresión:

$$b_i = 0.5b_i, \quad i = 1, \dots, d \quad (3.51)$$

Si el número de iteraciones positivas o “exitosas” seguidas alcanza el parámetro de entrada “Scnt”, entonces la desviación típica se expande según la siguiente expresión donde “ex” es otro parámetro de entrada:

$$\sigma = \sigma * ex \quad (3.52)$$

Del mismo modo, si el número de iteraciones negativas o “fallidas” alcanza el parámetro de entrada “Fcnt”, la desviación típica se contrae multiplicándola por el parámetro “ct”, en lugar de “ex”, en la expresión 3.52.

Además, en caso de que la desviación típica se haga menor al límite inferior σ_{lb} , se iguala inmediatamente al límite superior, el parámetro σ_{ub} . Como se puede apreciar en el algoritmo 3.7, este tipo de operaciones se realizan al comienzo del bucle principal, justo antes de que se emplee la desviación típica para generar la variación o “perturbación” ξ . Hay que destacar también que las condiciones de modificación de σ_k no son realmente excluyentes.

Es relevante mencionar, para concluir el análisis del algoritmo 3.7, que el máximo de iteraciones del algoritmo se define mediante un parámetro “Maxlte”, siendo el alcanzar este número de ejecuciones la condición directa de parada. No obstante, este criterio de parada es independiente de la situación real del algoritmo, por lo que, por ejemplo, no considera si ha quedado atrapado en un mínimo local. Resulta entonces muy interesante basar el criterio de parada en el número de iteraciones negativas o que no mejoran el resultado, reemplazando el parámetro “Maxlte” por uno “MaxFcnt” y buscar “Mientras fcnt < MaxFcnt” en el bucle principal [PLA12].

Adaptación de UEGO

El algoritmo UEGO, como se comentó en la sección de materiales, era una de las herramientas software funcionales con las que se contaba. Por tanto, hubo simplemente que adaptar ciertos archivos para aplicarlo a la resolución del problema de optimización planteado. Este procedimiento se llevó a cabo con la asistencia y dirección de D^a Juana

López Redondo, quien ha trabajado activamente en el desarrollo de la implementación de UEGO empleada.

La adaptación de UEGO a la resolución de la primera vertiente del problema se resume brevemente en el apéndice C sección 1.

3.6.7.- Algoritmo GASUB: UEGO para problemas de localización discreta

Fundamentos

La aplicación de UEGO, tal y como se ha descrito en la sección anterior, se ha realizado sobre la resolución de la primera vertiente del problema planteado. Sin embargo, no es viable para la segunda variante de dicho problema. El motivo principal es que no se han definido mecanismos para mantener ciertas restricciones sobre los individuos con los que se opera.

El problema que supone seleccionar N posiciones de un total de P disponibles se puede codificar fácilmente mediante cadenas binarias, como se sugiere en el contexto de la expresión 3.44. Sin embargo, y como se incluye también en dicha expresión, es necesario mantener en los individuos o “soluciones candidatas” el número deseado N de posiciones escogidas. Por tanto, no basta con aplicar UEGO sobre cadenas binarias ya que el significado implícito que codifican no se respetará. Para abordar esta situación aparece GASUB (“Genetic Algorithm with Supopulation Support”), una adaptación de UEGO para problemas de localización discreta sin restricciones o “UDL” (“Unconstrained Discrete Location” en inglés) [RED08].

GASUB mantiene la esencia de funcionamiento de UEGO incluyendo simplemente los aspectos propios de una codificación binaria de los elementos del espacio de búsqueda y, especialmente, el mantenimiento de restricciones propias de la semántica de este tipo de problemas. En el problema de UDL se trabaja con un conjunto discreto de ubicaciones potenciales o válidas mientras que UEGO explora directamente sobre una zona del plano.

El espacio de búsqueda que explora GASUB es el que se describe para la expresión 3.44, formado por cadenas binarias de longitud P , donde P es el número total de ubicaciones disponibles. Cada individuo de este espacio de búsqueda es simplemente una codificación de aquellas ubicaciones que se seleccionan en dicho individuo o solución candidata mediante 1's (se seleccionan) y 0's (se descartan). Por tanto, hay una indexación directa entre cada posición i del genotipo y la ubicación a la que referencia. Es necesario entonces, y como se ha anticipado, limitar el número de ubicaciones seleccionadas por cada individuo o, en términos de codificación, el peso Hamming o número de bits a 1. En la figura 3.33 se ilustra situación.

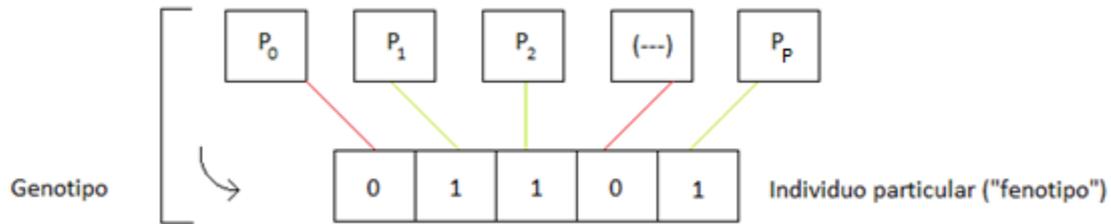


Figura 3.33.- Esquema estructural del genotipo con un individuo concreto.

En el ejemplo de la figura 3.33 se dispone de P ubicaciones cuyo orden determina una cierta estructura de genotipo o “cromosoma” denotando los 1’s selección (líneas verdes) y los 0’s descarte (líneas rojas). Se incluye además un individuo concreto que se adapta a dicha estructura. De este individuo deduce, por su peso Hamming igual 3, que ese es el límite de ubicaciones a escoger del total P , es decir, $N=3$.

El concepto fundamental de UEGO, el de “especie”, se mantiene también en GASUB pero con el nombre de “subpoblación”. Una cierta subpoblación se define igualmente mediante un centro, que es una solución candidata o individuo, su valoración como solución, y un radio que determina la zona del espacio de búsqueda en la que se agrupan los miembros de dicha subpoblación. Siendo nf una cierta solución candidata, $\Pi(nf)$ su función de aptitud, R su radio de atracción y siguiendo la nomenclatura de [RED08], cada subpoblación está representada por una tripleta de la forma: $(nf, \Pi(nf), R)$.

En este contexto se cuenta de nuevo con una definición de distancia en el espacio de búsqueda. Sin embargo, GASUB emplea la distancia Hamming, o número de posiciones distintas entre dos individuos, en lugar de la distancia Euclídea como se hace en UEGO para la primera vertiente del problema tratado. Teniendo en cuenta además que en cada solución candidata se selecciona un número fijo N de posiciones, la distancia Hamming entre dos individuos será siempre un múltiplo de 2. En base a esta apreciación la lista de radios descrita para UEGO ha de calcularse en base a la siguiente expresión [RED08]:

$$R_i = 2 \cdot R_1 \cdot \left(\frac{R_L}{R_1}\right)^{\frac{i-1}{L-1}} \quad (i = 2, \dots, L) \quad (3.53)$$

Donde el parámetro L , como en UEGO, indica el número máximo de niveles de exploración. Además, cada nivel i tiene también un cierto valor de radio R_i asociado y dos máximos correspondiente. El máximo n_i establece el límite de llamadas a la función de objetivo en el proceso de mutación de individuos. El máximo new_i limita el número de llamadas a la función objetivo en el proceso de crear nuevas subpoblaciones. Estos parámetros se calculan igualmente a partir de los parámetros introducidos por el usuario, homónimos y equivalentes a los de UEGO.

Esquema algorítmico de GASUB

Algoritmo GASUB

Init_subp_list

Mutation(n_1)

FOR $i=2$ to L

Determine R_i, new_i, n_i

Generation_and_crossover(new_i) #budget_per_subp = $new_i/length(subp_list_i)$

Selection(R_i, M)

Mutation(n_i) #budget_per_subp = n_i/max_subp_num

Selection(R_i, M)

Fin FOR

Fin Algoritmo GASUB

Algoritmo 3.8.- Esquema algorítmico de GASUB.

Elementos de GASUB

Aunque en un sentido estricto GASUB es un algoritmo distinto a UEGO, sus componentes son conceptualmente los mismos que los de éste, comentados en la sección anterior. Por tanto, sólo se detallarán aquellos aspectos propios de su orientación a problemas de UDL como el tratado dentro de cada procedimiento:

- ***Init_subp_list***: Este procedimiento, como en UEGO, crea la primera subpoblación en el primer nivel. El centro se determina de forma aleatoria mediante la selección del número permitido de ubicaciones, su valoración es simplemente el valor de la función objetivo en dicho centro y el radio asociado a la subpoblación es igual al diámetro del espacio de búsqueda (primer nivel) para mantener una referencia global del espacio de búsqueda. Esta subpoblación se mantendrá también durante todo el proceso aunque pueda cambiar de centro.
- ***Generation_and_crossover(create_evals)***: En el proceso de generación para cada subpoblación de la lista se crea aleatoriamente un conjunto de nuevos individuos en sus respectivas zonas de influencia (véase la figura 3.34). De nuevo, es hay que mantener la solución que codifican en dentro del número de ubicaciones seleccionable, es decir, mantener su peso Hamming dentro de la especificación del problema.

Los individuos de cada conjunto se agrupan entonces formando parejas para obtener descendencia. Sin embargo, es importante destacar que el operador de reproducción o cruce debe mantener la mencionada restricción del peso Hamming.

El operador aplicado al cruce de una cierta pareja realiza una operación **OR** entre los genotipos de los dos progenitores y obtiene un descendiente que viola la restricción de selección al tener un mayor número de 1's del permitido. Seguidamente se selecciona aleatoriamente, de entre los 1's, el número admitido de ubicaciones escogidas, dejando el resto como 0's.

Si se ha obtenido un individuo mejor valorado que el actual centro de la subpoblación a la que corresponde, éste será el nuevo centro, manteniendo el radio correspondiente a la subpoblación. En contraposición, si el valor de la función objetivo en la descendencia de una cierta pareja es peor al de los progenitores, entonces ambos progenitores se consideran centros de nuevas subpoblaciones. Estas subpoblaciones se añaden a la lista con la definición correspondiente a su nivel i .

Nótese que, al igual que ocurre en UEGO y como se ha anticipado, este proceso está acotado por límites propios de cada subpoblación.

- **Selection(radius, max_subp_list)**: Este proceso engloba dos sub-procesos: **Fuse_subp** y **Select_Subp**. El primero se encarga de unir subpoblaciones cuando la distancia que separa sus centros es inferior a la que se está considerando en el nivel i . El segundo elimina subpoblaciones de la lista cuando se excede el tamaño máximo permitido. En cualquier caso, estos dos procedimientos son fundamentalmente los mismos ya expuestos para UEGO con la principal diferencia de basarse en la mencionada distancia Hamming.
- **Mutation(mut_evals)**: Este procedimiento induce mutaciones sobre los centros que definen las distintas especies de la lista mantenida. El proceso de mutación es similar al que se describió para los algoritmos genéticos con la importante diferencia de que se necesita mantener el número de 1's de los individuos. Por tanto, si un gen pasa de ser 0 a 1, se debe realizar también una mutación inversa transformando otro gen de 1 a 0. Si al mutar un cierto individuo el resultante tiene una mejor valoración, éste reemplazará al centro de la subpoblación a la que corresponde. En un nivel i de la búsqueda, el máximo número de mutaciones consecutivas que puede sufrir cada centro de subpoblación es igual a n_i/\max_subp_num como se indica en el algoritmo 3.8. Es importante destacar además que este procedimiento es equivalente al proceso de optimización local que se realiza en UEGO, como se describe en la sección anterior, mediante la aplicación del algoritmo SASS de Solis y Wets.

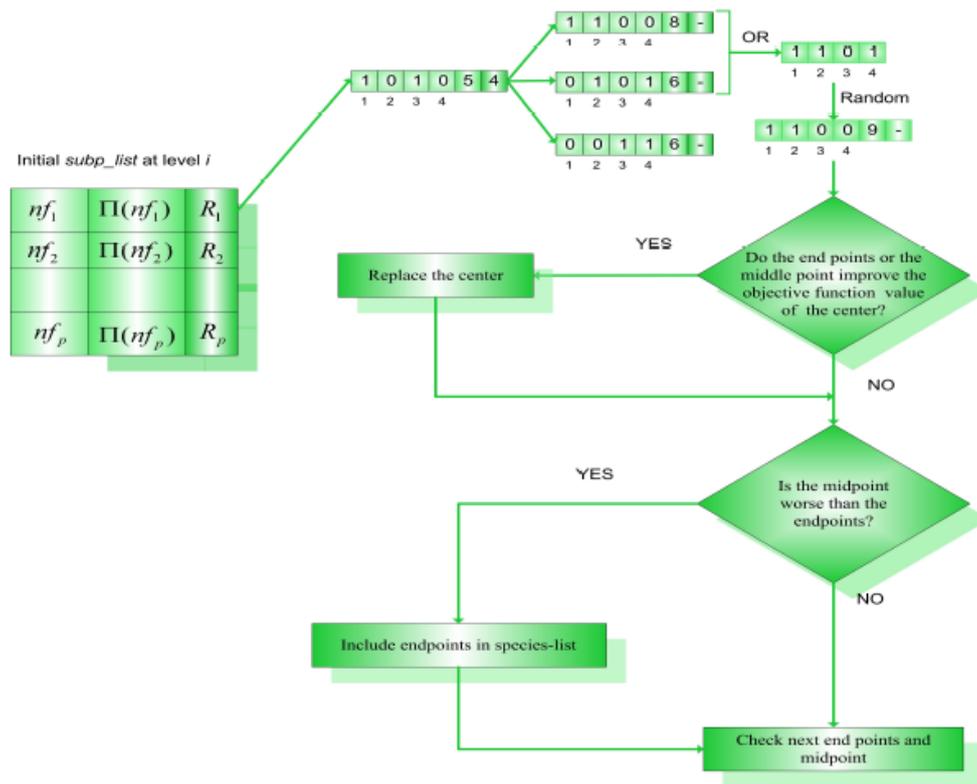


Figura 3.34.- Diagrama de flujo del procedimiento Generation_and_crossover [RED08].

Es finalmente importante destacar que, como ocurre con UEGO, GASUB puede terminar la búsqueda al haber explorado todos los niveles definidos sin haber consumido todas las llamadas a la función objetivo permitidas por la gestión de las subpoblaciones que hacen.

Para más información sobre la adaptación de UEGO a problemas de localización discreta, GASUB, se recomienda la lectura de [RED08].

Adaptación de GASUB

El algoritmo GASUB se incluye en uno de los modos de operación de la librería UEGO utilizada. Consiguientemente su adaptación a la resolución de la segunda vertiente del problema abordado es relativamente sencilla. Este procedimiento se ha llevado a cabo, de nuevo, con la asistencia y dirección de D^a Juana López Redondo, quien ha trabajado también activamente en el desarrollo de la implementación de GASUB empleada. En el apéndice C, sección 2, se resume el proceso de adaptación realizado para GASUB.

Capítulo 4. Resultados y discusión

En este capítulo se exponen y comentan los resultados obtenidos tras el desarrollo de los objetivos y procedimientos tratados en el capítulo anterior.

En primer lugar se hace una breve presentación general de aquellos aspectos que se han estudiado en la fase de experimentación. Seguidamente se indica el contexto sobre el que se realizan los experimentos para, finalmente, mostrar y comentar los resultados obtenidos en cada faceta estudiada.

Algunas de las facetas que se han estudiado, de forma complementaria a los objetivos originalmente definidos, son por ejemplo la repercusión de la inclusión del factor de bloqueo y sombreado en el rendimiento óptico o la aceleración lograda mediante la paralelización del modelo de rendimiento óptico. No obstante, y teniendo en cuenta que la pretensión fundamental del proyecto es la comparativa entre dos algoritmos estocásticos y uno determinista sobre el diseño del campo solar para maximizar su rendimiento óptico, se aborda también este estudio. Como se define en la sección 3.1 y se ilustra claramente en la figura 3.27, este problema se ha planteado a su vez en dos variantes o vertientes:

La que se referencia como *“primera variante”*, en la que el diseño del campo solar se define mediante las variables que configuran un cierto modelo de diseño y sobre las que se aplica la optimización.

La que se denomina como *“segunda variante”*, en la que la optimización implica la selección de un conjunto de posiciones disponibles sobre un total que se ha generado sistemáticamente buscando la máxima densidad de posiciones por metro cuadrado.

4.1.- Introducción

El objetivo fundamental que se persigue en el proyecto es el estudio comparativo de tres métodos de optimización heurísticos, uno de tipo determinista y los otros dos de tipo estocástico, aplicados al mismo problema de optimización del rendimiento del campo solar de las centrales de torre, en dos variantes de definición (véase la sección 3.1):

- “*Primera variante*”, basada en un modelo de diseño, en la que se optimizan las variables que determinan la distribución de los helióstatos.
- “*Segunda variante*”, basada en la selección óptima de un subconjunto de posiciones de un conjunto de posiciones disponibles sobre las que se pueden ubicar los helióstatos.

Para la consecución de este objetivo general, como se ha tratado anteriormente, se ha desarrollado fundamentalmente (y obviando otros detalles que se ilustran en la figura 3.27) un modelo de rendimiento óptico del campo solar que sirve como una base o marco común de operación y análisis del desempeño de los algoritmos de optimización. Por consiguiente, el enfoque más básico para el estudio es el tratamiento del modelo de rendimiento como un componente de “caja negra” cuyos resultados, una vez implementado, rigen el proceso de optimización. Sin embargo, hay ciertos aspectos de interés que se pueden estudiar sobre el propio modelo de rendimiento desarrollado y que complementan la información extraíble de los resultados de la optimización basada en dicho modelo. Concretamente se pueden destacar tres aspectos relevantes: el coste computacional y repercusión del cálculo del factor de bloqueo y sombreado sobre el rendimiento óptico, la paralelización del modelo de rendimiento óptico y el tipo de muestreo que se hace del tiempo en su ejecución.

Teniendo en mente lo expuesto se van a tratar, en este orden, los siguientes aspectos principales:

- Impacto de la orientación de los helióstatos y el cálculo del factor de bloqueo y sombreado en el tiempo de cálculo del rendimiento óptico.
- Efecto de la paralelización del modelo de rendimiento en su tiempo de ejecución.
- Efecto del tipo de muestreo del tiempo en los resultados del modelo de rendimiento y las evaluaciones que realiza.
- Resultados del proceso de optimización de los algoritmos de Búsqueda Aleatoria Pura, Voraz y UEGO en las dos variantes del problema definido.

El tercer punto, como se ha comentado ya, define el núcleo en torno al cual se describe el proyecto. De su consecución se derivan realmente todos los sub-objetivos principales definidos para el proyecto. Por consiguiente, se hablará con detenimiento de dichos resultados en las dos vertientes planteadas para la optimización, tanto de forma separada como en tono comparativo de un enfoque frente a otro.

Se puede añadir finalmente, y para concluir esta introducción, que se ha logrado cumplir todos los objetivos definidos para el proyecto:

- Se ha desarrollado un modelo de rendimiento óptico del campo solar.
- Se ha desarrollado un modelo de ubicación de helióstatos que permite una definición intensiva del campo solar para la primera vertiente de diseño.
- Se ha realizado un muestreo superficial de la central de cara a la segunda vertiente de diseño.
- Se ha definido un problema de optimización en torno a la maximización del rendimiento óptico del campo solar con dos variantes abordadas.
- Se ha resuelto el problema de optimización planteado, en sus dos variantes descritas en la sección 3.1, aplicando los tres algoritmos estudiados (Búsqueda Aleatoria Pura, UEGO y Voraz) con las adaptaciones y peculiaridades propias de cada enfoque, de cara a una evaluación de su desempeño.

4.2.- Condiciones generales de experimentación

Para la realización de los experimentos y mediciones se ha trabajado generalmente con una central de torre con las siguientes propiedades globales y orientadas al proceso de optimización:

- Latitud de 36° Norte aproximadamente (36.096341093242° más concretamente).
- 0 m sobre el nivel del mar.
- Receptor situado en una torre de 40 m de altura.
- Helioestatos planos y cuadrados de 4 m² de superficie (2x2 metros).
- Muestro de los helioestatos de 1 m (9 muestras).
- Factor de Reflectividad de los helioestatos de 0.9 (sobre 1).
- Muestreo temporal constante de una medición por hora.

Las propiedades atribuidas a la central con la que se opera pueden modificarse para ajustarse a cualquier modelo de planta, aunque hay que tener en cuenta dos consideraciones fundamentales. En primer lugar, que se ubique en el Hemisferio Norte es un requisito para la coherencia del modelo de ubicación implementado y el sistema de referencia seguido. Siguiendo el sistema de referencia definido y que se ilustra en la figura 3.9, el modelo de ubicación implementado comienza ubicando los primeros helioestatos al norte de la torre del receptor. Este sencillo detalle hace más recomendable aplicar el modelo en una central al norte del Ecuador como se menciona en el tercer capítulo al hablar sobre el “factor coseno”. Nótese, no obstante, que el modelo de ubicación de los helioestatos no está realmente limitado a centrales del Hemisferio Norte, depende simplemente del sistema de referencia bajo el que opere (o de “dónde se sitúa el azimut 0°” más concretamente). En

segundo lugar, las dimensiones reducidas de la superficie reflectante de los helióstatos, así como el espacio de muestreo, conlleva un número relativamente bajo de muestras para el cálculo del factor de bloqueo y sombreado como se describió en el tercer capítulo, el proceso más costoso. De esta forma, será posible llevar a cabo procesos de optimización más rápidos dado que la evaluación de las soluciones candidatas será también más rápida. Esta decisión para el proceso de optimización es fundamentalmente posible por el mero hecho de que, en la medida que se proporcione un contexto consistente y común para realizar la comparativa del desempeño, es posible sacrificar parcialmente la precisión real de la valoración de las soluciones.

Es importante destacar además que aspectos como el número de helióstatos o su distribución, que no se han concretado, varían según el contexto del experimento. Estos detalles se especificarán posteriormente según se necesite. Además, el tipo de muestreo especificado para el tiempo se variará en un estudio posterior particular.

Se debe también tener en cuenta que las características de base de los campos solares modelados se detallan en la primera sección del tercer capítulo. De estas propiedades se pueden recordar, por ejemplo, que se asume una superficie perfectamente plana en torno al receptor así como que el receptor en cuestión es puntual y con una capacidad de absorción máxima ideal.

Finalmente, se recuerda que la experimentación se ha ejecutado en el que se denomina como “Tercer Equipo”, como se anticipa en la sección 3.3, donde se pueden encontrar sus características principales. Puntualmente, y como se comenta también en dicha sección, se recurre al que se denomina como “Cuarto Equipo” para una prueba puntual que se tratará posteriormente.

4.3.- Impacto computacional del factor de bloqueo y sombreado sobre el rendimiento óptico

En el tercer capítulo, en la descripción del modelo de rendimiento óptico realizada, así como al abordar su paralelización, se destaca el tiempo de proceso que supone el cálculo del factor de bloqueo y sombreado. De hecho, basta con analizar detenidamente las operaciones que conlleva para llegar a esta conclusión. Sin embargo, para llegar a visualizar realmente la repercusión de este cálculo y comprender por qué, tal y como se menciona en el segundo capítulo, ciertos autores ([NOO12] por ejemplo) optan por obviar su determinación en ciertas etapas de la optimización, es de gran ayuda realizar un estudio empírico. Esta experimentación, bien enfocada, puede además aportar información sobre el proceso de optimización que realmente centra la atención del proyecto.

En esta línea, y sobre la central definida para las pruebas, se ha habilitado el cálculo del factor de bloqueo y sombreado con el fin de medir el rendimiento óptico no ponderado de una serie de distribuciones de heliostatos. Dichas distribuciones se corresponden con las soluciones proporcionadas en los problemas de optimización de la segunda vertiente. Los cálculos del factor de bloqueo y sombreado se han realizado de forma secuencial, sin considerar la versión paralela de dicho código. Es importante mencionar además que deshabilitar el cálculo de este sub-factor permite por extensión obviar el proceso de orientación de los heliostatos dado que los otros sub-factores del modelo desarrollado, o bien son independientes (como el factor de atenuación atmosférica), o bien la llevan implícita en su propio cálculo (como el factor coseno). Las distintas distribuciones utilizadas en estos experimentos se han promediado, en conjunto, agrupadas según el número de heliostatos involucrados. De esta forma, se ha generado un conjunto de datos formado por la distribución de 12 cantidades distintas de heliostatos. Cada una de estas cantidades se ha distribuido a su vez de cinco formas diferentes: según la solución obtenida de forma voraz y la mejor y peor obtenidas tanto con GASUB como con la Búsqueda Aleatoria Pura. Las mediciones pertinentes se han repetido además cincuenta veces en cada ocasión para lograr una mayor fiabilidad en los tiempos obtenidos.

Como complemento al contexto descrito, y para abarcar también conjuntos de heliostatos mayores a los optimizados, se ha estudiado de forma separada un conjunto adicional de 19 distribuciones formadas por la selección directa y secuencial de las posiciones resultantes del muestreo circular denso de la superficie, descrito en el tercer capítulo (e ilustrado muy descriptivamente en la figura 3.28). Si bien es cierto que este conjunto de posiciones muestreadas conforman las soluciones candidatas para la optimización basada en posiciones, en este diseño adicional se han seleccionado las primeras “N” posiciones disponibles para “N” heliostatos, sin plantear una optimización de la selección como en las muestras anteriores. Por consiguiente, esta situación permite también realizar indirectamente una comparativa entre un enfoque de diseño no estudiado frente los diseños “refinados” mediante un proceso de optimización.

Los resultados obtenidos del análisis del impacto del factor de bloqueo y sombreado sobre los diseños “optimizados”, se muestran en la tabla 4.1 combinados en promedio (se incluye información adicional sobre estos promedios en el apéndice D.1). La información de las distintas columnas de dicha tabla, en orden de aparición, son las siguientes:

- **Número de Heliostatos “H”**: Indica el número de heliostatos distribuidos en la superficie de la tabla. El rango va, concretamente, desde 2 hasta 32 heliostatos.
- **Tiempo Promedio Completo “TPC”**: Se indica, en segundos, el tiempo de cómputo del rendimiento óptico no ponderado de una cierta distribución, con todos los sub-factores tratados en el tercer capítulo (incluyendo la orientación y el cálculo del factor de bloqueo y sombreado). Como se refleja en el nombre de la columna, se

trata de un promedio de las cinco alternativas generadas en el proceso de optimización (para la 2ª vertiente), al igual que en las tres columnas siguientes.

- **Tiempo Promedio Reducido “TPR”**: Se indica, en segundos, el tiempo promedio de cómputo del rendimiento óptico excluyendo el cálculo del factor de bloqueo y sombreado además de la orientación de los heliostatos (innecesaria al suprimirse la consideración de dicho factor).
- **Diferencia de Tiempo “Dif. T”**: En esta columna se muestra porcentualmente el impacto del proceso de orientación y el cálculo del factor de bloqueo y sombreado sobre el tiempo total de ejecución. Se calcula tomando el tiempo promedio “completo” como referencia para determinar el porcentaje que representa el tiempo promedio “reducido” (ya que el segundo proceso puede verse como un subconjunto del primero). A continuación, el resultado se obtiene restando al 100% el porcentaje correspondiente a los cálculos independientes de la orientación y del factor de bloqueo y sombreado. De esta forma, el porcentaje resultante es asociable a los mencionados procesos de orientación y factor de bloqueo.
- **Eficiencia Completa “Ef. C”**: Se trata de la valoración o rendimiento óptico (no ponderado) en promedio de los cinco diseños propuestos, considerando el factor de bloqueo y sombreado en el proceso de cálculo.
- **Eficiencia Reducida “Ef. R”**: Se muestra el rendimiento óptico calculado, sobre los mismos diseños que en el caso anterior, pero sin considerar el factor de bloqueo y sombreado para el resultado general.
- **Diferencia de Eficiencia “Dif. Ef.”**: En esta columna se muestra porcentualmente el impacto que tiene el factor de bloqueo y sombreado, esta vez sobre la valoración resultante en lugar de sobre el tiempo de cómputo. Consiguientemente, su cálculo se realiza del mismo modo descrito para la diferencia de tiempo, con la diferencia obvia de basarse en los datos de eficiencias en lugar de los tiempos. Como se comentó en el tercer capítulo, cualquier sub-factor integrado en el factor general de rendimiento óptico obviado es equivalente a considerarlo como “máximo” o “1”. De esta forma, en esta columna se refleja en tono negativo la reducción que supone un cálculo real de este valor sobre la eficiencia global.

Como se puede apreciar sobre la tabla, se incluye un promedio final sobre datos de cada columna.

Además, la información referente a los tiempos de cálculo completo y reducido junto con las diferencias en tiempo y eficiencia contenidas en la tabla 4.1 se representan también gráficamente, como se indica a continuación:

- **“Tiempo Promedio Completo” frente al “Tiempo Promedio Reducido”**: Esta gráfica, que se incluye en la figura 4.1, permite visualizar directamente el impacto de incluir el cálculo del factor de bloque y sombreado, con las operaciones que conlleva, en el tiempo de cómputo del rendimiento óptico.
- **Evolución de la “Diferencia de Tiempo”**: Esta gráfica, que se incluye en la figura 4.2, consiste simplemente en la representación de la columna homónima de la tabla 4.1 según aumenta el número de helióstatos ubicados.
- **Evolución de la “Diferencia de Eficiencia”**: Esta gráfica, que se muestra en la figura 4.3, es una representación de cómo las eficiencias “completa” y “reducida” se distancian conforme aumenta el número de helióstatos.

H	TIEMPO			EFICIENCIA		
	TPC (s)	TPR (s)	Dif. T (%)	Ef. C [0,1]	Ef. R [0,1]	Dif. Ef. (%)
2	0,0847	0,0104	87,76	0,7779	0,7814	0,45
5	0,2275	0,0192	91,57	0,7641	0,7731	1,16
10	0,5390	0,0333	93,82	0,7504	0,7620	1,52
12	0,7098	0,0383	94,60	0,7444	0,7587	1,88
15	0,9665	0,0470	95,13	0,7390	0,7566	2,33
18	1,3281	0,0557	95,80	0,7361	0,7570	2,76
20	1,5505	0,0627	95,96	0,7325	0,7557	3,06
22	1,8230	0,0669	96,33	0,7293	0,7554	3,45
25	2,2837	0,0749	96,72	0,7236	0,7549	4,15
28	2,8330	0,0861	96,96	0,7182	0,7516	4,43
30	3,0847	0,0883	97,14	0,7150	0,7489	4,53
32	3,4681	0,0942	97,28	0,7173	0,7522	4,64
Promedio	1,5749	0,0564	94,92	0,7373	0,7590	2,86

Tabla 4.1.- Impacto del factor de bloqueo y sombreado en el tiempo de cómputo y el valor de rendimiento óptico calculado sobre los diseños de óptimos de la segunda vertiente de optimización planteada, en promedio.

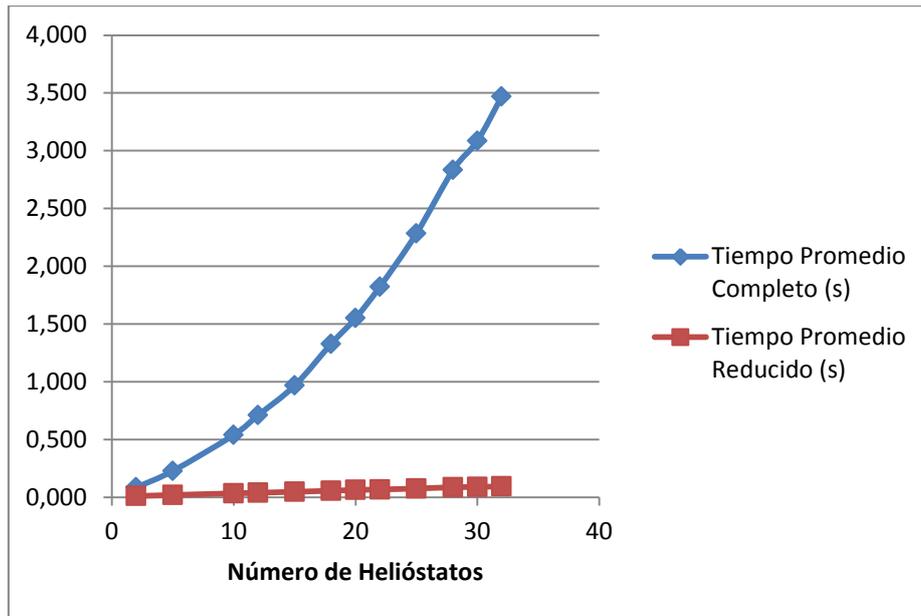


Figura 4.1.- Comparativa gráfica entre el tiempo de cómputo del rendimiento óptico con y sin factor de bloqueo sobre los diseños obtenidos tras el proceso optimización.

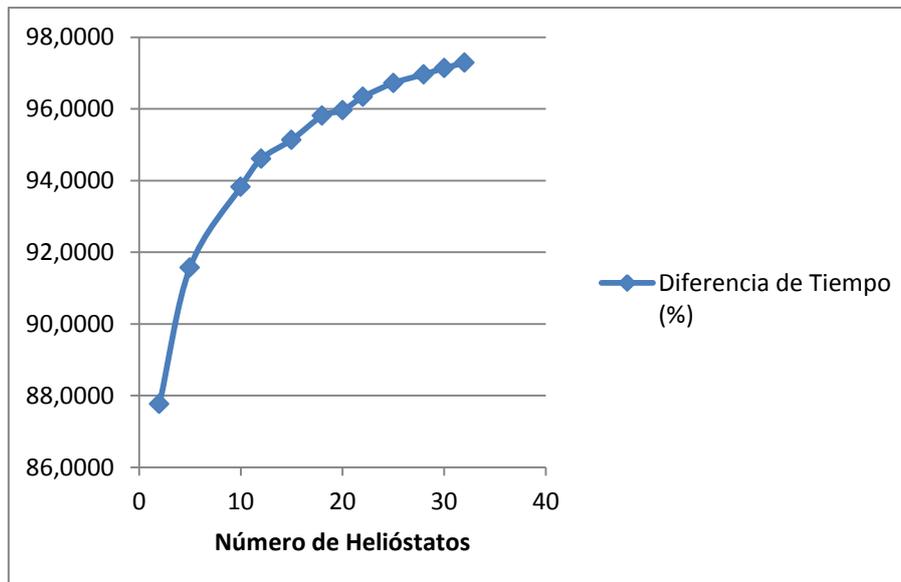


Figura 4.2.- Evolución del impacto del factor de bloqueo y sombreado (y operaciones derivadas) con el número de heliostatos sobre los diseños optimizados.

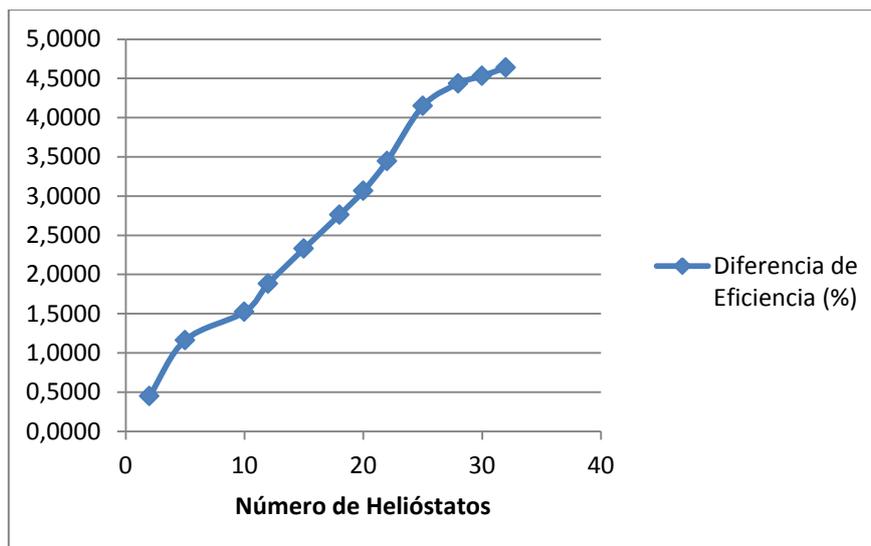


Figura 4.3.- Evolución del impacto de la consideración del factor de bloqueo y sombreado con el número de heliostatos sobre la evolución del rendimiento sobre los diseños optimizados.

Respecto a la otra fuente de datos previamente presentada para el estudio del impacto computacional del factor de bloqueo y sombreado en el rendimiento óptico, la selección directa y sistemática de un conjunto de posiciones disponibles, se ha repetido el mismo procedimiento. Estas posiciones se generan tras el mismo muestreo circular denso que determina las soluciones candidatas para la optimización de la segunda vertiente, recordando la importante diferencia de que se necesitan, generan y seleccionan las necesarias, "N". Los datos para este segundo contexto se incluyen en la tabla 4.2, con el mismo formato y semántica definidas para la tabla 4.1.

H	TIEMPO			EFICIENCIA		
	TPC (s)	TPR (s)	Dif. T (%)	Ef. C [0,1]	Ef. R [0,1]	Dif. Ef. (%)
2	0,1134	0,0102	91,03	0,7496	0,7823	4,18
5	0,3534	0,0198	94,40	0,7250	0,7820	7,29
10	0,8340	0,0329	96,06	0,7082	0,7789	9,07
12	1,0289	0,0412	96,00	0,7067	0,7774	9,10
15	1,3745	0,0467	96,60	0,7055	0,7752	8,99
18	1,7754	0,0558	96,86	0,7051	0,7718	8,64
20	1,9663	0,0611	96,89	0,7049	0,7696	8,41
22	2,2556	0,0667	97,04	0,7046	0,7674	8,19
25	2,6775	0,0740	97,24	0,7037	0,7642	7,92
28	2,9877	0,0833	97,21	0,7016	0,7605	7,74
30	3,2785	0,0876	97,33	0,6998	0,7582	7,70
32	3,5924	0,0935	97,40	0,6968	0,7554	7,76

Subpromedio	1,8531	0,0561	96,17	0,7093	0,77	7,91
50	7,6155	0,1434	98,12	0,6706	0,7488	10,45
75	16,3335	0,2117	98,70	0,6407	0,7504	14,62
100	27,2774	0,2809	98,97	0,6239	0,7443	16,18
125	41,3709	0,3487	99,16	0,6147	0,7465	17,65
150	58,4717	0,4297	99,27	0,6036	0,7394	18,36
175	76,9004	0,4880	99,37	0,6013	0,7435	19,13
200	97,5246	0,5523	99,43	0,5943	0,7395	19,63
Promedio	18,3017	0,1646	97,21	0,6769	0,7608	11,10

Tabla 4.2.- Impacto de la orientación y cálculo del factor de bloqueo y sombreado de los heliostatos en el valor y tiempo de cómputo del rendimiento óptico sobre la selección sistemática de las posiciones generadas en un muestreo circular denso.

Seguidamente, y del mismo modo que se hizo con los datos de la tabla 4.1, se representan gráficamente los datos relativos a la diferencia porcentual tanto en tiempo como en eficiencia. Estas gráficas se encuentran en las figuras 4.3 y 4.4 respectivamente. Sin embargo, hay que destacar que no se incluyen en estas representaciones todos los datos generados en este segundo contexto, sino que se selecciona el mismo rango desde 2 a 32 heliostatos de la tabla 4.2 para que la comparativa visual entre ambos casos sea consistente.

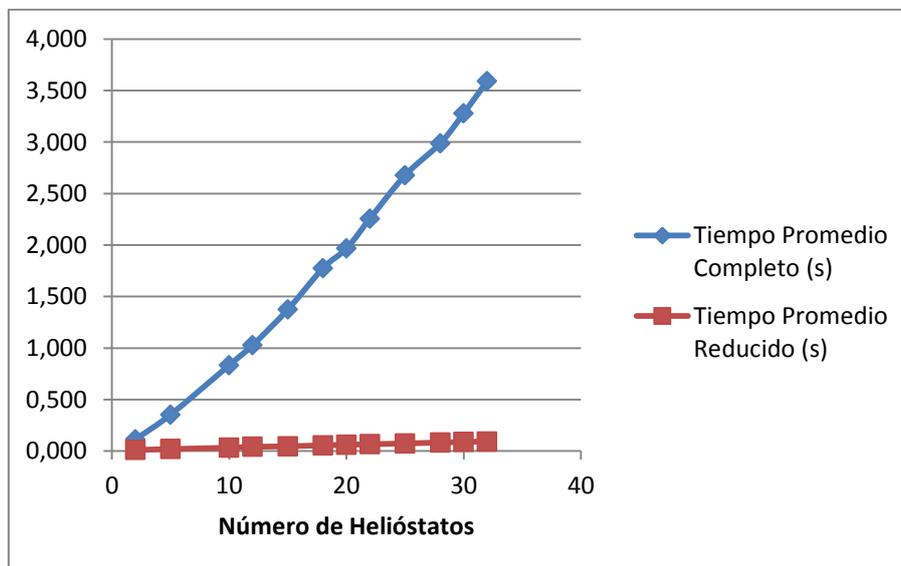


Figura 4.4.- Comparativa gráfica entre el tiempo de cómputo del rendimiento óptico con y sin orientación de heliostatos y factor de bloqueo y sombreado sobre los diseños obtenidos mediante selección directa de posiciones (rango [2, 32]).

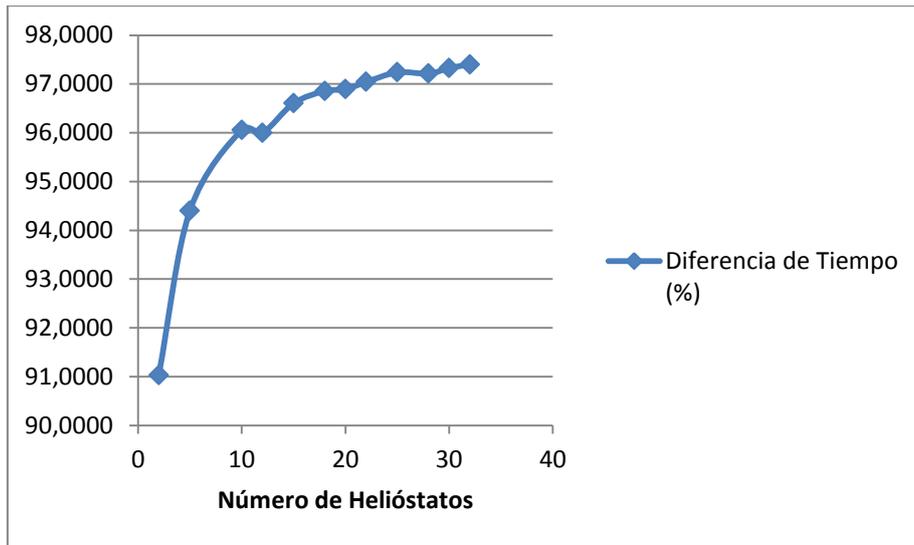


Figura 4.5.- Evolución del impacto del cálculo de la orientación y el factor de bloqueo y sombreado sobre el tiempo según el número de heliostatos sobre el diseño por selección directa (rango [2,32]).



Figura 4.6.- Evolución del impacto de la consideración del factor de bloqueo y sombreado con el número de heliostatos sobre la evolución del rendimiento sobre el diseño por selección directa (rango [2,32]).

Con los datos expuestos en las tablas 4.1 y 4.2, así como con las gráficas de las ilustraciones 4.1 a 4.6 derivadas de dichas tablas, se pueden realizar ciertas apreciaciones:

- En lo referente a la repercusión del factor de bloqueo y sombreado en el tiempo de cómputo del rendimiento óptico general, los resultados muestran un promedio de diferencia aproximado del 95% para el primer caso de estudio y del 97% para el segundo entre el tiempo que se emplea con y sin su cálculo. De hecho, cuando este factor es menos relevante, lo que se observa en el conjunto de diseños optimizados de la tabla 4.1, requiere algo menos del 90 % del tiempo total. Además, cuando su repercusión en el tiempo es máxima, ésta ronda el 99.5% del total. Esta situación, presente en la tabla 4.2, se da con 200 helióstatos en los resultados obtenidos de la segunda fuente de datos, los diseños sistemáticos sin optimizar.

El factor de bloqueo y sombreado depende, por definición, de la relación de cada helióstato con los demás, por lo que su impacto en el tiempo total de cómputo aumenta conforme asciende el total de helióstatos. Esta tendencia queda reflejada en las figuras 4.2 y 4.5, donde se aprecia cómo el proceso de cálculo de este factor cobra relevancia rápidamente sobre el coste temporal total, siguiendo un esquema aproximadamente logarítmico, y acercándose paulatinamente al 100%.

Teniendo en cuenta la diferencia porcentual entre el tiempo que se emplea en el cálculo del rendimiento óptico incluyendo el factor de bloqueo y sombreado en contraposición a no considerarlo, destaca también la disparidad en la magnitud y evolución de los tiempos propiamente dichos. Analizando las dos primeras columnas de las tablas 4.1 y 4.2 se puede apreciar que el tiempo que se emplea en calcular el rendimiento óptico sin el factor de bloqueo no solo es significativamente más bajo que cuando se considera, sino que muestra un comportamiento próximo a ser constante. Por el contrario, los tiempos en los que se incluye este factor son sensiblemente mayores y con una evolución aproximadamente lineal. Estos detalles se pueden apreciar en las figuras 4.1 y 4.4. Esta diferencia queda finalmente reflejada también en los promedios globales. En ambos casos se puede ver que la versión en la que se calcula también el factor de bloqueo y sombreado emplea de media 1,5749 y 18,3017 segundos en primer y segundo lugar respectivamente. Sin embargo, cuando este factor no se incluye, los tiempos medios generales bajan, de forma significativa, a 0,0564 y 0,1646 segundos respectivamente.

En base a lo expuesto queda demostrado empíricamente que el cálculo del factor de bloqueo y sombreado es un proceso que repercute muy significativamente en el tiempo total de ejecución y hace que el problema tratado pueda ser computacionalmente muy costoso. Por consiguiente, son comprensibles los esfuerzos tratados para reducir su complejidad de cálculo. Se entiende además en esta línea, al menos en términos de ahorro de tiempo, por qué ciertos autores optan por obviar su cálculo en ciertas situaciones.

- Tras confirmar empíricamente el “esfuerzo” que supone en el tiempo de cómputo calcular es interesante analizar también el impacto que supone en los valores de

eficiencia o rendimiento óptico medido en general. Como ya se ha comentado anteriormente, obviar un sub-factor para el cálculo de la eficiencia general es equivalente a asumirlo como máximo o "1". Por lo tanto, cualquier valor de eficiencia general que incluya un cálculo real del factor de bloqueo será, en el mejor de los casos, igual a uno en el que dicho factor se ignore. Sin embargo, la realidad es que, con que se produzcan ciertas interferencias por bloqueo y sombreado entre helióstatos en algunos momentos del día, habrá diferencias perceptibles entre el factor que calcula el rendimiento óptico y el que lo obvia sobre los resultados acumulados anualmente.

Observando los datos de las tablas 4.1 y 4.2 sobre esta diferencia de eficiencia, supone una discrepancia promedio del 2,86 en el primer caso y del 11,10 en el segundo, en el que se incluyen plantas solares considerablemente más grandes. La máxima diferencia llega a alcanzar el 4,64% con los 32 helióstatos del primer caso y el 19,6328% con los 200 del segundo. En ambos casos, la tendencia general de la diferencia entre valoraciones de eficiencia evidencia que, conforme crece el número de helióstatos a considerar, la eficiencia que calcula el factor de bloqueo y sombreado se va distanciando de la que lo ignora.

En este contexto sólo se puede afirmar que cualquier valor de rendimiento en el que se obvие el factor de bloqueo y sombreado en favor de agilizar los cálculos, especialmente sobre plantas de muchos helióstatos, supone una fuente de error añadida. Por tanto, debe considerarse cuidadosamente en circunstancias o etapas especiales (como hacen los autores mencionados) y no como un simple recurso de aceleración de los procesos.

- El mantenimiento de dos fuentes de datos separadas para estos experimentos, como se anticipa, permite también tener perspectiva comparativa del efecto del factor de bloqueo y sombreado sobre una distribución de helióstatos en posiciones meramente muestreadas (de forma densa, como agravante fundamental de la situación) y sobre distribuciones refinadas, en mayor o menor medida, por un proceso de optimización. En esta línea, y retomando las gráficas referenciadas para observar la evolución del tiempo de cómputo y los valores de eficiencia obtenidas, no hay duda de que ambos conjuntos "sucumben" al impacto del factor de bloqueo y sombreado en el crecimiento de los tiempos de cálculo y la diferencia entre considerar dicho sub-factor y no hacerlo. Sin embargo, es importante destacar que los diseños optimizados se muestran menos "vulnerables" al impacto del factor de bloqueo, tanto en diferencias de tiempo de cómputo como en la variación de los valores de rendimiento óptico.

En el tiempo de cómputo la diferencia es bastante leve ya que, considerando los promedios en el rango común desde 2 hasta 32 helióstatos, con los diseños

optimizados es del 94,92% mientras que para el diseño sistemático se eleva ligeramente hasta un 96,17%. Sin embargo, respecto a las valoraciones de eficiencia, la diferencia es más importante entre ambos conjuntos de datos: En aquel que promedia los valores de campos solares “refinados”, las diferencias entre rendimiento completo y reducido se mueven aproximadamente entre el 0.5% y el 5% en evolución estrictamente creciente y con un promedio del 2,86%. Por el contrario, en el diseño denso sin optimizar, las diferencias abarcan valores desde el 4% hasta el 9% aproximadamente, sin una dinámica constante y con un elevado promedio del 7,91%.

Este tercer punto de vista colectivo, especialmente teniendo en cuenta que la “valía” individual de los diseños optimizados queda diluida en el promedio realizado y el bajo número de helióstatos considerado (en comparación con grandes plantas reales), refleja la relevancia de tratar con diseños optimizados convenientemente. En este tipo de situaciones donde la fuente de error de obviar el factor de bloqueo y sombreado esté relativamente atenuada sí es menos arriesgado llevar a cabo esta práctica. De hecho, y como se menciona en la bibliografía donde se realiza esta simplificación, se indica que se está en un contexto circunstancial en el que, por el diseño de base, este factor se minimiza y pierde relevancia.

4.4.- Resultados de la paralelización del modelo de rendimiento

La paralelización del modelo de rendimiento óptico del campo solar, tal y como se describe en la sección 3.5.14, pretende distribuir la carga computacional del algoritmo 3.1 entre varias unidades de proceso concurrente para acelerar la ejecución de la simulación. De esta forma se espera que los procesos de optimización, que requieren múltiples cálculos del rendimiento óptico, se aceleren.

La experimentación realizada se basa en el cálculo del rendimiento óptico no ponderado y “completo”, es decir, con todos los sub-factores y procesos descritos en el tercer capítulo. El motivo fundamental de esta decisión es que se incluyan los procesos más costosos y, por tanto, que más interesa acelerar. Según lo expuesto, y como en la sección anterior se calculaba el mismo tipo de rendimiento de forma secuencial (“en serie”), se aprovechan las mediciones ya realizadas para el conjunto de datos desde dos hasta doscientos helióstatos. Para obtener los tiempos de cálculo en paralelo se repiten las mediciones de esos mismos diseños sistemáticos, también con cincuenta repeticiones y haciendo uso esta vez de la versión paralelizada con OpenMP desarrollada. Nótese además que en este caso no se recurre al primer conjunto de datos que se aplicó también en la sección anterior por no considerar que pueda aportar información relevante adicional.

En lo referente a los resultados obtenidos para este estudio, se incluyen en la tabla 4.3 combinando, según el número de helióstatos y combinando los tiempos del cálculo en serie y paralelo. La información presente en dicha tabla, que puede complementarse con los datos del apéndice D sección 2, tiene las siguientes columnas:

- **Número de Helióstatos "H"**: Indica el número de helióstatos distribuidos en la superficie de la tabla en el momento de realizar la medición. El rango va en este caso desde 2 hasta 200 helióstatos.
- **Tiempo Promedio Completo SECUENCIAL "TPCS"**: Se indica, en segundos, el tiempo de cómputo del rendimiento óptico no ponderado de la distribución correspondiente, considerando todos los sub-factores tratados en el tercer capítulo. Como se refleja además en el nombre de la columna, los valores se han promediado a partir del tiempo empleado por la versión secuencial del modelo de rendimiento.
- **Factor de Aceleración "G"**: En esta columna se incluye el factor de aceleración logrado en el tiempo de cálculo de la versión paralela sobre la secuencial. Su valor se determina mediante la división del tiempo "en secuencial" entre el tiempo "en paralelo". Se recuerda que la experimentación se ha realizado en el "Tercer Equipo, que, como se indica en la sección de materiales, con doble núcleo. De esta forma, existe un factor de aceleración máximo teórico igual a 2.

Además, se realiza una representación gráfica del factor de aceleración logrado según el número de helióstatos del problema en la figura 4.7.

H	TPCS (s)	G
2	0,1134	1,1073
5	0,3534	1,1270
10	0,8340	1,3724
12	1,0289	1,2036
15	1,3745	1,2587
18	1,7754	1,2670
20	1,9663	1,2904
22	2,2556	1,3281
25	2,6775	1,3258
28	2,9877	1,3702
30	3,2785	1,3696
32	3,5924	1,2950
50	7,6155	1,5434
75	16,3335	1,4930
100	27,2774	1,5751
125	41,3709	1,5747

150	58,4717	1,5068
175	76,9004	1,5612
200	97,5246	1,5799
Promedio	18,3017	1,3763

Tabla 4.3.- Resultados principales del estudio comparativo del tiempo de cálculo del rendimiento óptico secuencial frente a la versión paralela.

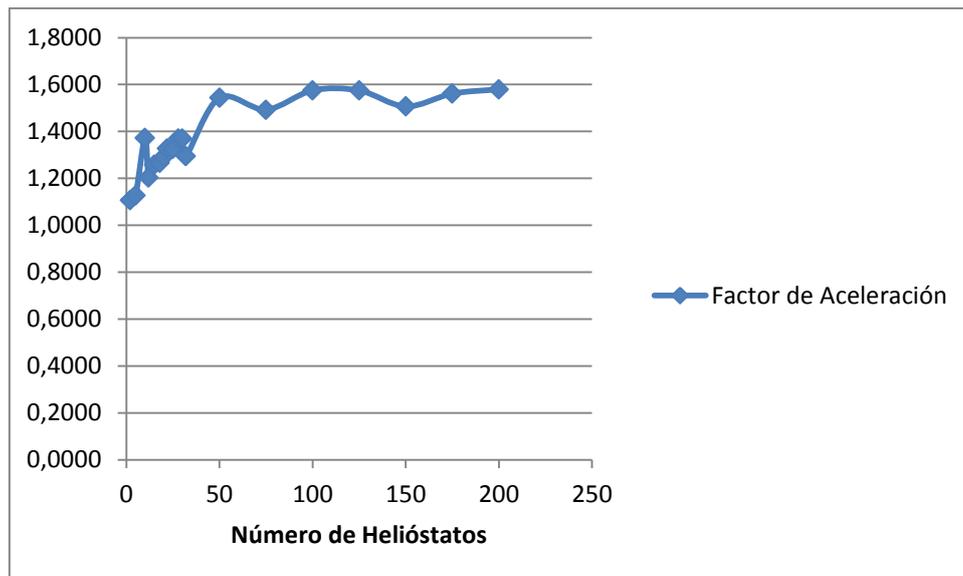


Figura 4.7.- Evolución del factor de aceleración logrado por la paralelización según el número de heliostatos.

De los datos presentados tanto en la tabla 4.3 se puede extraer la siguiente conclusión: con la paralelización se logra una aceleración apreciable que aumenta con el número de heliostatos e igual a 1,3763 en promedio. Por consiguiente, para realizar los mismos cálculos sobre el mismo computador de experimentación se logra reducir el tiempo necesario explotando su arquitectura paralela de doble núcleo.

Entrando en detalles, en el caso en el que la aceleración lograda es menor, con el mínimo número de heliostatos, es igual 1,1073. Por el contrario, cuando ésta es máxima, con el máximo número de heliostatos, la aceleración lograda asciende a 1,5799. Además, como se ilustra en la figura 4,7, la tendencia global de la aceleración es la de aumentar con el tamaño de la central de forma atenuada. Este comportamiento se explica fácilmente recordando que la paralelización se hace tomando como referencia las operaciones sobre cada heliostato. De esta forma, al contar con más heliostatos, la explotación del paralelismo tiene más repercusión potencial. En esta línea es importante destacar que el factor de bloqueo y sombreado en las plantas diseñadas a partir del muestreo superficial denso que se han estudiado tiene un impacto mayor que en los diseños realmente depurados, tal y como se

mostró en la sección anterior. Por tanto, en casos en los que su cálculo sea menos relevante, es de esperar que la aceleración lograda también sea inferior.

Es también interesante resaltar que la aceleración lograda, 1,3763 en promedio, dista del límite ideal de 2 derivado de las características del equipo de pruebas. No obstante, se insiste en que la tendencia general mostrada por el factor de aceleración parece ser la de crecer levemente conforme crece el tamaño del campo solar.

En cualquier caso, teniendo en cuenta el elevado número de helióstatos en plantas reales, la tendencia a aumentar la aceleración y que la paralelización propuesta en la sección 3.5.14 no se limita al cálculo del factor de bloqueo y sombreado sino a todo el proceso, no se encuentra ninguna desventaja real en trabajar con la versión paralela del modelo de rendimiento. De hecho, se logra acelerar el proceso de forma sencilla como se pretendía. Por consiguiente, se mantiene esta implementación paralela del modelo de rendimiento para el resto de experimentos y, especialmente, para los procesos de optimización.

Finalmente, de forma complementaria, se ha llevado a cabo un análisis del rendimiento de la versión paralela. Para ello se ha realizado otro estudio computacional sobre otra arquitectura. En concreto se ha hecho uso del denominado "Cuarto Equipo" (véase subsección 3.3).

En la tabla 4.4 se incluyen, para cada instancia, la aceleración alcanzada por la versión paralela cuando ésta se ejecuta con 2 y 4 hilos. En dicha tabla se tienen la siguiente estructura, con su nomenclatura asociada:

- **Número de Helióstatos "H"**: En esta columna se indica simplemente el tamaño del campo solar cuyo rendimiento óptico se ha estudiado en cada caso.
- **Factor de Aceleración con 2 hilos "G(2)"**: Se trata del factor de aceleración logrado por la versión paralela que crea 2 hilos de proceso en cada instancia.
- **Factor de Aceleración con 4 hilos "G(4)"**: Esta columna, de forma análoga a la anterior, muestra del factor de aceleración logrado por la versión paralela en cada instancia y creando esta vez 4 hilos de proceso.

En base a la información incluida en dicha tabla, resulta evidente que el factor de aceleración promedio logrado es inferior a su límite teórico. Esta diferencia es además bastante más significativa en el caso en el que se lanzan 4 hilos. Si bien es cierto que los tiempos se han reducido paulatinamente al aumentar el número de hilos de proceso y que la aceleración promedio es mayor con 4 que con 2, resulta también evidente la degradación de la eficiencia al no "amortizar" (aumentar la aceleración), tanto como cabría esperar, el aumento del número de procesadores. Además, teniendo en cuenta que una versión paralela escala si la aceleración mejora conforme el tamaño del problema a resolver aumenta, esta propiedad sólo se aprecia con relativa claridad al emplear 4 hilos. Por el

contrario, en la ejecución con 2 hilos y a diferencia de la tendencia mostrada en las pruebas originales realizadas sobre el “Tercer Equipo”, el factor de aceleración parece disminuir muy levemente conforme aumenta el tamaño de las instancias.

Según estos experimentos alternativos se observa que la paralelización del modelo de rendimiento óptico básicamente cumple con el objetivo de reducir el tiempo de cómputo. Sin embargo, los factores de aceleración logrados y su evolución al aumentar el número de unidades de proceso reflejan que se trata de una paralelización no especialmente refinada.

H	G(2)	G(4)
2	1,0189	0,7354
5	1,2757	1,3181
10	1,5319	1,6963
12	1,5062	1,7712
15	1,4736	1,7877
18	1,5289	1,7683
20	1,5262	1,8091
22	1,3600	1,7240
25	1,4976	1,7358
28	1,2646	1,7941
30	1,2968	1,8174
32	1,5387	1,8046
50	1,6356	1,8783
75	1,6322	1,9560
100	1,6889	2,0293
125	1,6767	1,9396
150	1,5785	2,0830
175	1,5671	2,1179
200	1,4882	2,0114
Promedio	1,4782	1,7777

Tabla 4.4.- Evolución del factor de aceleración logrado por la paralelización según el número de helióstatos con 2 y 4 hilos.

4.5.- Muestreos alternativos aplicados sobre el tiempo

Uno de los aspectos que se trata en el tercer capítulo, derivado de la mención que se hace en [NOO12] al respecto, es la opción de muestrear el tiempo de forma irregular en el cálculo del factor de rendimiento óptico. Se persiguen así dos objetivos, reducir el tiempo de ejecución del modelo de rendimiento evitando muestras innecesarias, y evitar la inclusión de

medidas de poca relevancia que falseen la valoración del rendimiento óptico para un cierto diseño. Se propusieron entonces, siguiendo las pautas dadas en [NOO12], dos métodos para llevar a cabo el muestreo del tiempo correspondiente a un día intentando concentrar el mayor número de mediciones del modelo de rendimiento óptico en el tramo central de cada día. Los métodos en cuestión, cuya descripción se encuentra en la sección 3.5.12, son los denominados “Parabólico” y “Segmentado”.

Para recoger el resultado de emplear estos sistemas, se estudió el número de muestras que generan en el periodo de un año sobre la central estudiada. Se registró además la valoración que dan (tanto ponderada como sin ponderar) para la distribución de treinta y dos helióstatos obtenida mediante la optimización realizada con un optimizador voraz sobre un conjunto de posiciones disponibles (de la conocida como “segunda vertiente” del problema de optimización definido) así como el tiempo que emplean con cada caso (utilizando ya en general la versión paralela del modelo de rendimiento). En esta situación se han aplicado, en total, cuatros muestreos o “cronómetros” distintos, que se especifican a continuación:

- Caso A: Muestreo constante con una medición cada hora.
- Caso B: Muestreo constante con una medición cada minuto.
- Caso C: Muestreo parabólico con un mínimo de 1 muestra por minuto y un máximo de 1 muestra cada 30 minutos. Su configuración para estos parámetros se detalla en la sección 3.5.12.2.
- Caso D: Muestreo segmentado en el que se toma el 25% central del día como de interés alto con una medición por minuto, el 41.67% siguiente como de interés medio con una medición cada 5 minutos y el 33.33% restante del día como de interés bajo con una medición cada 30 minutos. Su configuración para estos parámetros se detalla en la sección 3.5.12.3.

En lo referente a los resultados obtenidos con el mencionado diseño de treinta y dos helióstatos, los datos relevantes se incluyen en la tabla 4.5. Los tiempos en promedio que se dan, se puede encontrar información adicional en el anexo D sección 3. Se menciona además que se han llevado a cabo 10 repeticiones en este caso. El motivo es que el objetivo principal del experimento es la obtención del número de mediciones realizadas al año. El tiempo de cálculo es, por lo tanto, una consecuencia derivada de las mediciones que se realizan.

La estructura y nomenclatura seguidas en la tabla 4.5 es la que se describe a continuación:

- **Tipo de Muestreo “TM”**: En esta columna se especifica el tipo de muestreo del tiempo que se aplica siguiendo la nomenclatura que se indica previamente.
- **Número de Muestras Anual “NMA”**: En esta columna se incluye el número total de mediciones que cada tipo de muestreo requiere realizar en el periodo de un año.

- **Tiempo Promedio Sin Ponderación “TPS.”:** En esta columna se incluye el tiempo de cómputo empleado para la ejecución del modelo de rendimiento óptico sin considerar la intensidad de radiación.
- **Eficiencia Sin Ponderación “Ef. SP”:** En esta columna se incluye la valoración del rendimiento óptico generada, siguiendo un cierto tipo de muestreo, sin considerar la intensidad de radiación.
- **Tiempo Promedio con Ponderación “TPP”:** En esta columna se incluye el tiempo de cómputo empleado para la ejecución del modelo de rendimiento óptico incluyendo esta vez la intensidad de radiación.
- **Eficiencia con Ponderación “Ef. P”:** En esta columna se incluye la valoración del rendimiento óptico generada, siguiendo un cierto tipo de muestreo, sin considerar la intensidad de radiación.

TM	NMA	SIN PONDERACIÓN		CON PONDERACIÓN	
		TPSP	Ef. SP [0,1]	TPP	Ef. P [0,1]
Caso A	4563	2,3625	0,7210	2,3631	0,7781
Caso B	263027	134,6803	0,7404	137,8652	0,7776
Caso C	67865	34,1760	0,8004	34,1946	0,8171
Caso D	175510	88,7394	0,7886	89,1700	0,8010

Tabla 4.5.- Número de muestras anuales, tiempos y valores de eficiencia con y sin ponderación según el tipo de muestreo temporal sobre el diseño de treinta y dos helióstatos optimizado de forma voraz sobre posiciones disponibles.

Respecto a la interpretación de los resultados de la tabla 4.5, y tomando como referente más realista el muestreo constante con una medición por minuto, no hay duda de que tanto el muestreo parabólico como el segmentado toman al año un menor número de muestras. De forma más concreta, suponen un 25,8% y un 66,7% del esquema de referencia respectivamente. La consecuencia directa de esta situación se aprecia en los tiempos de cálculo, ya que a mayor número de mediciones del modelo de rendimiento, mayor es el tiempo total de ejecución. En esta línea, el primer tipo de muestreo incluido en la tabla, el constante con intervalo de una hora, es el que permite obtener unos resultados sustancialmente más rápidos por el menor número de mediciones totales que acarrea.

Sobre los tiempos de cálculo incluyendo y sin incluir la ponderación con la intensidad, como se puede apreciar, son muy similares como consecuencia de la sencillez del modelo de densidad de radiación empleado. No obstante, se muestran levemente mayores para el

cálculo que incluye ponderación. Esto se debe fundamentalmente al coste adicional, bajo (por el modelo de estimación seleccionado) aunque prolongado, de calcular la intensidad en cada punto de medición. Es también interesante comentar, como curiosidad, que la inclusión de la intensidad lleva a una mejor valoración del diseño estudiado en todos los casos. Esta medición, como se observa, alcanza un mayor valor con el muestreo segmentado y parabólico. Este aspecto está propiciado directamente por el simple hecho de que estos dos tipos de muestreos recogen más mediciones en las horas centrales del día, cuando la intensidad de radiación solar incidente es mayor. Por consiguiente, se puede tomar este detalle como confirmación de que, efectivamente, estos dos enfoques valoran especialmente las horas centrales del día reflejándose así en la valoración ponderada.

En cualquier caso y con la perspectiva que se tiene, no se puede afirmar realmente hasta qué punto es más acertado un cierto sistema de muestreo temporal sobre otros para determinar el rendimiento óptico. Se trata entonces de datos con un valor mayormente testimonial. Siguiendo a [NOO12], es presumible que las formas de muestreo del tiempo que lleven a valoraciones de rendimiento más ajustadas a la realidad sean la parabólica y la segmentada (o alternativas similares), aunque hay que tener en cuenta que no se ha llevado a cabo una comprobación externa para poder confirmarlo.

4.6.- Resultados del proceso de optimización sobre la distribución de los helióstatos

4.6.1.- Presentación

El problema de optimización que se pretende resolver, como se aborda en el tercer capítulo, se divide en dos variaciones o vertientes. En la que se denomina como primera, se optimizan los parámetros que definen de forma intensiva el conjunto de posiciones de los helióstatos a partir de un modelo de diseño para maximizar el rendimiento óptico del campo solar resultante. En la segunda, en contraposición, se utiliza un método de muestreo superficial denso para generar un conjunto de posiciones disponibles sobre las que seleccionar el subconjunto que maximiza, de nuevo, el rendimiento óptico del campo solar generado.

Es interesante recordar el detalle de que en ambos casos hay realmente involucrado un “modelo de diseño”. La diferencia radica en que el que se emplea para generar un conjunto de posiciones disponibles no es configurable, simplemente pretende distribuir las posiciones lo más cerca posible unas de otras para realizar meramente un muestreo superficial. Este sistema es, además, inadecuado por definición al potenciar las comentadas interferencias entre helióstatos para su aplicación como modelo de diseño “directo”. Por estos motivos se utiliza simplemente para muestrear la superficie y generar un conjunto de posiciones

aproximable por una cierta superficie continua. Por el contrario, el que sí se nombra generalmente como “modelo de diseño”, y se aplica para la primera vertiente, sí puede ser configurado y tiene un funcionamiento orientado a la generación de distribuciones eficientes. Con la combinación de estos dos enfoques descritos se llega a una situación para realizar la comparativa entre los optimizadores mencionados en la que se “acotan los extremos” del proceso que se sigue por ejemplo en [RAM12]: En este caso se utiliza un modelo de diseño de forma directa (sin post-selección de posiciones) y, por otro, se intenta muestrear directamente una superficie completa, manteniéndose ambas situaciones independientes. Sin embargo, en [RAM12] se genera un conjunto de posiciones mayor al necesario, aunque siguiendo un criterio estudiado y configurable en lugar de sistemáticamente denso.

Tras recordar brevemente los términos que definen la situación para el estudio de los optimizadores, se menciona que la central solar en la que se realiza la comparativa es la definida en la sección 4.2. Por tanto, el muestreo del tiempo se hace con un esquema constante de una medición por hora. Para el estudio se hace uso del modelo de rendimiento en su versión paralelizada como función objetivo de base. Se añade también que el rendimiento óptico que se calcula en los procesos de optimización no está ponderado con la intensidad, lo cual es equivalente a considerarla como unitaria sobre la expresión 3.26. Estas decisiones, junto con el tamaño reducido de los helióstatos y la distribución de pocas muestras sobre los mismos que buscan atenuar el tiempo total empleado se pueden tomar con cierta libertad dado el contexto puramente académico del proyecto y, especialmente, que el objetivo en última instancia es el estudio comparativo entre tres algoritmos de optimización en general. Por consiguiente, y como se declara ya en la sección 4.2, es suficiente con crear un contexto común en el que los optimizadores puedan evaluarse o “competir” en igualdad de condiciones.

Se indica finalmente que en la subsección 4.6.2 se tratarán los resultados obtenidos para la segunda variante del problema planteado y, posteriormente en la sección 4.6.3 aquellos procedentes de la primera variante. Se realiza, de esta forma, una inversión en el orden que por la denominación dada se les podría presuponer.

4.6.2.- Resultados de la optimización realizada sobre la segunda variante del problema

El rango de diseños abarcado en los procedimientos de optimización va desde la distribución de 2 hasta 32 helióstatos, sumando un total de 12 instancias distintas. En cada caso se ha contado con un conjunto de posiciones disponibles igual al triple de helióstatos que se pretendía ubicar (con un límite de 100 posiciones). Este conjunto de posiciones se ha generado mediante la aplicación del muestreo circular denso, descrito en el tercer capítulo,

y la selección ordenada del número de ubicaciones requeridas. Nótese que, como es de suponer, los tres optimizadores han contado para cada instancia a resolver con las mismas posiciones, así como con las mismas condiciones definidas, sobre la supuesta central.

Se añade además que, por el importante coste temporal del proceso de optimización, los tiempos que se dan son en base a cinco mediciones consecutivas únicamente. En cualquier caso, y teniendo en cuenta que se da una mayor importancia a los resultados logrados que al tiempo preciso empleado, se asume admisible.

En la tabla 4.6 se incluyen los resultados generales obtenidos mediante los tres optimizadores aplicados a un conjunto de posiciones disponibles. En el apéndice D sección 4 se incluye además información complementaria. Los contenidos de la tabla 4.6 se describe a continuación:

- **Algoritmo “Alg.”**: En esta columna se incide simplemente el algoritmo al que corresponden los resultados de las columnas contiguas.
- **Número de Helióstatos “H”**: En esta columna se define el tamaño del problema a optimizar, indicándose en primer lugar el número de helióstatos a ubicar, seguido del símbolo “/” y del total de posiciones disponibles.
- **Tiempo Promedio “TP”**: En esta columna se incluye el tiempo promedio que emplean los optimizadores en la resolución de cada instancia.
- **Eficiencia Mínima “Ef. Min.”**: En esta columna se incluye, para cada instancia, la eficiencia del peor resultado obtenido por los optimizadores estocásticos.
- **Eficiencia Promedio “Ef. P.”**: Esta columna contiene la eficiencia de los resultados que logran los optimizadores para cada instancia. En el caso de los métodos estocásticos se trata efectivamente de un promedio obtenido a partir de las distintas soluciones encontradas. Sin embargo, para el OV, que siempre encuentra una misma solución para cada instancia al ser determinista, se trata simplemente de la eficiencia de dicha solución única.
- **Eficiencia Máxima “Ef. Max.”**: En esta columna se incluye la eficiencia del mejor resultado logrado, para cada instancia, por los optimizadores estocásticos.
- **Desviación Típica “DT”**: En esta columna se muestra la desviación típica asociada a los promedios de eficiencia de las soluciones obtenidas. Al igual que ciertas columnas previas, sólo es relevante para los dos optimizadores estocásticos.

Alg.	H	TP (s)	Función Objetivo			
			Ef. Min.	Ef. P.	Ef. Max.	DT
OV	2 / 6	0,8310	----	0,7770	----	----
	5 / 15	7,3442	----	0,7648	----	----
	10 / 30	48,0795	----	0,7509	----	----
	12 / 36	81,3618	----	0,7461	----	----
	15 / 45	165,4650	----	0,7412	----	----
	18 / 54	297,3440	----	0,7378	----	----
	20 / 60	438,0100	----	0,7357	----	----
	22 / 66	598,8712	----	0,7325	----	----
	25 / 75	925,7462	----	0,7275	----	----
	28 / 84	1538,7297	----	0,7229	----	----
	30 / 90	1739,9547	----	0,7202	----	----
	32 / 100	2335,5145	----	0,7210	----	----
Promedio	----	681,4376	----	0,7398	----	----
BAP	2 / 6	0,8792	0,7777	0,7779	0,7783	0,0003
	5 / 15	7,3332	0,7622	0,7635	0,7639	0,0007
	10 / 30	48,1770	0,7463	0,7482	0,7505	0,0016
	12 / 36	80,4244	0,7396	0,7408	0,7420	0,0010
	15 / 45	160,8636	0,7320	0,7350	0,7374	0,0020
	18 / 54	299,0658	0,7312	0,7327	0,7338	0,0011
	20 / 60	433,3778	0,7267	0,7275	0,7289	0,0009
	22 / 66	598,3338	0,7233	0,7250	0,7270	0,0016
	25 / 75	998,9310	0,7168	0,7178	0,7195	0,0011
	28 / 84	1482,4620	0,7112	0,7122	0,7137	0,0013
	30 / 90	1750,7340	0,7083	0,7087	0,7099	0,0006
	32 / 100	2264,8980	0,7090	0,7110	0,7140	0,0021
Promedio	----	677,1233	0,7320	0,7334	0,7349	0,0012
GASUB	2 / 6	64,8000	0,7783	0,7783	0,7783	0,0000
	5 / 15	170,0000	0,7649	0,7649	0,7649	0,0000
	10 / 30	384,6000	0,7515	0,7522	0,7529	0,0005
	12 / 36	492,4000	0,7466	0,7471	0,7478	0,0005
	15 / 45	695,6000	0,7419	0,7422	0,7424	0,0002
	18 / 54	950,4000	0,7378	0,7387	0,7401	0,0009
	20 / 60	1131,6000	0,7352	0,7357	0,7361	0,0004
	22 / 66	1322,2000	0,7315	0,7318	0,7323	0,0003
	25 / 75	1688,0000	0,7267	0,7269	0,7273	0,0003
	28 / 84	1932,6000	0,7209	0,7213	0,7224	0,0006
	30 / 90	2149,4000	0,7176	0,7183	0,7189	0,0006
	32 / 100	2450,8000	0,7199	0,7214	0,7226	0,0010
Promedio	----	1119,3667	0,7394	0,7399	0,7405	0,0004

Tabla 4.6.- Resultados principales del proceso de optimización sobre la segunda vertiente.

Nótese que, como se observa sobre la propia tabla 4.6, se incluyen promedios relevantes del tiempo la eficiencia y la desviación típica (de métodos estocásticos) sobre los resultados de cada optimizador.

En las figuras 4.8 y 4.9 se representan gráficamente la evolución de la eficiencia o rendimiento óptico de las soluciones de cada optimizador y del tiempo que emplean en obtenerlas, según el número de helióstatos, respectivamente.

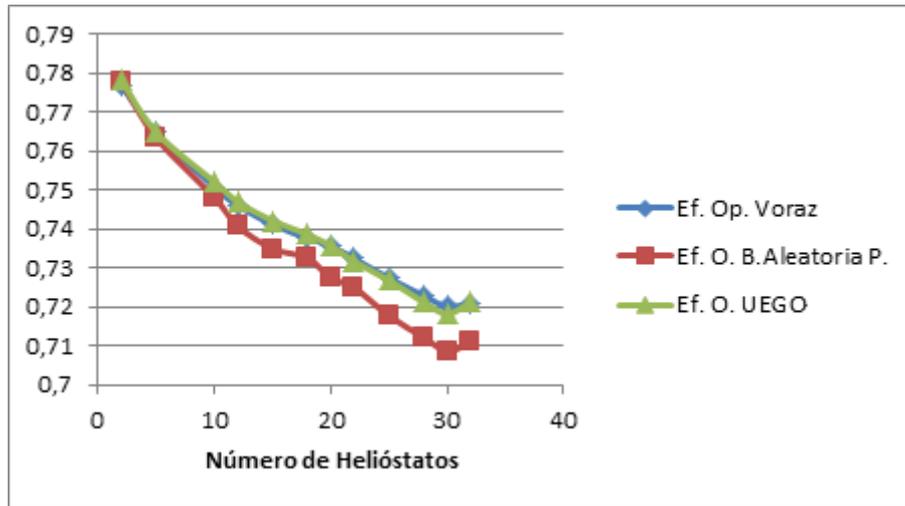


Figura 4.8.- Eficiencia promedio de las soluciones obtenidas en la optimización por posiciones según el optimizador y el número de helióstatos.

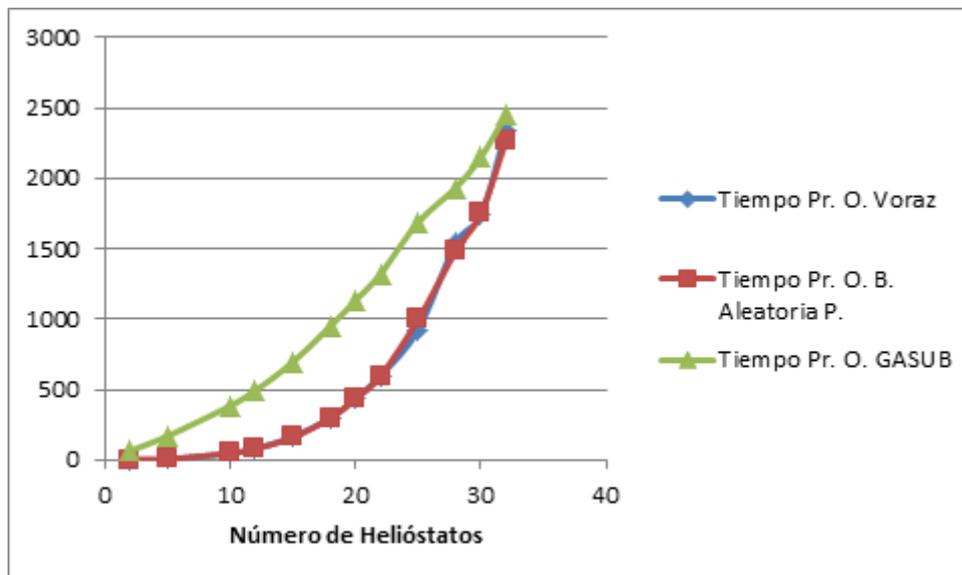


Figura 4.9.- Tiempo promedio de las soluciones obtenidas en la optimización por posiciones, según el optimizador y el número de helióstatos.

Respecto a la configuración de los optimizadores para obtener los resultados, mostrados en la tabla 4.6 y las figuras 4.8 y 4.9, hay que tener en cuenta que el OV no es configurable. Sin embargo la BAP y GASUB sí han de ser ajustados. Por consiguiente, se ha empleado el OV como referencia para su configuración. De esta forma, la experimentación del OV fue la primera que se llevó a cabo. El proceso de configuración para la BAP y GASUB se describe brevemente a continuación:

- La configuración realizada sobre la BAP consistió únicamente en determinar un límite de iteraciones que mantuviera la búsqueda una cantidad de tiempo similar a la referencia voraz. Este ajuste se hizo, para cada instancia, mediante prueba y verificación. Se pretende así que este optimizador no disponga de una condición significativamente ventajosa para lograr mejores resultados que los otros. El número de iteraciones empleado para cada una de las doce instancias, a título de curiosidad, va desde 10 (para 2 sobre 6) hasta 948 (para 32 sobre 100) conforme aumenta el coste de evaluación de la función objetivo, el modelo de rendimiento óptico, con el número de helióstatos involucrado en las soluciones candidatas.
- La configuración de GASUB fue mucho más compleja que la del optimizador de BAP al basarse en cuatro parámetros de impacto relativamente indirecto en lugar de uno directo. Sin embargo, para GASUB no se dio relevancia a lograr un tiempo de resolución de cada instancia acorde a los otros dos. Por el contrario, se tomó como referencia la instancia de mayor tamaño, “32 sobre 100”, por considerarse la más importante y próxima a la realidad. El valor de los cuatro parámetros de usuario escogidos (longitud máxima de la lista de especies, niveles de búsqueda, radio mínimo de búsqueda y cota superior de iteraciones, como se menciona al hablar sobre UEGO y GASUB) se fijó para todos los casos, en base al tiempo empleado y los resultados alcanzados para la mayor instancia. Como es de suponer, y se puede observar también en los datos de la tabla 4.6, esta configuración genera desigualdad de condiciones para la comparativa en instancias de menor tamaño. Esta situación repercute directamente en el tiempo empleado por GASUB frente a los otros, e indirectamente sobre la calidad de los resultados que puede obtener.

En cualquier caso, se acordó seguir este criterio con los tutores del proyecto por el gran coste temporal que supone buscar la configuración más ajustada de los cuatro parámetros de usuario mencionados para cada caso. Piénsese por ejemplo que para llegar a la configuración escogida para GASUB se probaron varias decenas de combinaciones distintas. Además, al tratarse del problema de mayor tamaño, se considera el más próximo a centrales de torre reales y, por tanto, la instancia más importante.

La configuración escogida finalmente se muestra a continuación:

- Cota superior de 3000 evaluaciones de la función objetivo.
- Máximo de 4 especies permitidas.
- 70 niveles de búsqueda.
- Radio mínimo de 1.

La tendencia general mostrada para este problema fue que una cota de evaluaciones relativamente baja, con un número reducido de especies admitidas y un número elevado de niveles permitía obtener soluciones bastante refinadas (y en tiempo similar a los otros optimizadores, para las instancias mayores).

En lo referente a los resultados generales obtenidos de los tres optimizadores aplicados al problema basado en posiciones (o “en su segunda vertiente”), se pueden hacer varias observaciones.

En primer lugar, se pueden analizar los tiempos que aplican los optimizadores en su búsqueda junto con su evolución, plasmada en la figura 4.9. Observando estos datos no cabe duda de que se trata de un proceso significativamente costoso con un importante crecimiento conforme aumenta el número de helióstatos a distribuir y, especialmente, el número de posiciones disponibles. Teniendo en cuenta el sistema de configuración empleado, el OV es el principal responsable de esta tendencia en los tiempos. Pensando cómo se lleva a cabo la búsqueda voraz, es el número de opciones el que determina la base del número de evaluaciones a realizar y, por extensión, el tiempo empleado que se toma como referencia.

Si se estudia por ejemplo la situación “32 helióstatos sobre 100 posiciones”, ilustrada en la figura 4.10, el OV realiza en primer lugar 100 evaluaciones con 1 helióstato antes de tomar su primera decisión y ubicar el primero. A continuación, y tras fijar la primera posición, deberá evaluar 99 opciones sobre 2 helióstatos mientras va moviendo el segundo hasta fijarlo. Seguidamente se llevarán a cabo 98 evaluaciones de rendimiento óptico con 2 helióstatos fijados y 1 en proceso de selección. Este proceso avanzará sucesivamente, añadiendo el tiempo de evaluaciones sucesivamente más costosas hasta sumar finalmente las 68 correspondientes a la selección de la última posición con 31 helióstatos fijos y 1 en fase de búsqueda.

La evaluación puntual del rendimiento óptico para un diseño con un cierto número de helióstatos, atendiendo a los tiempos obtenidos en los estudios complementarios de secciones anteriores, no supone un problema significativo de tiempo para el rango de helióstatos manejado incluso aunque se calculen todos los sub-factores. Este coste individual se atenúa aún más teniendo en cuenta que se emplea la versión paralelizada del modelo de rendimiento. Sin embargo, el propio procedimiento que sigue la búsqueda voraz con una función de selección que reúne tantas “sub-soluciones” hace que el tiempo de su optimización se vuelva rápidamente muy difícil de asumir. Como ya se ha comentado, el tomar la búsqueda determinista voraz como referente para la configuración de la BAP (sobre

cada caso) y de GASUB (a partir de la mayor instancia) lleva a “forzar” a los dos optimizadores estocásticos a mantener su búsqueda un tiempo relativamente similar. De hecho, dado que la BAP se ajusta para cada instancia, esta igualdad con el OV se hace patente en la gráfica 4.9 y en el promedio total de tiempo que emplea. Por el contrario, GASUB sólo emplea un tiempo similar para los casos mayores y próximos al que determinan su configuración. Este “desfase” de tiempos, anticipado al hablar sobre las circunstancias de su configuración, hace que en promedio GASUB emplee casi el doble de tiempo que los otros dos optimizadores.

Teniendo en cuenta lo expuesto, es importante destacar finalmente sobre los tiempos de búsqueda que no habría problema alguno en llevar al optimizador GASUB, y especialmente al de BAP, a completar su proceso significativamente más rápido. Este aspecto puede llegar a ser muy relevante según el problema que se trate de abordar, trascendiendo incluso el contexto de las centrales de torre definido.

En segundo lugar y respecto al aspecto más relevante, la validez de los diseños generados, el optimizador de BAP sólo puede competir en el caso más pequeño. En esta instancia las pocas soluciones candidatas, combinadas con el tiempo que se mantiene activo, le llevan a lograr resultados mejores que el OV y similares a los de GASUB (algo inferiores a éste, pero significativamente más rápido por la diferencia de ajustes). Sin embargo, conforme crece el tamaño de los problemas (la cantidad de soluciones candidatas), el optimizador BAP no tarda en situarse en el tercer puesto como peor opción global en base al promedio total. Esta degradación de resultados se refleja claramente en la figura 4.8.

El funcionamiento de la BAP, como se menciona en el segundo capítulo, es poco realista. Esperar que una selección no guiada y completamente aleatoria de soluciones obtenga resultados competitivos es muy improbable, incluso aunque la referencia temporal del OV sea elevada. Esta inestabilidad intrínseca se hace patente en la desviación típica de sus soluciones, que en promedio triplica a la de GASUB. De hecho, de no ser por el reducido tamaño de los problemas abordados, es seguro que las discrepancias generales en la valía de las soluciones serían mucho mayores. Hay que tener en cuenta además que las diferencias absolutas en términos numéricos pueden parecer irrelevantes, pero considerando el bajo tamaño de las instancias junto con la importancia de mejorar al máximo posible el rendimiento óptico de las centrales de torre, son dignas de tener en cuenta. Consiguientemente, y como se suponía, los candidatos que muestran rasgos de ser opciones reales a valorar son el OV y GASUB.

En referencia al comportamiento de los dos optimizadores considerados como principales, GASUB es capaz de superar al OV en 8 de 12 casos. Esta superación se aprecia también levemente en el promedio global de las soluciones “medias”, de forma más contundente en el de las “mejores soluciones” y quedando relativamente próxima incluso en el promedio de las “peores soluciones”. El OV sólo consigue mejorar a GASUB en el rango que va desde la

distribución de 22 hasta 30 helióstatos. En ese intervalo, la opción voraz es levemente superior en resultados y apreciablemente más rápida.

Es importante además tener en cuenta que, para la instancia clasificada como la más relevante y que determina la configuración global de GASUB, se logra superar a los otros dos optimizadores de forma clara. GASUB consigue en este caso diseños más eficientes en promedio y especialmente en el mejor resultado, en un tiempo promedio similar ya al de sus rivales. En base a este hecho, considerando que GASUB obtiene el mejor resultado en promedio general y en un mayor número de casos (en todos frente a BAP) de forma bastante estable, puede considerarse como la mejor opción. No obstante, se debe reconocer que la diferenciación entre la filosofía voraz y la metaheurística evolutiva de GASUB, en esta variante del problema basada en posiciones, no es tan significativa como se esperaba inicialmente.

En cualquier caso, en favor del desempeño de GASUB (especialmente en tiempo empleado) y sin entrar en que su naturaleza modular permitiría pensar en optimizadores locales alternativos, es importante recordar que se ha trabajado con la generalización de la mejor configuración para un único caso. Por este motivo, es de esperar que con una configuración refinada para cada caso o ajustada por grupos, lograra superar a sus otros dos rivales en todos los casos y en tiempos generalmente más similares. Su aleatoriedad intrínseca y bien dirigida en cada situación (a diferencia de la naturaleza incontrolable de BAP) debe poder imponerse, como mínimo en resultados, de forma estable. Se recuerda en esta línea que, en un conjunto de experimentos de naturaleza estocástica, la obtención puntual de un buen “mejor resultado” entre múltiples “malos” no es recomendable ni es garantía de éxito. Por lo tanto se deben considerar los valores medios y, especialmente, la desviación típica que muestran.

Desde una perspectiva colectiva, se puede apreciar la tendencia decreciente del rendimiento óptico de los diseños obtenidos por los tres optimizadores. Esta tendencia común, más o menos pronunciada según el optimizador concreto, ya se observaba en estudios preliminares. Es atribuible a que la distribución y disponibilidad de posiciones, en relación al número de helióstatos a emplazar, lleva a generar diseños paulatinamente más “deteriorados” en términos de rendimiento óptico.

Finalmente, y para recuperar la visión contextual del problema como la distribución de un cierto número de helióstatos entre un conjunto de posiciones disponibles tras haber tratado principalmente valores de rendimiento óptico asociados a soluciones, en la figura 4.10 se muestran las posiciones disponibles y la selección que hace cada optimizador en la instancia de 32 helióstatos sobre 100 posiciones. Se representan la única solución generada por el OV junto con las extremas (la mejor y peor valorada) de las obtenidas con BAP y GASUB. En cada caso su eficiencia o rendimiento óptico no ponderado asociado. Nótese también, sobre la figura 4.10, que por limitaciones en la precisión de la representación, se usa un radio de 1m de radio en lugar del radio exacto de $\sqrt{2}$ m asociado a las dimensiones de los espejos.

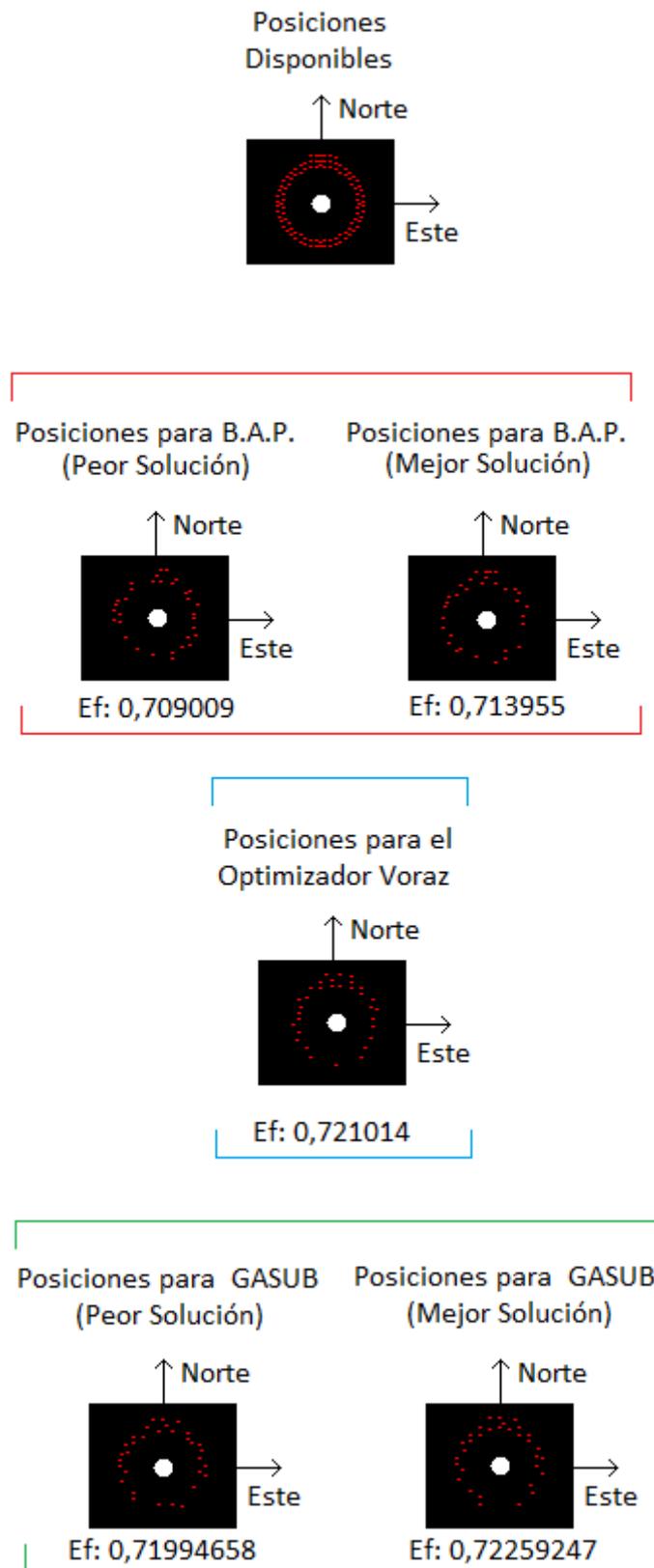


Figura 4.10.- Soluciones principales encontradas por los tres optimizadores para la distribución de 32 helióstatos sobre 100 posiciones.

Sobre la información propiamente contenida en la descriptiva figura 4.10 para la mayor instancia, la mejor solución global se obtiene de GASUB seguida muy de cerca por la propuesta voraz. Por el contrario, los dos peores diseños se generan a partir de la BAP, pudiendo destacarse su falta de simetría Oeste-Este como rasgo distintivo diferente a las mejores. Nótese también que, la poca disponibilidad de posiciones en la zona Norte (prácticamente igual a la de la zona Sur) que es la más recomendable en el hemisferio Norte, agravada con el fuerte riesgo de bloqueo y sombreado entre helióstatos, lleva a todos los diseños a recurrir en mayor o menor medida a las posiciones del Sur.

4.6.3.- Resultados de la optimización realizada sobre la primera variante del problema

El rango de helióstatos abarcado en los estudios de optimización, por extensión del realizado para la variante del problema basada en posiciones, va desde los 2 hasta 32 helióstatos. El número de casos y su distribución entre esos dos extremos es también igual a la abordada en la sección anterior. Para esta variante del problema general definido no es necesario, sin embargo, generar y fijar un cierto número de posiciones seleccionables. Por el contrario, basta con definir cada una de las ocho variables que configuran el modelo de diseño, que se describe en el tercer capítulo, en un cierto rango real. Para llevar a cabo las pruebas, los rangos que se han asociado a cada variable son los que se incluyen a continuación:

- Espaciado inicial entre filas de helióstatos " a_o ": [3.0, 15.0]
- Incremento espacial entre filas " a_1 ": [0.0, 0.5]
- Corrección de la distancia radial según la posición azimutal " d_θ ": [-5.0, 5.0]
- Variación de la distancia azimutal " e_θ ": [-1.0, 1.0]
- Incremento de la distancia en las líneas de transición según la distancia radial " δ ": [0.0, 1.0]
- Distanciado extra de las líneas de transición " ϵ ": [0.0, 5.0]
- Dependencia azimutal con la distancia radial del grupo " b ": [0.0, 0.5]
- Primera separación azimutal de la fila primaria inicial " D_0^1 ": [0.0, 0.5]

El rango concreto se deriva directamente de las pruebas y resultados mostrados en [RAM12], de donde se obtiene la base modelo de diseño implementado. Además, como se comenta en el tercer capítulo al tratar el modelo de diseño, se indican los parámetros correspondientes la distancia radial base de (declarada en 20m) y la distancia añadida de seguridad entre helióstatos (declarada en 1m).

El contexto de la central en el que se aplican los experimentos y mediciones es el de la central ya definida en la sección 4.2, que es también la que se empleó para la experimentación correspondiente a la segunda variante del problema. Manteniendo

también las condiciones aplicadas sobre la variante alternativa del problema, la experimentación se realiza mediante cinco repeticiones consecutivas para cada instancia del problema y cada uno de los optimizadores.

Los algoritmos de optimización aplicados sobre las variables del modelo de rendimiento, manteniendo el objetivo de maximizar el rendimiento óptico no ponderado, son la Búsqueda Aleatoria Pura, un optimizador de inspiración voraz y UEGO.

Es importante destacar que los optimizadores empleados en este caso difieren en mayor o menor medida de los que se utilizan para la segunda vertiente ya que están adaptados a un espacio de búsqueda y contexto diferentes. Se recuerda por ejemplo, que ya no se usa la derivación de UEGO para problemas de localización discreta GASUB, sino el UEGO “tradicional” con el optimizador local de Solis y Wets descrito en el tercer capítulo. El optimizador voraz selecciona secuencial e independientemente el valor de cada variable según se vaya aumentando el rendimiento óptico avanzando según la resolución asociada a cada rango desde el mínimo hasta el máximo. El optimizador BAP, que mantiene muy fielmente su esencia en ambos casos, pasa simplemente a generar valores aleatorios sobre los rangos de cada variable en lugar de números identificativos de posiciones.

Antes de mencionar los resultados logrados por cada optimizador, se aclara que la resolución con la que se ha aplicado el OV es la que se indica a continuación:

- Espaciado inicial entre filas de heliostatos “ a_0 ”: 1.0
- Incremento espacial entre filas “ a_1 ”: 0.1
- Corrección de la distancia radial según la posición azimutal “ d_θ ”: 1.0
- Variación de la distancia azimutal “ e_θ ”: 0.1
- Incremento de la distancia en las líneas de transición según la distancia radial “ δ ”: 1.0
- Distanciado extra de las líneas de transición “ ϵ ”: 1.0
- Dependencia azimutal con la distancia radial del grupo “ b ”: 0.01
- Primera separación azimutal de la fila primaria inicial “ D_0^1 ”: 0.01

Además, como sucede en la sección anterior, tanto el optimizador de BAP como UEGO requieren recibir parámetros para configurar su proceso de búsqueda.

En este caso, se vuelve a emplear simplemente el algoritmo de filosofía voraz como referente de tiempo para establecer el límite de iteraciones fijado para la BAP en cada instancia.

Respecto a la configuración de UEGO, también se basa en el OV, aunque volviendo a ser necesario realizar un conjunto importante de pruebas para determinar sus parámetros de usuario. No obstante, el número de pruebas requerido esta vez para optar por una cierta configuración ha sido significativamente menor que para la situación previa, con GASUB. Se destaca además que se mantiene la filosofía de extrapolar la mejor configuración únicamente para la instancia de mayor tamaño como ya se hiciera con GASUB. Finalmente,

se seleccionan los siguientes parámetros tomando de nuevo como referencia la mayor instancia del problema:

- Cota superior de 1000 evaluaciones de la función objetivo.
- Máximo de 3 especies permitidas.
- 8 niveles de búsqueda.
- Radio mínimo de 0,01.

Entrando ya en los resultados obtenidos, en la tabla 4.7 se condensa la información del desempeño de los tres optimizadores aplicados en esta variante manteniendo la estructura y semántica de la tabla 4.6 de la sección previa. En el apéndice D sección 5 se incluye además información complementaria a la tabla 4.7, como por ejemplo, la desviación típica de los promedios de tiempo. En las figuras 4.11 y 4.12, se representa de forma gráfica la evolución, en promedio de eficiencia y tiempo respectivamente, de las soluciones de cada optimizador según el número de heliostatos.

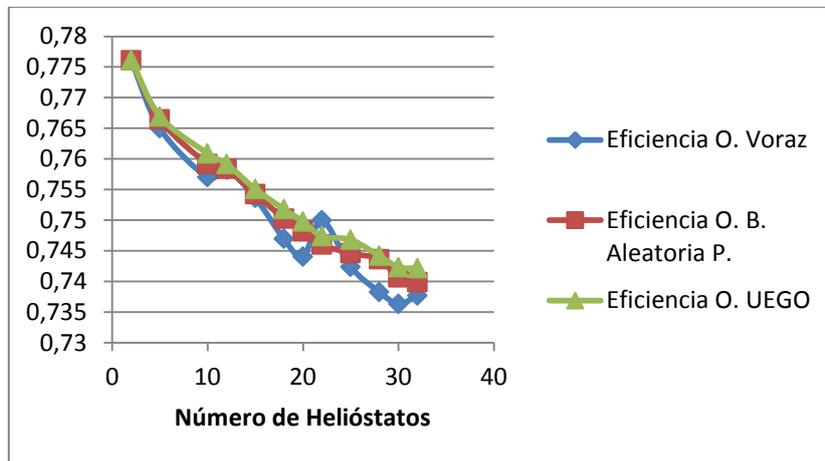


Figura 4.11.- Eficiencia promedio de las soluciones obtenidas en la optimización con modelo de diseño según el optimizador y el número de heliostatos.

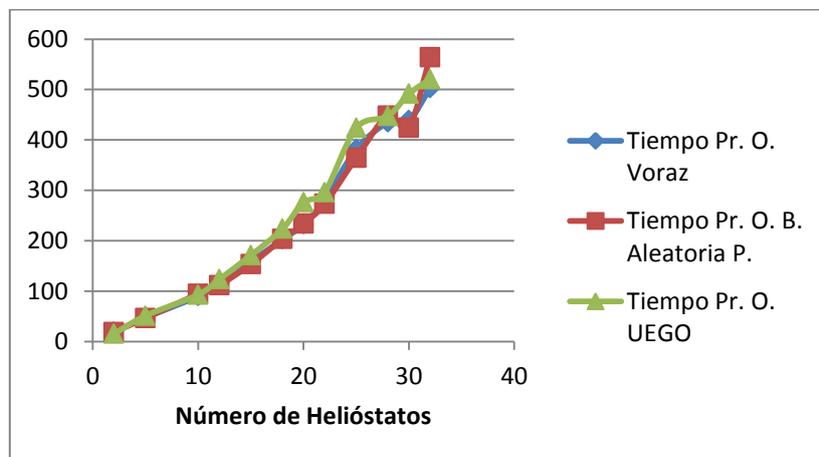


Figura 4.12.- Tiempo promedio de las soluciones obtenidas en la optimización con modelo de diseño, según el optimizador y el número de heliostatos.

Alg.	H	TP (s)	Función Objetivo			
			Ef. Min.	Ef. P.	Ef. Max.	DT
OV	2	18,8428	----	0,7761	----	----
	5	47,0349	----	0,7650	----	----
	10	89,8618	----	0,7570	----	----
	12	114,9240	----	0,7582	----	----
	15	158,3560	----	0,7536	----	----
	18	202,5248	----	0,7469	----	----
	20	232,3592	----	0,7440	----	----
	22	280,4892	----	0,7500	----	----
	25	381,1852	----	0,7424	----	----
	28	434,7264	----	0,7383	----	----
	30	438,7743	----	0,7363	----	----
	32	502,1431	----	0,7377	----	----
	Promedio	----	241,7685	----	0,7505	----
BAP	2	18,5678	0,7760	0,7761	0,7762	0,0000
	5	46,5042	0,7663	0,7665	0,7669	0,0002
	10	94,3988	0,7576	0,7592	0,7599	0,0009
	12	111,7327	0,7572	0,7584	0,7597	0,0009
	15	153,1341	0,7539	0,7543	0,7553	0,0006
	18	203,4227	0,7496	0,7503	0,7507	0,0004
	20	233,6062	0,7466	0,7482	0,7492	0,0011
	22	272,8154	0,7453	0,7460	0,7477	0,0010
	25	364,2245	0,7435	0,7446	0,7470	0,0014
	28	447,8822	0,7426	0,7436	0,7446	0,0008
	30	424,0820	0,7389	0,7407	0,7427	0,0016
	32	564,0570	0,7388	0,7399	0,7408	0,0008
	Promedio	----	244,5357	0,7514	0,7523	0,7534
UEGO	2	15,2000	0,7760	0,7761	0,7763	0,0001
	5	51,0000	0,7669	0,7669	0,7670	0,0000
	10	92,8000	0,7605	0,7609	0,7612	0,0003
	12	123,4000	0,7585	0,7592	0,7600	0,0006
	15	171,0000	0,7539	0,7551	0,7564	0,0011
	18	223,4000	0,7507	0,7518	0,7527	0,0008
	20	276,4000	0,7490	0,7498	0,7508	0,0007
	22	296,2000	0,7459	0,7474	0,7481	0,0009
	25	423,6000	0,7450	0,7468	0,7487	0,0014
	28	447,2000	0,7431	0,7442	0,7453	0,0009
	30	491,4000	0,7398	0,7423	0,7448	0,0022
	32	520,4000	0,7408	0,7422	0,7433	0,0009
	Promedio	----	261,0000	0,7525	0,7536	0,7545

Tabla 4.7.- Resultados principales del proceso de optimización sobre la primera vertiente.

En lo referente a los resultados globales del estudio, los tiempos que emplean los optimizadores en promedio son muy similares entre sí en todos los casos, como se aprecia en la figura 4.12 y en los datos de la tabla 4.7. Además, a título de curiosidad, estos tiempos son significativamente inferiores a sus “homólogos” en el problema alternativo: del orden de 3 veces para la BAP y el OV, y de 5 veces entre UEGO y GASUB aproximadamente.

La similitud de tiempos, como es de suponer por el tipo de ajuste, es normal entre el OV y el de BAP. Sin embargo, UEGO, que podría adolecer en su rendimiento temporal la configuración extrapolada del mayor problema sobre instancias menores, tampoco se ve afectado. Nótese, no obstante, que el tratar con tiempos inferiores, acompañado del número reducido de experimentos, lleva a encontrar mayores variaciones (aumento de la desviación típica) en las mediciones individuales. Esta información complementaria se puede ver en la sección 5 del apéndice D.

En general, la evolución del tiempo conforme aumenta el número de helióstatos parece relativamente similar al de la variante paralela (tal vez incluso algo superior), aunque moviéndose en un rango muy inferior de valores en el tramo estudiado.

Respecto al rendimiento óptico logrado por las propuestas de diseño, se muestran a un nivel superior al de la variante basada en posiciones. Sin embargo, y aunque moviéndose en un rango de valores más elevados, se mantiene también en este caso la tendencia general de perder rendimiento óptico, progresivamente, conforme se aumenta el número de helióstatos distribuidos.

Observando los valores de eficiencia, el OV se muestra como el claro perdedor en este caso, con un promedio total de 0,7505. Generalmente logra diseños peor valorados, con la excepción particular de la instancia de 22 helióstatos, en la que supera amplia y puntualmente a los otros dos optimizadores. Este “pico” de eficiencia es visible en la figura 4.11.

En contraposición, UEGO es el que mejores resultados logra globalmente, con un promedio total de 0,7536. Se destaca también en el caso catalogado como más relevante, el de 32 helióstatos que rige su configuración general, tanto en promedio como en la mejor y peor solución.

El optimizador BAP, sorprendentemente, logra superar en promedio general al OV con una valoración media de 0,7523 y sin quedar especialmente distanciado de UEGO. Se muestra, por tanto, como la segunda mejor opción y de forma contraria a lo esperado. La BAP, atendiendo a la desviación típica de la eficiencia de sus resultados, muestra además una estabilidad promedio en sus soluciones igual a la de UEGO y bastante aceptable.

Los dos optimizadores estocásticos, que realizan su búsqueda en un rango de valores mucho más global sobre los intervalos de cada variable que el OV, se imponen a éste y en tiempos virtualmente idénticos. El OV, como se comenta, marca el intervalo permitido de tiempos y

se hace trabajar con una resolución concreta sobre cada dimensión para que su ejecución sea viable (un recorrido exhaustivo del rango real de cada variable es teóricamente imposible y sería difícilmente asumible en términos prácticos).

Analizando en conjunto ambos enfoques paralelos, con los resultados obtenidos en el contexto común del diseño del campo solar, la distribución de helióstatos mediante modelos de diseño configurables y fiables por propia construcción, como el derivado de [RAM12] que se aplica, se muestra como la mejor opción. No sólo se obtienen eficiencias mayores en las plantas solares generadas, sino que se permite un diseño y optimización mucho menos costoso en términos de tiempo. No obstante y como es de suponer, una disponibilidad significativamente mayor de posiciones para cada conjunto de helióstatos permitiría teóricamente aspirar a diseños con mayor rendimiento óptico. Sin embargo, su coste en tiempo avanzaría hacia lo insostenible sin recurrir a reducciones de precisión en ciertas etapas y/o a entornos de computación de altas prestaciones.

Por consiguiente, se demuestra empíricamente, en las pequeñas instancias probadas, la importancia de descomponer el diseño del campo solar en un conjunto reducido de variables en lugar de tratar de abarcar, de entrada, “secciones” de superficie.

Se hace patente además, en base a los resultados obtenidos, la superioridad estable de los métodos estocásticos UEGO y BAP en la variante basada en modelo de diseño sobre la filosofía voraz.

En la variante basada en posiciones, esta superioridad es más discreta (y sin considerar su mayor empleo de tiempo en la mayoría de los casos por la configuración generalizada) por parte de GASUB. Además, en este caso, el optimizador BAP no puede competir con el Voraz, que demuestra ser una buena y equilibrada opción.

En cualquier caso, simplemente observando la columna de “mejores resultados” asociada a los métodos estocásticos en las tablas mostradas, se hace interesante barajar la optimización mediante optimizadores estocásticos. Estos métodos tienen una gran capacidad de exploración que abre siempre la posibilidad de alcanzar un resultado excepcional derivado de su naturaleza aleatoria. Considerando además la modularidad y las opciones de configuración de UEGO y GASUB, no sólo pueden evitar la exploración sesgada y determinista que se hace aplicando la filosofía voraz, sino que pueden estabilizarse y adaptarse mejor a múltiples situaciones. Consiguientemente, los métodos estocásticos pueden ser herramientas valiosas para numerosos problemas como el abordado.

Finalmente, en la figura 4.13 se vuelve a representar, como en la sección previa, el diseño resultante del proceso de optimización para el caso de 32 helióstatos de la solución voraz junto con la mejor y peor obtenidas por BAP y UEGO. La representación se hace en los mismos términos que en el caso anterior, empleando un radio aproximado para los helióstatos de 1m. Se menciona además, como aspecto a tener en cuenta sobre la

ilustración, que el punto central correspondiente al receptor de referencia se ha representado generalmente con un radio excesivo de cara a resaltar su ubicación.

Sobre los diseños mostrados en dicha figura, en los que resalta la simetría proporcionada por el modelo de diseño, se destaca también su valoración de rendimiento significativamente mayor a los de la variante alternativa del problema como ya se ha mencionado. Las dos mejores soluciones, que corresponden a las de UEGO, hacen gala además de una mayor ubicación de helióstatos al Norte del receptor combinada con una densidad elevada de helióstatos próximos a dicho receptor. Nótese también, que en cualquiera de los diseños, los espacios entre helióstatos próximos son mayores a los de la variante alternativa del problema. Para concluir, se puede mencionar en esta línea que las configuraciones logradas en el proceso son algo más “generosas” con la superficie que los diseños de plantas reales que se pueden encontrar en la bibliografía. Presumiblemente se debe al bajo número de helióstatos que reduce el impacto de las distancias elevadas helióstato-receptor y lleva a los optimizadores a primar otros factores por encima del factor de atenuación atmosférica.

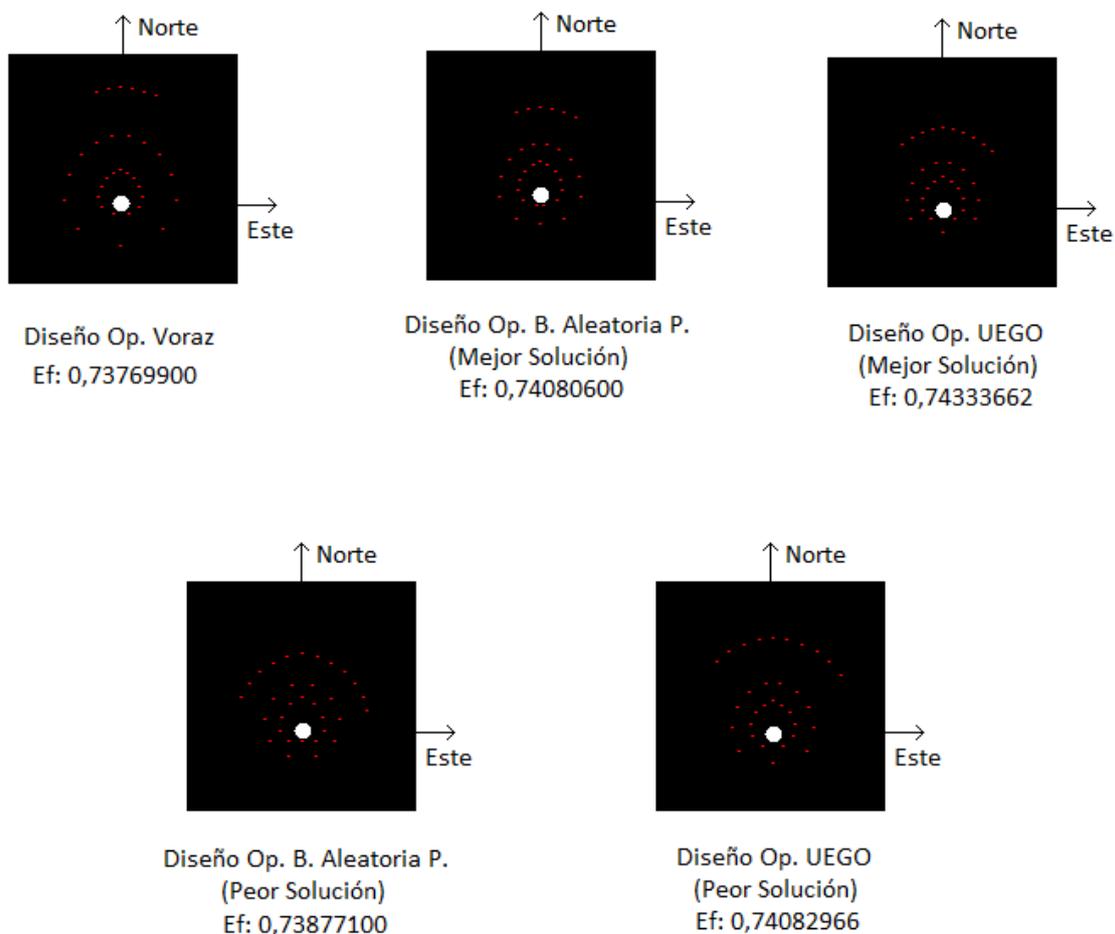


Figura 4.13.- Soluciones principales encontradas por los tres optimizadores para la distribución de 32 helióstatos según el modelo de rendimiento.

Capítulo 5. Conclusiones

En este capítulo se hace, en primer lugar, una reflexión final de la realización del proyecto. Esta reflexión se acompaña además con unos comentarios generales sobre la información que se puede extraer, en conjunto, del capítulo anterior.

Posteriormente se declaran una serie de posibles estudios posteriores y mejoras que se podrían llevar a cabo en el futuro y que, por cuestiones de tiempo, no se han podido incluir en este proyecto.

5.1.- Conclusiones finales

La realización de este proyecto me ha supuesto todo un reto en el que he tenido que combinar y aplicar los conocimientos adquiridos a lo largo de la titulación con nuevas disciplinas, que eran total o parcialmente desconocidas para mí. Ha supuesto un esfuerzo importante pero también ha sido una experiencia gratificante y muy enriquecedora.

A título de resumen del trabajo realizado, en este proyecto se ha abordado verticalmente el proceso de diseño y optimización del campo solar de las centrales heliotérmicas de torre. Para lograrlo, se ha desarrollado en primer lugar un simulador básico capaz de valorar de forma aproximada e ideal el rendimiento óptico de las centrales de torre. Se ha abordado además, y de forma exitosa, la paralelización básica del modelo de rendimiento como factor acelerador. Sobre este simulador se ha definido un problema de optimización y se han planteado dos variaciones paralelas y distintas de afrontar la distribución de un conjunto de helióstatos inspirados en la bibliografía.

En este contexto se ha aprovechado para estudiar dos métodos estocásticos (Búsqueda Aleatoria Pura y UEGO, con su derivado GASUB) en comparación a uno determinista (de tipo voraz) en los dos casos.

Si bien es cierto que no ha sido posible abordar problemas de optimización de gran tamaño por cuestiones de tiempo y recursos, se ha conseguido mostrar la superioridad de las metaheurísticas basadas en poblaciones (UEGO y su derivado GASUB) en los casos estudiados, como se pretendía. Esta superioridad es especialmente visible por parte de UEGO en el diseño basado en un modelo de ubicación. UEGO combina adecuadamente la aleatoriedad propia de su naturaleza con buenas opciones de control y orientación mediante sus parámetros de configuración.

Se destaca también que la optimización con BAP, que se suponía un mero referente testimonial, ha logrado también buenos resultados en la variante basada en modelo de diseño aunque su actuación sobre posiciones sea muy modesta en comparación.

La OV se muestra como un referente sólido, particularmente en la selección de posiciones. Sin embargo, su visión limitada y estática le impide en bastantes casos aspirar a mejores resultados cuando se desconoce si realmente existen.

Una optimización determinista voraz no se puede mantener en el tiempo ni orientar hacia mejores resultados incluso aunque sea necesario. Sin embargo, UEGO (o incluso la BAP, aunque de forma muy rudimentaria e ineficiente) pueden mantenerse activos y refinar su proceso según se estime necesario. Consiguientemente, los métodos estocásticos son herramientas útiles y necesarias por méritos propios en multitud de problemas entre los que se puede incluir el abordado en base a los diseños alcanzados.

Finalmente, entre las dos variantes de diseño definidas, la clara vencedora es la basada en un modelo. Mediante este enfoque se obtienen mejores resultados y con mucho menor esfuerzo de procesamiento explotando las propiedades de modelos de diseño cuidadosamente definidos, de por sí, para generar distribuciones adecuadas en un amplio rango de circunstancias. De esta forma, se suscribe la recomendación que se hace en [RAM12] sobre la importancia de tratar la optimización de la central solar en base a un número reducido de variables significativas.

5.2.- Mejoras y líneas futuras

Sobre este proyecto se pueden definir varias mejoras y líneas de trabajo futuras al abarcar conjuntamente varios aspectos de estudio y componentes.

En primer lugar, el modelo de rendimiento óptico desarrollado cumple a la perfección su cometido de generar un marco común y consistente de estudio para los tres optimizadores comparados. Sin embargo, sus resultados son puramente académicos y de poca utilidad para centrales reales por las simplificaciones que se realizan sobre el mismo. Se mencionan en esta línea, las siguientes opciones:

- Inclusión de dimensiones industriales en los heliostatos.
- Inclusión de mayor cantidad de muestreos en el cálculo de sombras y bloqueos.
- Modificaciones en el algoritmo de [RAM12].
- Inclusión de sombras como la que generaría un receptor ubicado en una torre de dimensiones reales.

- Dimensiones reales de grosor asociadas a helióstatos como cuerpos físicos y con posibilidad de considerarlos superficies no planas e inclusión del canteo de sus facetas.
- Variaciones en la orografía del terreno.
- Calidad con la que la radiación incide realmente sobre el receptor o “factor de intercepción”, como se conoce generalmente.
- Validación de sus resultados con herramientas software profesionales, y referentes del sector como “WinDelsol”, por citar una de las más extendidas, junto con datos empíricos obtenidos de centrales reales.
- Estudio de alternativas de paralelización más refinadas.
- Inclusión de modelos de estimación de radiación incidente y de atenuación atmosférica más precisos.
- Estudio de nuevos métodos de muestreo del tiempo y comparativa contrastada de sus resultados.

En lo referente a las condiciones propias del estudio de optimizadores se pueden proponer también varias mejores directas:

- Explotación de las características modulares del entorno UEGO para buscar mejores optimizadores locales para el problema en cada vertiente.
- Adición de nuevos métodos de optimización al estudio.
- Tratamiento de diseños con mayor número de helióstatos para una mejor perspectiva de los resultados y su evolución.
- Aplicación el proceso de optimización tomando la intensidad de radiación incidente en consideración como complemento.
- Combinación de múltiples centrales con características distintas y diferentes latitudes como fuente de datos.
- Combinación del enfoque posicional con el basado en modelos de diseño como opción para generar diseños más refinados como se hace en la bibliografía.
- Inclusión de fases de cálculo del rendimiento óptico reducido, sin considerar generalmente todos sus sub-factores.
- Inclusión de objetivos complementarios como la minimización del espacio ocupado.

Finalmente, existe la posibilidad obvia de implementación de modelos de diseño y de muestreo de posiciones alternativos a los aplicados como factor enriquecedor del estudio. Sería entonces posible también una selección de aquellos que generan los mejores diseños globales.

Bibliografía

- [AAR89] E. Aarts y P. Laarhoven. *Simulated annealing: an introduction*. Statistica Neerlandica, 43(1):31-52, 1989.
- [BRA04] G. Brassard y T. Bratley. *Fundamentos de algoritmia*, Ed. Prentice-Hall, 2004.
- [CAM12] E. F. Camacho, M. Berenguel, F. R. Rubio y D. Martínez. *Control of solar energy systems*, Springer, 2012.
- [CER85] V. Černý. *Thermodynamical approach to the traveling salesman problem: an efficient simulation algorithm*. Optimization Theory and Applications 45: 41-51, 1985.
- [CHE04] Y.T. Chen, A. Kribus, B.H. Lim, C.S. Lim, K.K. Chong, J. Karni, R. Buck, A. Pfahl y T.P. Bligh. *Comparison of two suntracking methods in the application of a heliostat field*. Journal of Solar Energy Engineering, 126(1), 638–644, 2004.
- [COL09] J. Colera, M.J. Oliveira y L. Colera. *Matemáticas II*, Ed. Anaya, 2009.
- [COT07] C. Cotta. *Una visión general de los algoritmos meméticos*. Rect@ 3: 139-166, 2007.
- [CSP14] CSP-Today. *Solar tower report 2014: cost, performance and thermal storage. 2013*. (Disponible en: <http://www.csptoday.com/research/tower-index.php>). Última consulta: 25/06/2014.
- [CTA12] CTAER, 2012. (Disponible en: <http://www.ctaer.com/es/areas-de-investigacion/solar/proyectos/crs-sales-prototipo-receptor-solar-torre-con-sales-fundidas>). Última consulta: 25/05/2014.
- [DUN12] R.I. Dunn, P.J. Hearps y M.N. Wright. *Molten-salt power towers: newly commercial concentrating solar storage*. Proceedings of the IEEE, 100(2): 504-515, Febrero 2012.
- [EWE] M. Ewert y O. Navarro. *Modelling and simulation of a solar tower power plant*. (Disponible en: <http://www.mathcces.rwth-aachen.de/media/5people/frank/solartower.pdf>). Última consulta: 25/05/2014.
- [GAR08] P. García, A. Ferriere y J.J. Bezan. *Codes for solar flux calculation dedicated to central receiver system applications: a comparative review*. Solar Energy, 82(3): 189-197, 2008.
- [GES11] M. Gestal. *Introducción a los algoritmos genéticos*. Dpto. de Tecnologías de la

Información y las Comunicaciones, Universidad de la Coruña, 2011. (Disponible en: <http://sabia.tic.udc.es/mgestal/cv/AAGGtutorial/aagg.html>). Última consulta: 26/05/2014.

- [GOL87] D.E. Goldberg y J. Richardson. *Genetic algorithms with sharing for multimodal function optimization*. J. Grefenstette (ed.), Proceedings of the 2nd International Conference on Genetic Algorithms, L. Erlbaum Associates Inc. Hillsdale, NJ, USA: 41-49, 1987.
- [GUA02] Ed. Guadiel (grupo EDEBÉ). *Tecnología industrial I*, 2002.
- [GUA09] Ed. Guadiel (grupo EDEBÉ). *Física*, 2009.
- [HEN06] J.L. Hennessy y D.A. Patterson. *Computer architecture, a quantitative approach*, 5ª Edición, Ed. Morgan Kaufmann, 2006.
- [HOL75] J.H. Holland. *Adaptation in natural and artificial systems*, MIT Press, 1975.
- [HON] C. Honsberg y S. Bowden. *Photovoltaic education network*. (Disponible en: <http://pveducation.org/pvcdrom>). Última consulta: 26/05/2014.
- [JEL01] M. Jelasity, P.M. Ortigosa y I. García. *UEGO, an abstract clustering technique for multimodal global optimization*. Journal of Heuristics, 7: 215–233, 2001.
- [JEL98] M. Jelasity y J. Dombi. *GAS, a Concept on modeling species in genetic algorithms*. Artificial Intelligence 99(1): 1–19, 1998.
- [JON07] S.A. Jones, R. Lumia, R. Davenport, R.C. Thomas, D. Gorman, G.J. Kolb, y M.W. Donnelly. *Heliostat cost reduction study*. Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico 87185 and Livermore, California 94550, 2007. (Disponible en: <http://prod.sandia.gov/techlib/access-control.cgi/2007/073293.pdf>). Última consulta: 26/05/2014.
- [KAR63] D.C. Karnop. *Random search techniques for optimization problems*. Automatica, 1:111-121, 1963.
- [KIR83] S. Kirkpatrick, C.D. Gelatt y M.P. Vecchi, *optimization by simulated annealing*. Science 220(4598): 671-680, 1983.
- [MCD94] J.R. McDonnell y D. Waagen. *Evolving recurrent perceptrons for time-series modeling*. IEEE Transactions on Neural Networks, 5(1): 24-38, 1994.
- [MET53] N. Metropolis, A. Rosenbluth, M. Rosenbluth, A. Teller y E. Teller. *Equation of state calculations by fast computing machines*. Journal of Chemical Physics, 21: 1087-1092, 1953.
- [MOS89] P. Moscato. *On evolution, search, optimization, genetic algorithms and martial*

arts: towards memetic algorithms. Technical Report C3P 826, California Institute of Technology, Pasadena, CA, 1989. (Disponible en: <http://mh-mmx.googlecode.com/svn-history/r144/wiki/presentacion-ma/papers-y-articulos/paper-ma-towards-memetic-algorithms.pdf>). Última consulta: 26/05/2014.

- [NOO12] C.J. Noone, M. Torrilhon, y A. Mitsos. *Heliostat field optimization: a new computationally efficient model and biomimetic layout*. *Solar Energy*, 86(2), 792–803, 2012.
- [ORT99] P.M. Ortigosa. *Métodos estocásticos de optimización global. Procesamiento Paralelo*. PhD thesis, Universidad de Málaga, 1999.
- [PER05] M. Peralta. *Sistema automático basado en técnicas de visión artificial para corrección de errores estáticos de helióstatos de una Planta Solar tipo Torre*. Directores del proyecto: Dr. D. Manuel Berenguel Soria, D. Luis Yebra Muñoz. Proyecto Final de Carrera. Universidad de Almería, 2005.
- [PLA12] V. Plaza. *Implementación del algoritmo UEGO sobre el entorno Matlab como alternativa al toolbox de optimización*. Trabajo Fin de Máster. Universidad de Almería, 2012.
- [RAM12] A. Ramos y F. Ramos. *Strategies in tower solar power plant optimization*. *Solar Energy*, 86(9): 2536-2548, 2012.
- [RED08] J. López. *Algoritmos meméticos para problemas de localización competitiva: computación de altas prestaciones*. PhD Tesis. Universidad de Almería, 2009.
- [REY09] L. Rey. *Distancia de un punto a un segmento*, 2009. (Disponible en <http://luisrey.wordpress.com/2008/07/06/distancia-punto-1/>). Última consulta: 25/06/2014.
- [RIFF09] K. Riffelmann, D. Kruger y R. Pitz-Paal. *Solar thermal plants-power and process heat* (Faculty Development Program Training, Addis), Deutsches Zentrum fur Luft-und raumfahrt e.V.,D-51 170 Koin, 2009.
- [SAR98] B. Sareni, L. Krähenbühl y A. Nicolas. *Niching genetic algorithms for optimization in electromagnetics. I. Fundamentals*. *IEEE Transactions on Magnetics*, 34(5): 2084-2087, 1998.
- [SOL09] C.A. Solis, F. Cómez, Á. Domecq y E. Sales. *Diseño y estudio de una planta solar termoeléctrica con tecnología de torre central*. Trabajo Final de Máster (MERME), Escuela de Organización Industrial, Madrid, 2009.
- [SOL81] F.J. Solis y R.J. Wets. *Minimization by random search techniques*. *Mathematics Operational Research*, 6(1): 19–30, 1981.

- [STI01] W.B. Stine y M. Geyer. *Power from the sun*, 2001 (Disponible en: <http://powerfromthesun.net/book.htm>). Última consulta: 25/06/2014.
- [TAN11] M.H. Tan. *Design and optimization of heliostat field using spinning-elevation sun tracking method based on computational analysis*. Master dissertation/thesis, Faculty of Engineering and Science, University Tunku Abdul Rahman, 2011.
- [YAO09] Z. Yao, Z. Wang, Z. Lu y X. Wei. *Modeling and simulation of the pioneer 1 MW solar thermal central receiver system in China*. *Renewable Energy* 11; 34(11):2437-46, 2009.
- [ZAR12] E. Zarza. *La I+D+i: un camino imprescindible*. Jornadas Genera 2012 sobre Centrales Termosolares. 2012. (Disponible en: http://www.caloryfrio.com/archivos-cyf/pdf/dossiers/eduardo_zarza.pdf). Última consulta: 25/06/2014.
- [ZHA09] H. Zhang, I. Juchlia, D. Favrata y X. Pelet. *Multi-objective thermoeconomic optimisation of the design of heliostat field of solar tower power plants*. *Acta Energetica Solaris Sinica* 1, 55-60, 2009.

Apéndice A. Aspectos matemáticos

En este apéndice se revisan algunos conceptos matemáticos fundamentales y se desarrollan algunos cálculos que se consideran necesarios para la comprensión de algunos detalles del trabajo desarrollado.

Es importante mencionar también que se empleará directamente el término “espacio” en referencia a un espacio tridimensional definido por una base ortonormal cualquiera.

A.1.- Conversión entre coordenadas cartesianas y polares

Sea un plano con un sistema de coordenadas cartesianas X, Y . Un punto P queda definido de forma unívoca en dicho plano conociendo su dupla de coordenadas (x, y) . Sin embargo, dicho punto puede identificarse también en base a la distancia r que lo separa del origen de coordenadas O y el ángulo α que forma el segmento OP con otro segmento de referencia común. Se escoge entonces la componente Y de la base (lo que se justificará a continuación). De esta forma, es viable la definición de P mediante una dupla (r, α) , es decir, en coordenadas polares conocidas, como radio y azimut respectivamente.

La situación descrita se representa en la siguiente figura, superponiéndose ambos sistemas de referencia sobre el plano:

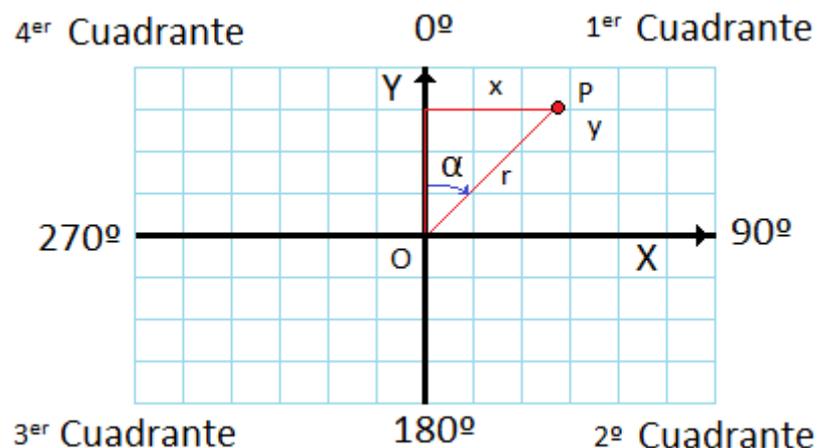


Figura A.1.- Punto P en coordenadas cartesianas y polares.

En el contexto de la figura A.1, los dos sistemas de referencia se pueden relacionar en base a las razones trigonométricas del triángulo rectángulo que se forma (en rojo), para el seno, el coseno y la tangente del ángulo α , que se incluyen a continuación:

$$\operatorname{sen} \alpha = \frac{x}{r} \quad \cos \alpha = \frac{y}{r} \quad \tan \alpha = \frac{x}{y} \quad (\text{A.1})$$

Además, las ecuaciones presentes en la expresión A.1 se pueden generalizar a todo el plano, para cualquier ángulo α , aunque no se forme explícitamente un triángulo rectángulo que contenga a dicho ángulo.

Cuadrante	$\operatorname{sen} \alpha$	$\cos \alpha$	$\tan \alpha$
1º	+	+	+
2º	+	-	-
3º	-	-	+
4º	-	+	-

Tabla A.1.- Signos del seno, coseno y tangente por cuadrante.

Como se anticipó, existe un motivo concreto por el que se ha optado por tomar como referente para el azimut o ángulo α , la componente positiva del eje Y. Se trata de mantener una consistencia intrínseca de signos entre las coordenadas de ambos sistemas de referencia.

En concreto, observando con detenimiento la expresión A.1, el signo del seno y el coseno en cada cuadrante sobre la tabla A.1 y teniendo en cuenta que el radio, como distancia, tiene un valor positivo por definición, se tienen las siguientes propiedades:

- La coordenada X de P está relacionada con el seno del azimut. Esta coordenada es positiva a la derecha del eje Y al igual que lo es el seno de cualquier ángulo en los cuadrantes de esa zona (primero y segundo). Del mismo modo, a la izquierda del eje Y , la coordenada X es negativa, siéndolo también el seno de cualquier ángulo en esos cuadrantes (tercero y cuarto).
- La coordenada Y de P está relacionada con el coseno del azimut. Esta coordenada es positiva sobre el eje X al igual que lo es el coseno de cualquier ángulo en los cuadrantes de esa zona (primero y cuarto). Del mismo modo, bajo el eje X , la coordenada Y es negativa, siéndolo también el coseno de cualquier ángulo en esos cuadrantes (segundo y tercero).

Esta consistencia de signos por definición de los sistemas de referencia permite una conversión directa de coordenadas polares a cartesianas:

- Conocidas las coordenadas polares (r, α) de un punto P , su conversión a coordenadas cartesianas (x, y) se realiza directamente despejando ambas incógnitas en sus respectivas relaciones en la expresión A.1.

En lo referente al proceso inverso, éste, aunque sencillo, no es directo:

- Conocidas las coordenadas cartesianas (x, y) de un punto P , su transcripción a coordenadas polares (r, α) requiere determinar el valor de r , que es equivalente al módulo del vector \vec{OP} :

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (\text{A.2})$$

Para determinar el ángulo α es necesario hacer uso de la función inversa del seno, del coseno o de la tangente según se opere sobre una ecuación de la expresión A.1. Por lo tanto, hay que mantener el rango de 0 a 360 ($^\circ$), tal y como se puede apreciar en la figura A.1, así como escoger el ángulo adecuado según los valores de x e y . Piénsese por ejemplo en un caso con $y = 0$ en el que se haga uso de la inversa del coseno. Hay dos ángulos en el intervalo $(0-360)^\circ$ cuyo coseno es 0, 90° y 270° . En esta situación es necesario ver si la coordenada x es mayor o igual a 0 para escoger 90° como azimut, o 270° en caso contrario.

A.2.- La circunferencia

Una circunferencia es una curva plana cerrada en la que todos sus puntos equidistan del centro. En términos geométricos puede definirse como el lugar geométrico de los puntos situados una distancia constante, denominada radio, de un punto coplanario conocido como centro (véase la figura A.2).

Una circunferencia c queda definida en el plano al conocer su centro y su radio, pudiéndose así ubicar los infinitos puntos que la forman.

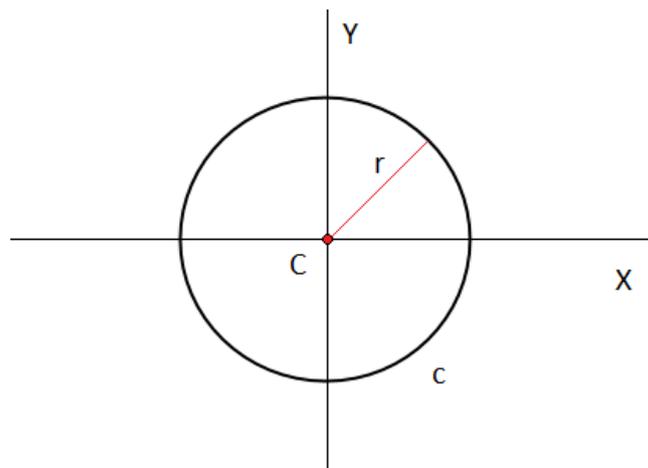


Figura A.2.- Circunferencia de centro C y radio r .

Ecuación en coordenadas cartesianas

En un sistema de coordenadas cartesianas X, Y , los puntos (x, y) equidistantes a un punto $C(a, b)$ con una distancia r , son aquellos que satisfacen la siguiente expresión:

$$(x - a)^2 + (y - b)^2 = r^2 \quad (\text{A.3})$$

A.3.- La recta en el espacio

Una recta es una sucesión infinita de puntos que se extienden a lo largo de una cierta dirección espacial.

Una recta r queda definida vectorialmente en una base en V_3 sobre \mathbb{R} conociendo:

- Un punto P de r , es decir, el vector \overrightarrow{OP} , siendo O el origen de coordenadas $(0, 0, 0)$. Del vector \overrightarrow{OP} se deriva directamente el vector posición \vec{p} , cuya dirección va desde el origen de coordenadas al punto P .
- Un vector \vec{d} paralelo a r conocido como vector dirección.

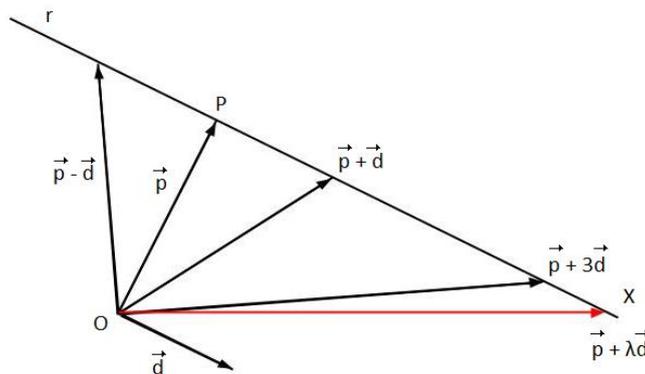


Figura A.3.- Definición vectorial de la recta.

Ecuación vectorial

Como se puede observar en la figura A.3, al colocar con su origen en O los vectores libres \vec{p} , $\vec{p} + \vec{d}$, $\vec{p} - \vec{d}$, $\vec{p} + 3\vec{d}$, ... todos tienen un extremo sobre la recta r . Generalizando este aspecto, $\vec{p} + \lambda\vec{d}$ es un vector que, situado con su origen en O , tiene su extremo X sobre la recta r . Este punto X se desliza sobre la recta según varía el parámetro $\lambda \in \mathbb{R}$.

Se tiene entonces que, para definir cualquier punto sobre la recta basta con ajustar el parámetro λ . Por lo tanto, el vector posición \vec{x} de cualquier punto de la recta se obtiene de la siguiente expresión:

$$\overrightarrow{OX} = \vec{x} = \vec{p} + \lambda \vec{d} \quad (\text{A.4})$$

Ecuaciones paramétricas

Para obtener las ecuaciones paramétricas de la recta basta con descomponer la expresión A.4 en las tres dimensiones x, y, z , de los vectores que la forman:

$$\vec{x} = \begin{cases} x = p_x + \lambda d_x \\ y = p_y + \lambda d_y \\ z = p_z + \lambda d_z \end{cases} \quad (\text{A.5})$$

Ecuación continua

La obtención de la ecuación continua de la recta se obtiene simplemente despejando e igualando el parámetro común λ sobre las componentes de la expresión A.5:

$$\frac{x - p_x}{d_x} = \frac{y - p_y}{d_y} = \frac{z - p_z}{d_z} \quad (\text{A.6})$$

Nótese finalmente que, la definición de la recta sobre el espacio expuesta parte del ámbito vectorial y puede adaptarse sin problemas a un espacio bidimensional partiendo de la misma expresión A.4.

A.4.- El plano

Un plano puede definirse como una superficie bidimensional en el espacio que contiene infinitos puntos y rectas.

Un plano π queda definido vectorialmente en V_3 sobre \mathbb{R} conociendo los siguientes elementos:

- Un punto P del plano, es decir, su vector posición definido desde el origen $(0, 0, 0)$, $\overrightarrow{OP} = \vec{p}$.
- Dos vectores \vec{u} y \vec{v} , paralelos al plano e independientes entre sí.

Ecuación vectorial

Como se puede apreciar en la figura A.4 a, el vector \vec{p} lleva al punto P del plano π . La combinación $\lambda \vec{u} + \mu \vec{v}$ permite alcanzar, desde P , cualquier punto X del plano.

Se tiene entonces que, para definir cualquier punto sobre el plano basta con ajustar los parámetros λ y $\mu \in \mathbb{R}$. Por lo tanto, el vector posición \vec{x} de cualquier punto del plano se obtiene de la siguiente expresión:

$$\overrightarrow{OX} = \vec{x} = \vec{p} + \lambda\vec{u} + \mu\vec{v} \quad (\text{A.7})$$

Ecuaciones paramétricas

Para obtener las ecuaciones paramétricas del plano basta con descomponer la expresión A.7 en las tres dimensiones x, y, z , de los vectores que la forman:

$$\vec{x} = \begin{cases} x = p_x + \lambda u_x + \mu v_x \\ y = p_y + \lambda u_y + \mu v_y \\ z = p_z + \lambda u_z + \mu v_z \end{cases} \quad (\text{A.8})$$

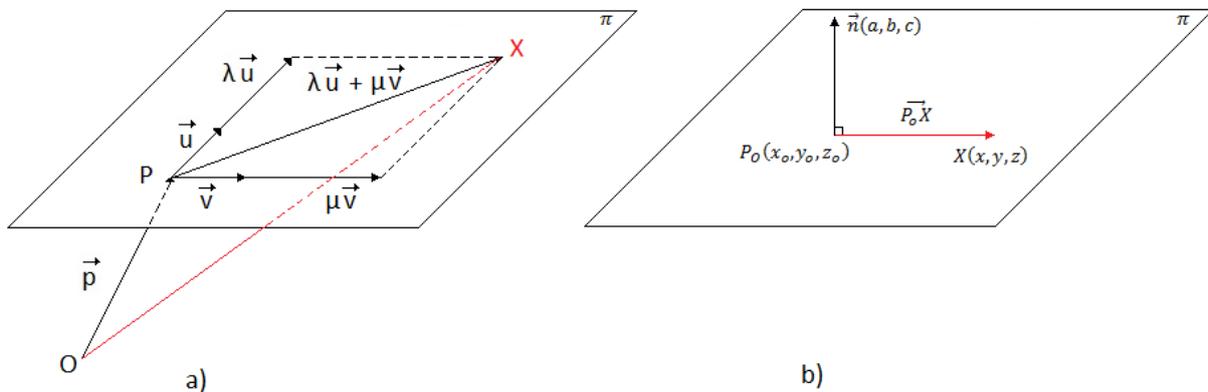


Figura A.4.- Definiciones vectoriales del plano, A) Con dos vectores paralelos al plano e independientes entre sí; B) Con un vector normal al plano.

Ecuación de un plano a partir de un punto y de un vector normal

Como se ilustra en la figura A.4 b, conociendo un punto $P_0(x_0, y_0, z_0)$ del plano π y un vector $\vec{n}(a, b, c)$ perpendicular al plano, es posible definir un plano.

Si X pertenece al plano, $\overrightarrow{P_0X}$ es perpendicular a \vec{n} , es decir, $(a, b, c) \cdot (x - x_0, y - y_0, z - z_0) = 0$. Desarrollando esta relación, el plano queda definido implícitamente en la siguiente ecuación implícita, es decir, del tipo $ax + by + cz + d$, sin parámetros λ y μ :

$$a(x - x_0) + b(y - y_0) + c(z - z_0) = 0 \quad (\text{A.9})$$

Nótese además que, conociendo esta ecuación implícita del plano π , se puede afirmar que el vector de componentes (a, b, c) es perpendicular a dicho plano.

A.5.- Intersección de recta y plano

Una recta r de vector director \vec{d} en el espacio tiene dos posiciones posibles relativas a un plano π con un vector perpendicular \vec{n} . La recta puede ser paralela al plano, lo que incluye la posibilidad de que esté contenida en el mismo o, por el contrario, puede cortar a dicho plano.

La posición relativa de r y π se puede determinar mediante el estudio del producto escalar de los vectores \vec{d} y \vec{n} no nulos, expresado como $\vec{d} \cdot \vec{n}$. Teniendo en cuenta la interpretación geométrica del producto escalar como la proyección de un vector sobre otro, o directamente, en base a su cálculo como el producto del módulo de ambos vectores con el coseno del menor ángulo que forman:

- Si $\vec{d} \cdot \vec{n} = 0$, esto implica que la proyección de un vector sobre otro es nula además de que el coseno del menor ángulo que forman es igual a 0. Por lo tanto, ambos vectores son perpendiculares entre sí y se puede afirmar que r es paralela a π (véase la figura A.5)
- Si $\vec{d} \cdot \vec{n} \neq 0$, los vectores no son perpendiculares entre sí y, consiguientemente, r corta a π en un cierto punto del espacio

En caso de que recta y plano se corten, el punto de corte C es fácilmente determinable mediante la obtención del punto común definible a partir de las ecuaciones de ambas entidades geométricas.

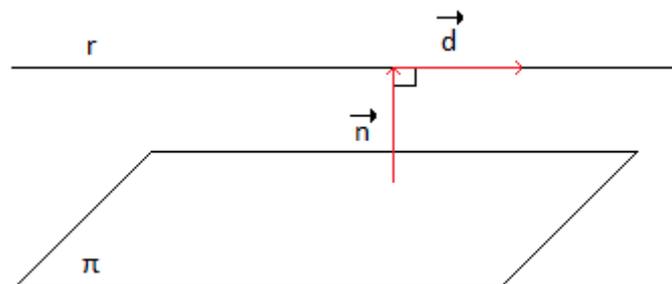


Figura A.5.- Recta paralela a un plano.

A.6.- Pertenencia de un punto a un rectángulo sobre un plano en el espacio

Sea un punto P y cuatro puntos A , B , C y D , todos ellos coplanarios y de coordenadas conocidas. Los puntos A , B , C y D definen además un rectángulo r en dicho plano.

Se pretende entonces determinar si el punto P está dentro del rectángulo r . Esta situación se ilustra en la figura A.6.

Para conocer si el punto P está en r , con la información de la que se dispone, es posible emplear los vértices de r en su propia disposición para definir una base superpuesta sobre el plano bidimensional común tomando como origen uno de los vértices. En base a este nuevo sistema de referencia, la pertenencia de P al rectángulo se puede determinar en función de las coordenadas de P en la nueva base.

Tomando como origen el vértice B por ejemplo, se obtienen los puntos A' , C' , D' y P' mediante la siguiente adaptación al nuevo origen de coordenadas:

$$\begin{aligned}
 A' &= A - B \\
 B' &= B - B = (0, 0, 0) \\
 C' &= C - B \\
 D' &= D - B \\
 P' &= P - B
 \end{aligned}
 \tag{A.10}$$

El punto P' se debe expresar entonces según la base formada por los vectores $\overrightarrow{B'A'}$ y $\overrightarrow{B'C'}$. Dado que B' es el origen de coordenadas, P' tiene la esta representación en la base superpuesta:

$$P' = \sigma A' + \lambda C'
 \tag{A.11}$$

Basta entonces con determinar las coordenadas λ y σ de la expresión A.11 para obtener las nuevas coordenadas de P' . Esta resolución es sencilla descomponiendo P' , A' y C' en sus tres componentes y llegando a un sistema de tres ecuaciones con dos incógnitas, λ y σ . Sobre esas tres ecuaciones es posible seleccionar dos de ellas que den lugar a un sistema compatible determinado de dos ecuaciones y dos incógnitas dado que son puntos coplanarios y por lo tanto P' tiene representación posible en el entorno definido.

Tras obtener λ y σ , el punto P estará entonces en el rectángulo definido si ambas coordenadas están en el intervalo $[0, 1]$. Esta situación se ilustra en la figura A.6 a.

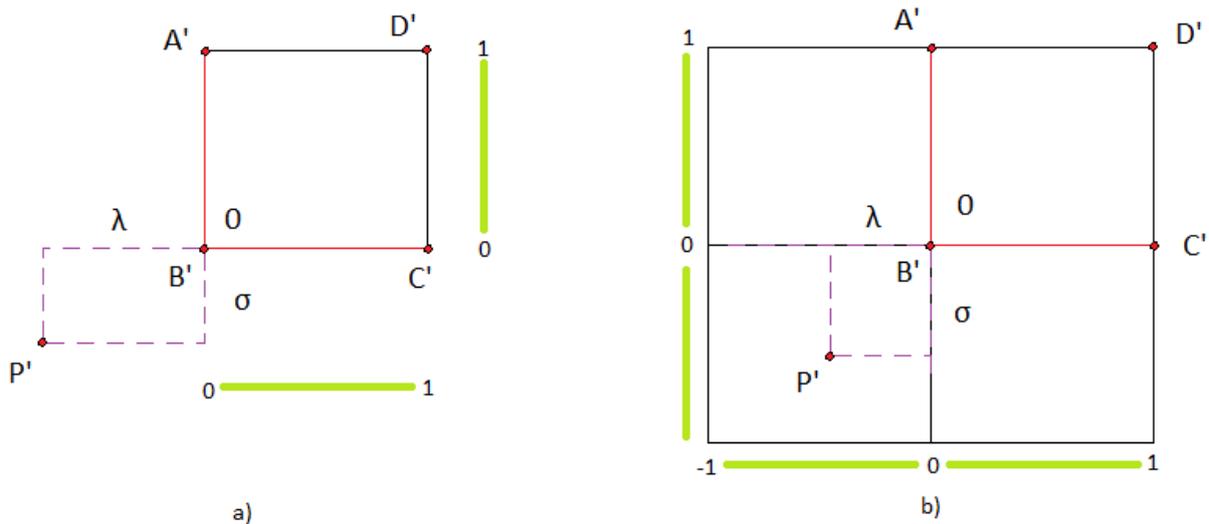


Figura A.6.- Pertenencia entre un punto y A) Un rectángulo directamente definido; B) Un rectángulo parcialmente definido.

En una situación en la que el rectángulo conocido no sea igual al de interés, sino que suponga un cuarto del mismo como se ilustra en la figura A.6 b, el rango de valores de λ y σ sobre la expresión A.11 denota pertenencia implícita es esta vez $[-1, 1]$. Como se puede apreciar, en este caso alternativo basta con doblar la amplitud del intervalo incluyendo también la región negativa simétrica de las coordenadas que implican pertenencia de P a r .

A.7.- Distancia de un punto a un segmento en el plano

Sea un plano con un sistema de coordenadas cartesianas X, Y . En dicho plano se conoce un segmento definido por los vértices A y B , y un punto C . Se desea entonces de determinar la distancia d desde el punto C al segmento AB [REY09]. Esta situación se deriva del cálculo de la distancia desde un punto a una recta, siendo necesario distinguir dos casos: cuando existe una perpendicular sobre el segmento que pasa por el punto C y cuando no existe dicha perpendicular.

En el primer caso, el cálculo tradicional de la distancia entre punto y recta es equivalente a la distancia buscada, pero, sin embargo, para el segundo caso devuelve la distancia desde C hasta la recta que contiene el segmento. En esta segunda situación, la distancia desde C a AB se obtendría simplemente calculando la distancia al extremo más cercano, A o B .

Se debe entonces obtener el punto P , perteneciente a la recta que contiene el segmento AB , y extremo del segmento PC que es perpendicular a la dirección de AB . Seguidamente habrá que verificar si P está entre A y B . Ambos casos se ilustran a continuación, indicando en verde la distancia correcta:

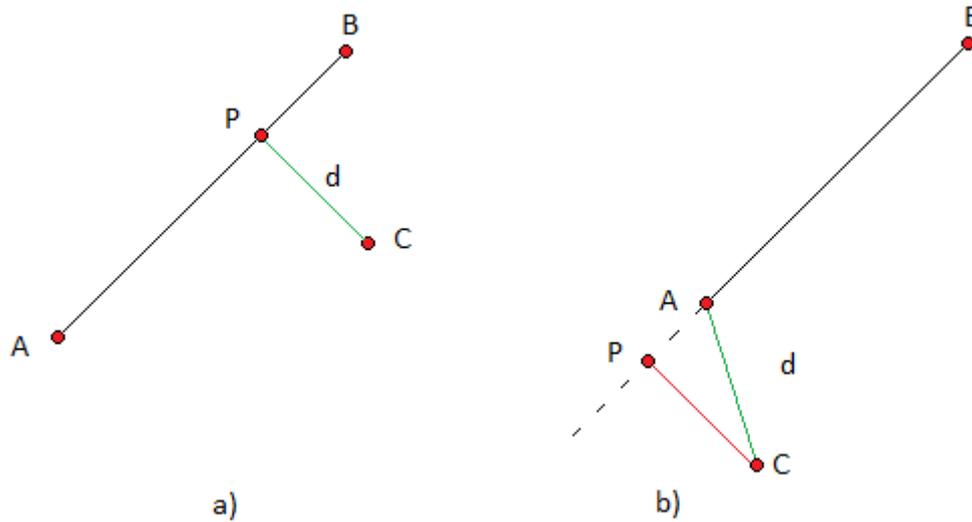


Figura A.7.- Situaciones para el cálculo de la distancia de un punto a un segmento.

Teniendo en cuenta que el vector \overrightarrow{AB} es un vector director de la recta que lo contiene y el punto A una referencia sobre la misma, las coordenadas del punto P se pueden expresar directamente según la ecuación A.5, que se muestra adaptada a dos dimensiones y empleando μ como parámetro:

$$\begin{cases} P_x = A_x + \mu(B_x - A_x) \\ P_y = A_y + \mu(B_y - A_y) \end{cases} \quad (\text{A.12})$$

Desconociendo las coordenadas X e Y de P, además del parámetro μ , la expresión A.12 se debe complementar para determinar P. Dado que P es el extremo de un segmento PC, perpendicular por definición a la dirección AB, el producto escalar $\overrightarrow{PC} \cdot \overrightarrow{AB}$ debe ser 0 como se mencionó en la sección A.5:

$$\overrightarrow{PC} \cdot \overrightarrow{AB} = \overrightarrow{PC}_x \cdot \overrightarrow{AB}_x + \overrightarrow{PC}_y \cdot \overrightarrow{AB}_y = 0 \quad (\text{A.13})$$

En este contexto el parámetro μ , que permite calcular P, se puede obtener mediante la siguiente expresión [REY09]:

$$\mu = \frac{(C_x - A_x)(B_x - A_x) + (C_y - A_y)(B_y - A_y)}{(B_x - A_x)^2 + (B_y - A_y)^2} \quad (\text{A.14})$$

El parámetro μ se puede ver además como la coordenada de P sobre la base unidimensional que define el vector \overrightarrow{AB} . Por lo tanto, que el valor de μ esté en el intervalo [0, 1] denota implícitamente que P está entre los puntos A y B de la base como se mencionó en la sección

A.6. En este caso, la distancia buscada es simplemente la distancia entre los puntos P y C , es decir, el módulo del vector que forman.

Sin embargo, si $\mu > 1$ el punto P está fuera del segmento, aunque en su dirección, y teniendo como punto más cercano B . Consiguientemente, la distancia entre C y el segmento AB es la distancia entre los puntos B y C .

En contraposición, si $\mu < 0$, la referencia será el punto A y la distancia buscada se obtendrá como la distancia entre A y C .

A.8.- Adaptación de coordenadas de un plano 2D orientado a 3D

Sea un plano rectangular π sobre el que se define un sistema bidimensional de coordenadas cartesianas X', Y' . El plano se encuentra en un espacio tridimensional en el que se define un sistema de coordenadas cartesianas X, Y, Z . Ambas bases están definidas por vectores unitarios. El plano π se ubica en el espacio mediante las coordenadas de su punto central P , que se mantienen constantes tanto en el plano como en el espacio. P es el punto $(0, 0)$ sobre π y el (e, n, c) en el espacio. El plano π se orienta en elevación (ϵ) y azimut (α) en torno a su punto central P .

El movimiento en elevación varía el ángulo que forma el eje Y' con el plano XY del espacio en el intervalo $(0 - 90^\circ)$. El movimiento en azimut varía el ángulo que el eje X' forma con la dirección del eje X del espacio en el intervalo $(0 - 360^\circ)$, que siempre se mantiene paralelo al plano XY . Esta situación se ilustra en la figura A.8 indicándose como ejemplo un plano con Elevación 90° y Azimut 0° así como la posición de referencia de Elevación 0° y Azimut 0° .

En este contexto se desea poder transcribir las coordenadas bidimensionales (x', y') de los puntos del plano π a las coordenadas tridimensionales (x, y, z) del espacio. De π se conocen las coordenadas de su punto central en el espacio y su orientación en elevación y azimut.

Dado el origen P y una base X', Y' sobre el plano π y aplicando la ecuación vectorial del plano (expresión A.7), se puede afirmar que el punto Z de coordenadas conocidas (u, v) queda definido en π mediante la siguiente expresión:

$$Z = P + uX' + vY' \quad (\text{A.15})$$

Cada uno de los elementos de la expresión A.15 es a su vez representable en el espacio tridimensional X, Y, Z . Por lo tanto, descomponiendo dicha expresión en las tres componentes de sus elementos, Z queda definido en la base X, Y, Z de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}
 Z_X &= P_X + uX'_X + vZ'_X \\
 Z_Y &= P_Y + uX'_Y + vZ'_Y \\
 Z_Z &= P_Z + uX'_Z + vZ'_Z
 \end{aligned}
 \tag{A.16}$$

En base a la expresión A.16, conociendo la representación del origen de coordenadas P del plano π en el espacio como (e, n, c) y las coordenadas (u, v) de Z sobre π basta con expresar los vectores X' e Y' sobre XYZ en relación a la elevación y azimut del plano para poder obtener Z en XYZ .

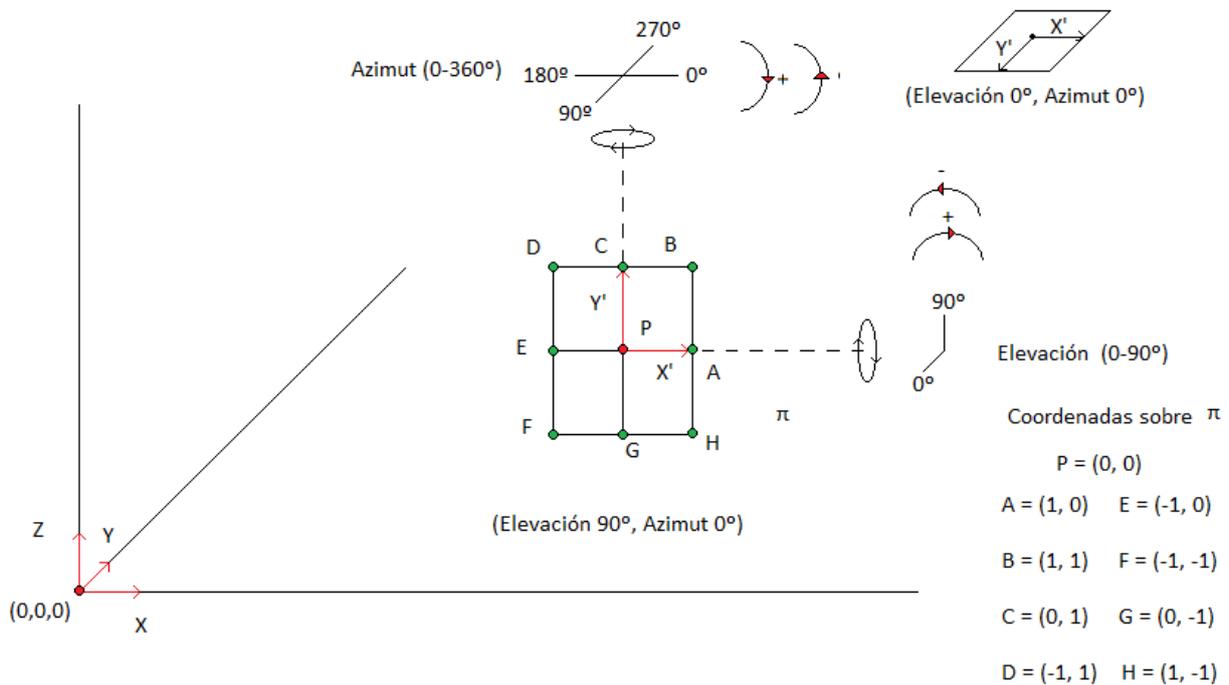


Figura A.8.- Coordenadas sobre un plano orientable en elevación y azimut.

La base de π se puede superponer a la base espacial para poder relacionar la elevación y el azimut con su proyección sobre dicha base. Esta superposición se muestra en la siguiente figura en vista cenital:

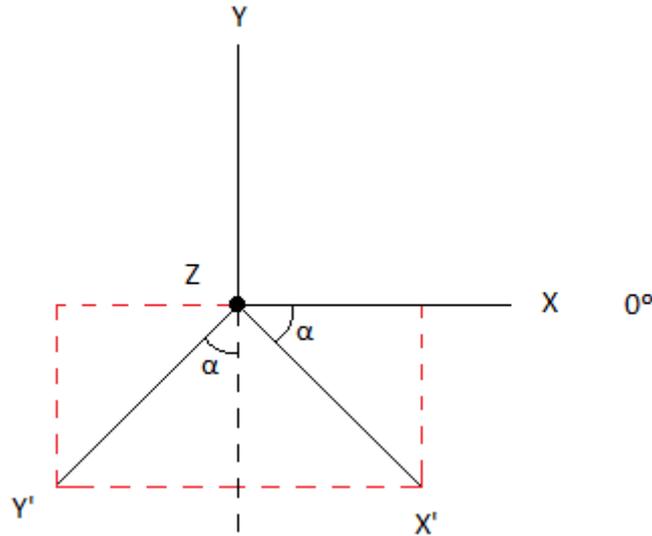


Figura A.9.- Superposición de la base espacial y la base de π en vista cenital.

Las proyecciones del eje X' sobre los ejes X e Y se pueden obtener directamente de la figura A.9 aplicando razones trigonométricas básicas sobre un triángulo rectángulo. De esta forma, el eje X' y teniendo en cuenta que siempre es paralelo a la superficie XY , en la base X,Y,Z es igual a:

$$X' = (\cos \alpha, -\text{sen } \alpha, 0) \quad (\text{A.17})$$

El eje Y' tiene unas proyecciones calculables, a priori, aplicando un desfase de 90° sobre la expresión A.17 y el sentido inverso de Y' respecto a Y . Sin embargo, hay que tener en cuenta que la figura A.9 se trata de una vista cenital y que la elevación ϵ del plano π afecta directamente a la proyección del eje Y' sobre los ejes XYZ de la base espacial. Para hacer esta consideración resulta útil hacer una vista lateral sobre la superposición de ejes de la figura A.9:

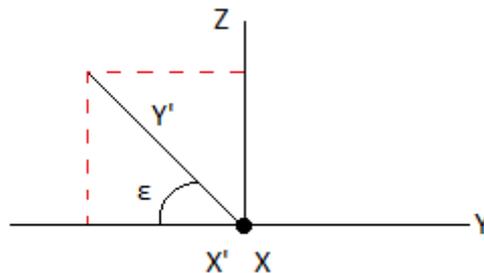


Figura A.10.- Superposición de la base espacial y la base de π en vista lateral.

La proyección del eje Y' sobre el plano XY se observa claramente dependiente de la elevación ϵ de π . Además, Y' tiene una proyección sobre el eje Z dependiente también de ϵ .

Aplicando de nuevo las razones trigonométricas básicas sobre triángulos rectángulos, el eje Y' tiene la siguiente representación sobre la base X,Y,Z :

$$Y' = (-\cos \varepsilon \operatorname{sen} \alpha, -\cos \varepsilon \operatorname{sen} \alpha, \operatorname{sen} \varepsilon) \quad (\text{A.18})$$

Es posible entonces, conociendo las coordenadas del punto central en el espacio, la elevación y el azimut del plano π , aplicar la expresión A.16 para expresar un punto Z de coordenadas conocidas en dicho plano a la base espacial X,Y,Z .

Si se contempla finalmente la posibilidad de que los módulos de los vectores X' e Y' de π no sean unitarios sino que tengan un cierto módulo s , las expresiones A.17 y A.18 de la siguiente forma:

$$X' = (s \cos \alpha, -s \operatorname{sen} \alpha, 0) \quad (\text{A.19})$$

$$Y' = (-s \cos \varepsilon \operatorname{sen} \alpha, -s \cos \varepsilon \operatorname{sen} \alpha, s \operatorname{sen} \varepsilon) \quad (\text{A.20})$$

Se pueden entonces integrar igualmente en la expresión A.16 para determinar las coordenadas de Z en el espacio X,Y,Z a partir del centro invariante P , el azimut y elevación del plano π (α, ε respectivamente) y las coordenadas (u, v) de Z sobre dicho plano.

Apéndice B. Herramientas auxiliares desarrolladas

En este apéndice se muestran brevemente las cuatro utilidades autónomas desarrolladas para poder probar de forma directa, independiente y exhaustiva ciertos componentes y cálculos involucrados en el proyecto.

B.1.- Utilidad de representación de campos de helióstatos

Esta herramienta gráfica, desarrollada en C#, permite representar, de forma aproximada, campos de helióstatos a partir de sus coordenadas cartesianas sobre la superficie de la central y el radio de su circunferencia característica.

La interfaz de la aplicación, muy sencilla, se muestra en la siguiente imagen con cuatro helióstatos (en rojo) y el receptor (en blanco) representados:

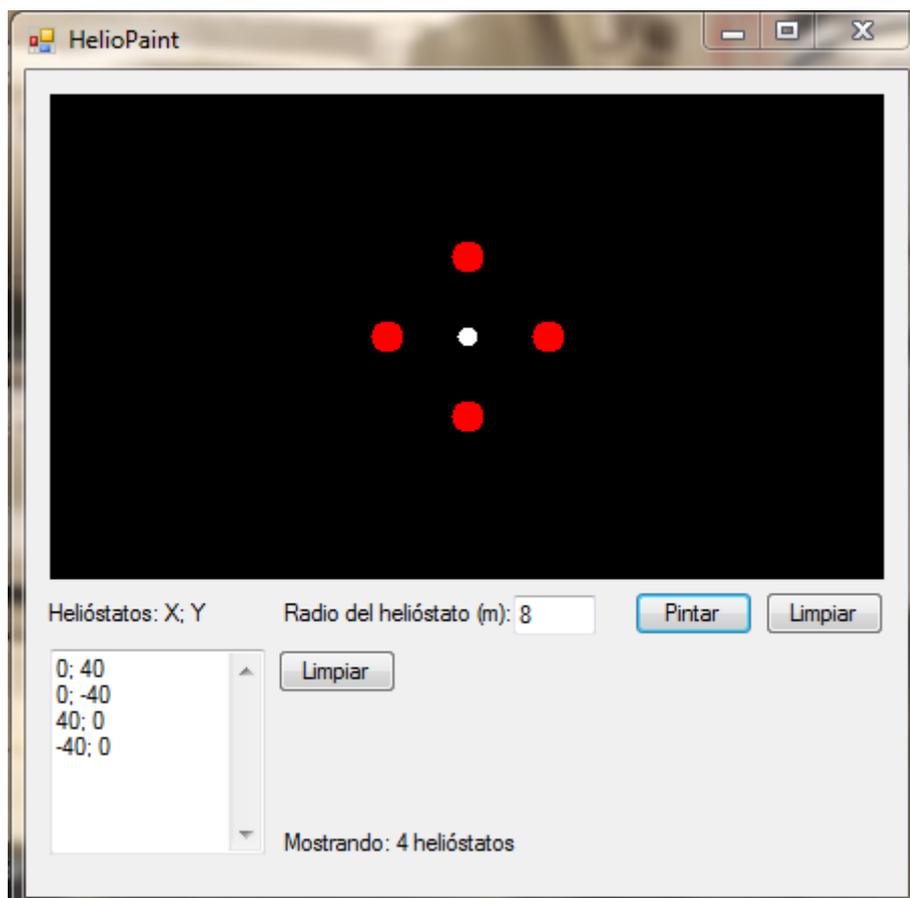
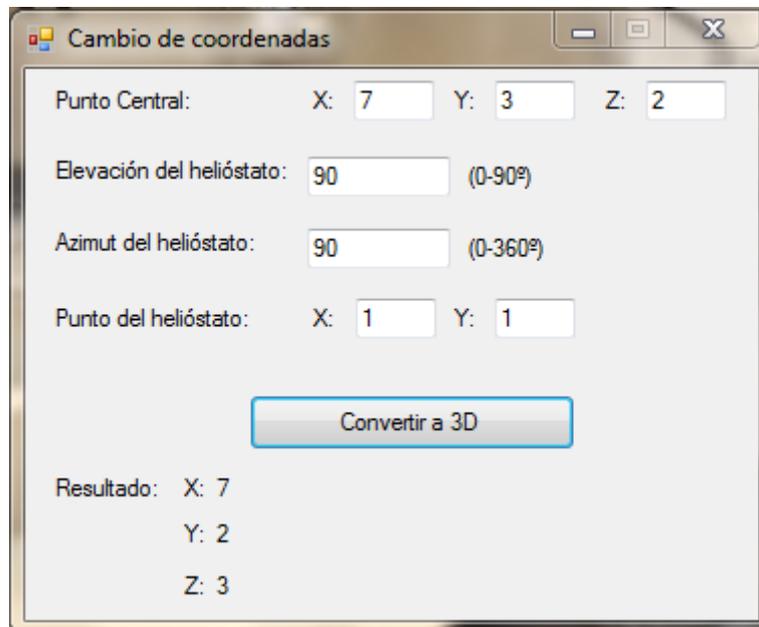


Figura B.1.- Interfaz de la utilidad de representación de campos solares definidos por coordenadas cartesianas.

B.2.- Utilidad de transcripción de puntos del heliostato al espacio

Esta herramienta gráfica, desarrollada en C#, permite transcribir puntos, en el sistema de coordenadas del heliostato y asumiendo un espacio de muestreo $s=1$, al espacio o sistema de coordenadas de la torre mediante la implementación de las fórmulas descritas en el apéndice A sección 8.

En la imagen B.2 se incluye se puede ver la interfaz de la herramienta realizando una conversión. La conversión de ejemplo es sobre un heliostato cuyo centro está en el punto espacial $(7, 3, 2)$, tiene una orientación de $(90^\circ, 90^\circ)$ en (Elevación, Azimut), y el punto de interés es el $(1, 1)$ del heliostato. El resultado, como se puede apreciar, es el punto $(7, 2, 3)$.



The image shows a software window titled "Cambio de coordenadas" with the following fields and values:

- Punto Central: X: 7, Y: 3, Z: 2
- Elevación del heliostato: 90 (0-90°)
- Azimut del heliostato: 90 (0-360°)
- Punto del heliostato: X: 1, Y: 1

A button labeled "Convertir a 3D" is located below the input fields. Below the button, the result is displayed as:

Resultado: X: 7
Y: 2
Z: 3

Figura B.2.- Utilidad de transcripción de puntos del heliostato al espacio con un ejemplo.

B.3.- Utilidad de orientación de heliostatos

Esta herramienta gráfica, desarrollada en C#, calcula la orientación en Elevación-Azimut de un cierto heliostato dada la posición aparente del Sol, las coordenadas de superficie del heliostato y la altura del receptor y del heliostato. Se aplican las fórmulas tratadas en la sección 3.5.10.

En la figura B.3 se incluye una imagen de la utilidad resolviendo un ejemplo extraído de [STI01]: Se orienta un helióstato de coordenadas XY (100, 50) y altura 10m hacia un receptor de 210m con una posición aparente del Sol de 50° de altitud y 180° de azimut.

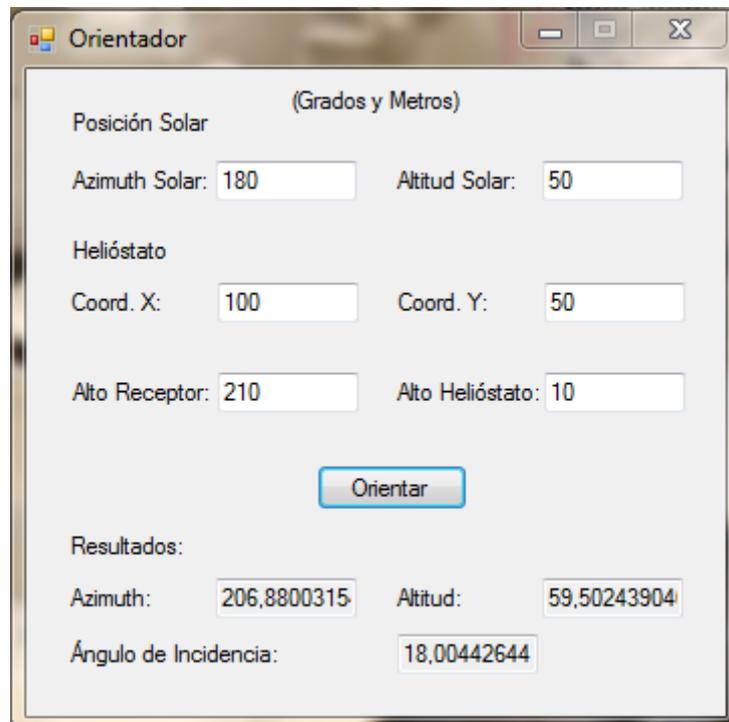


Figura B.3.- Utilidad de orientación de helióstatos resolviendo un ejemplo de [STI01].

B.4.- Utilidad de cálculos relacionados con el Sol

Esta herramienta de línea de comandos, desarrollada en C++ en las fases iniciales de desarrollo, hace uso de los mismos componentes del modelo de rendimiento del campo solar para poder realizar, bajo demanda, los siguientes cálculos básicos tratados en el capítulo 3, sección 3.5:

- Posicionamiento aparente del Sol dada una latitud, el número de día del año y la hora solar.
- Convertir la hora solar en hora angular.
- Calcular la declinación solar según el número de día.
- Estimar la densidad de radiación instantánea (Insolación) directa según la altura sobre el nivel del mar y la altitud aparente del Sol.
- Obtener el número de día dada una fecha de día, mes y año.
- Obtener el día y mes dado un número de día del año.

- Calcular la hora solar a partir de la hora local, la longitud terrestre de la ubicación, el número de día y teniendo en cuenta el huso horario así como si se está en modo ahorro. (No empleado realmente en el proyecto, véase el capítulo 3 de [STI01])
- Calcular la hora local a partir de la hora solar, la longitud terrestre, el número de día, teniendo en cuenta el huso horario y si se está en modo ahorro. (No empleado realmente en el proyecto, véase el capítulo 3 de [STI01])
- Obtener las horas de amanecer y anochecer de un cierto día, según la latitud y el número de día.

En la figura B.4 se incluye una muestra de la ejecución de la utilidad calculando la posición aparente del Sol en una latitud de 36° , en el día número 126 del año y a las 12:00 (hora solar).

```

nicolasc@nicolasc-desktop:~/Escritorio/PFG/MiPFG/FObjetivo$ ./Calculadora
Introduzca p para posicionar el Sol
          h para obtener la hora angular a partir de una hora solar
          e para obtener la declinación solar en un cierto número de día
          i para calcular la insolacion directa instantánea
          d para obtener el número de día a partir de su fecha
          j para obtener el día y mes a partir de un número de día
          s para obtener la hora solar a partir de la hora de reloj
          r para obtener la hora local a partir de la hora solar
          a para obtener las horas de amanecer y anochecer de un cierto día
          q para salir

p
Latitud (°):
36
Número de día:
126
Hora Solar (Horas):
12
Posicion del Sol:
- Altitud: 1.22092 (radianes) ; 69.9535 (°)
- Azimut : 3.14159 (radianes) ; 180 (°)
-----

```

Figura B.4.- Utilidad de cálculos básicos del modelo de rendimiento.

Apéndice C. Adaptación de UEGO y GASUB

En este apéndice se resumen los pasos fundamentales de la adaptación de la implementación utilizada de UEGO (que incluye también a GASUB) a la resolución del problema tratado en sus dos vertientes. Es además importante mencionar que la distribución de la librería UEGO original se ha clonado en dos directorios distintos, uno para la adaptación de UEGO y otro para la de GASUB, de cara a evitar interferencias entre modificaciones en archivos empleados comúnmente en el proceso.

C.1.- Adaptación de UEGO

La implementación del algoritmo UEGO se ha recibido en un archivo comprimido con el contenido que se muestra en la figura C.1. Nótese, sin embargo, que los archivos *“uegoini.prueba”* y *“uegoini.test”* se han añadido en el proceso de adaptación. No obstante, el archivo *“uegoini.prueba”* se hizo simplemente para tomar contacto con la definición de problemas bajo UEGO y tomando como referencia otras definiciones incluidas como muestra (los archivos *“uegoini.f*”*).

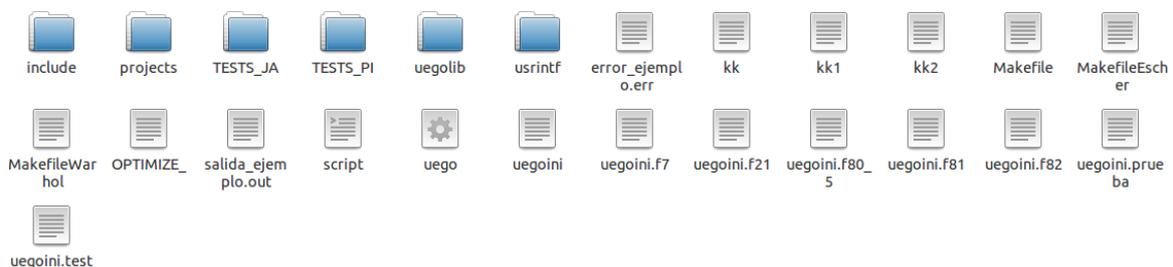


Figura C.1.- Contenido de la implementación de UEGO.

El archivo *“uegoini.test”* contiene una definición básica del problema en su primera vertiente, es decir, optimizando las variables del modelo de diseño expuesto en el capítulo 3 sección 4. El contenido de este archivo, con unos parámetros de prueba, se incluye parcialmente en la figura C.2.

Como se puede apreciar en la figura C.2, en primer lugar se incluyen los parámetros de la instancia del problema, incluyendo la información pertinente al muestreo del tiempo. A continuación se define la semilla de generación de números aleatorios en el proceso de búsqueda y, finalmente, se define el espacio de búsqueda en R (*“search space type : 0”*), con 8 dimensiones (como el modelo de ubicación) y se indican los límites inferior y superior de cada dimensión mediante dos vectores (*“lower bound vector”* y *“upper bound vector”*)

respectivamente). Esta información será legible por UEGO cuando se ejecute sobre el problema y será accesible desde su contexto. El archivo queda concluido con parámetros propios de UEGO como el número máximo de evaluaciones permitidas de la función objetivo, el radio mínimo... que no se han incluido en la figura C.2.

```
[Problem parameters]
Latitud Ubicacion: 0.0
Altura Sobre Mar: 0.0
Altura Torre: 100.0
Altura Heliostatos: 10.0
Ancho Heliostatos: 2.0
Alto Heliostatos: 2.0
Espacio de Muestreo: 1.0
Reflectividad Heliostatos: 0.9
Numero Heliostatos: 1
Radio Base: 40.0
Distancia Operacion: 1.0
Epsilon: 0.00001

[Problem analysis conditions]
Tipo de Muestreo: 0
Numero de Parametros de Cronometro: 1
Vector de Parametros de Cronometro:
0.261799

[Random numbers]

random seed: 123456789

[Objective function]

search space type: 0
function index: 0
dimension of space: 8
lower bound vector:
3.00 0.0 -5.0 -1.0 3.0 0.0 0.00 0.000
upper bound vector:
15.00 0.5 5.0 1.0 20.0 5.0 1.00 0.500
```

Figura C.2.- Fragmento del contenido “uegoini.test”.

Una vez se prepara un archivo de definición de problema, como el mencionado “uegoini.test”, se declaran entonces un conjunto de etiquetas como constantes en el archivo “/include/uegoconf.h”. Estas etiquetas, que deberán tener como contenido la descripción empleada en el archivo de definición, permitirán solicitar y referenciar internamente la información atendiendo a cómo se ha identificado en dicho archivo.

A continuación se prepara en el archivo “/uegoini.h” la representación interna de los valores y parámetros que se deberán leer del archivo de definición, dentro de la clase “Ini”. Esta clase contiene y da soporte a las herramientas que se usan en un proceso de optimización con UEGO. La representación interna se hará mediante la declaración de atributos privados en la mencionada clase “Ini”. Es importante destacar además que se crearán los métodos destinados al acceso de dicha información en la sección pública de la clase. En la figuras C.4 y C.5 se pueden ver ambas cuestiones respectivamente.

Seguidamente se realiza la lectura e inicialización de los atributos mencionados en la clase “Ini” en la implementación de su constructor, que se encuentra en “uegolib/ini.cc”. En esta lectura se emplean las herramientas que proporciona el propio marco de trabajo de UEGO para la lectura de valores sobre un archivo de definición: GetValue y GetVector. Se hace uso

también de las etiquetas que se declararon en “include/uegoconf.h”. En la figura C.6 se muestra esta sección del constructor de “Ini”.

```
// ----- defining problem parameters (Solar Plant)

#define LATUB "Latitud Ubicacion:"
#define ALTSM "Altura Sobre Mar:"
#define ALTO "Altura Torre:"
#define ALTHEL "Altura Heliostatos:"
#define LONGHH "Ancho Heliostatos:"
#define LONGVH "Alto Heliostatos:"
#define ESPMU "Espacio de Muestreo:"
#define REFH "Reflectividad Heliostatos:"
#define NUMH "Numero Heliostatos:"
#define RBASE "Radio Base:"
#define DEXTRA "Distancia Operacion:"
#define EPSILON "Epsilon:"
#define TMUESTREO "Tipo de Muestreo:"
#define NPARAMMU "Numero de Parametros de Cronometro:"
#define VPARAMMU "Vector de Parametros de Cronometro:"
```

Figura C.3.- Declaración de etiquetas en “/include/uegoconf.h”.

private:

```
// --- problem parameters (Solar Plant)-----
double latitudUbicacion;
double alturaSMar;
double alturaTorre;
double alturaHeliostatos;
double anchoHeliostatos;
double altoHeliostatos;
double espacioMuestreo;
double reflectividadHeliostatos;
int numeroHeliostatos;
double radioBase;
double distanciaExtraOperacion;
double epsilon;
int tipoMuestreo;
int nParametrosCronometro;
double* vectorParametrosCronometro;
```

Figura C.4.- Declaración de atributos para contener los parámetros propios del problema en la clase “Ini” (/include/uegoini.h).

```

//Acceso de lectura a los parametros del problema
double LatitudUbicacion(){return latitudUbicacion;};
double AlturaSMar(){return alturaSMar;};
double AlturaTorre(){return alturaTorre;};
double AlturaHeliostatos(){return alturaHeliostatos;};
double AnchoHeliostatos(){return anchoHeliostatos;};
double AltoHeliostatos(){return altoHeliostatos;};
double EspacioMuestreo(){return espacioMuestreo;};
double ReflectividadHeliostatos(){return reflectividadHeliostatos;};
int NumeroHeliostatos(){return numeroHeliostatos;};
double RadioBase(){return radioBase;};
double DistanciaExtraOperacion(){return distanciaExtraOperacion;};
double Epsilon(){ return epsilon;};
int TipoMuestreo(){return tipoMuestreo;};
int NParametrosCronometro(){return nParametrosCronometro;};
double* VectorParametrosCronometro(){ return vectorParametrosCronometro;};

```

Figura C.5.- Creación de los métodos de acceso a los atributos creados en la clase “Ini”
(include/uegoini.h)

Posteriormente se enlazan las clases implementadas para la función objetivo en el archivo “include/uego.h”, bastando con incluir aquellas que a su vez carguen el resto de componentes necesarios. En la figura C.7 se incluye un fragmento de las importaciones realizadas en este archivo.

```

// --- parameter load (Solar Plant)-----
latitudUbicacion = (double) GetValue( buff, LATUB );
alturaSMar = (double) GetValue( buff, ALTSM );
alturaTorre = (double) GetValue( buff, ALTTT );
alturaHeliostatos = (double) GetValue( buff, ALTHEL );
anchoHeliostatos = (double) GetValue( buff, LONGHH );
altoHeliostatos = (double) GetValue( buff, LONGVH );
espacioMuestreo = (double) GetValue( buff, ESPMU);
reflectividadHeliostatos = (double) GetValue( buff, REFH);
numeroHeliostatos = (int) GetValue( buff, NUMH);
radioBase = (double) GetValue( buff, RBASE );
distanciaExtraOperacion = (double) GetValue( buff, DEXTRA );
epsilon = (double) GetValue( buff, EPSILON);
tipoMuestreo = (int) GetValue( buff, TMUESTREO);
nParametrosCronometro = (int) GetValue( buff, NPARAMMU);
vectorParametrosCronometro = (double*) malloc(sizeof(double)*nParametrosCronometro);

```

Figura C.6.- Lectura de los parámetros definidos para el problema en el constructor de la clase “Ini” (uegolib/ini.cc).

```

#include "Heliostato.h"
#include "IMuestreo.h"
#include "MuestreoParabolico.h"
#include "MuestreoConstante.h"
#include "MuestreoSegmentado.h"

```

Figura C.7.- Fragmento de importaciones en include/uego.h.

Para concluir la adaptación, se incluyen directamente las funciones necesarias del modelo de rendimiento y de ubicación en el archivo “projects/nrealval.cc”, donde se encuentra además la función objetivo a la que accederá UEGO en el proceso de búsqueda: “*double NDimRealElement::Value()*”. Desde este método se manejarán los aspectos del modelo de rendimiento y ubicación inyectados para devolver la valoración de una cierta configuración del campo solar propuesta en un momento dado de la búsqueda. Es importante mencionar que la solución a evaluar dentro de dicho método es un vector denominado “x”, en el que están ordenados los valores de la solución candidata según la dimensión, y al que es necesario acceder para realizar la valoración del resultado del modelo de ubicación.

Es posible entonces compilar UEGO con los cambios mediante la utilidad “Makefile”, en la que habrá que haber incluido también las referencias a los distintos archivos externos empleados. Para lanzar la resolución del problema definido en un cierto archivo bastará con ejecutar el siguiente comando:

```
#./uego <NombreProblema>
```

Donde <NombreProblema> sería, en el contexto del problema definido, “test”. Nótese por tanto que UEGO obvia la parte “uegoini.” de los archivos de definición de problemas y se referencia según el final del archivo mencionado al comienzo de esta sección.

C.2.- Adaptación de GASUB

Como ya se ha anticipado, la librería UEGO con la que se cuenta tiene una implementación de GASUB destinada a problemas discretos. Por consiguiente, el proceso descrito en la sección anterior de este apéndice es prácticamente igual. No obstante, hay ciertas diferencias que se comentan a continuación.

En el archivo de definición, lo referente a las variables contextuales del problema (latitud de ubicación, altura sobre el nivel del mar...) se ha mantenido igual en la estructura. Sin embargo, la sección correspondiente a la función objetivo es significativamente diferente a la de la sección anterior, dado que la segunda vertiente del problema tratado tiene un espacio de búsqueda completamente distinto. El contenido de este archivo de definición, para un caso de prueba muy sencillo, se incluye parcialmente en la figura C.8.

```
[Objective function]
search space type:      1
Numero de posiciones:  6
Coordenadas X:
-8.0 -4.0 0.0 4.0 8.0 12.0
Coordenadas Y:
20.0 20.0 26.0 26.0 18.0 16.0
```

Figura C.8.- Fragmento del archivo de definición de un problema para GASUB.

Como se puede apreciar en la figura C.8, en esta ocasión se indica que el espacio de búsqueda es de tipo 1 (discreto), lo que implicará que GASUB se aplique a este problema dentro de la librería UEGO. Inmediatamente a continuación se especifica el número de elementos que habrá en el espacio de búsqueda discreto para, seguidamente, listar las coordenadas que definen cada posición disponible. El archivo de definición concluiría con la especificación de los parámetros de GASUB. Se incluye un fragmento de ejemplo de esta sección en la figura C.9.

Es interesante destacar que la sección de parámetros de los archivos de definición es exactamente igual, en estructura y nombrado, tanto para la resolución de problemas mediante UEGO en entornos reales como para UEGO sobre problemas de localización discreta, GASUB. Este detalle pone de manifiesto la semejanza conceptual de ambos algoritmos. De hecho, el fragmento de la figura C.9 sería perfectamente válido para un tipo de espacio de búsqueda real (*“search space type: 0”*).

```
[UEGO parameters]

function evaluations: 500
max. species number: 6
stability threshold: 44.6025
levels: 4

function evaluations in new species:
225 225 225 225 225 225
225 225 225

evaluations for levels:
0 100 150 250

radii for levels:
25.000000 17.482895 12.226064 1.000000e-00
```

Figura C.9.-Sección de parámetros para GASUB en un archivo de definición.

GASUB emplea como función objetivo la función *“double BinaryElement::Value()”*, que se define en el archivo *“projects/nbinval.cc”*, a diferencia de la función *“double NDimRealElement::Value()”* en *“projects/nrealval.cc”* que utiliza UEGO. Por consiguiente, se ha inyectado la implementación de la función objetivo en dicho archivo. En este caso, la solución candidata es accesible desde una función *“x(<índice>)”*. Esta función devuelve 1 ó 0, dado un cierto índice de posición, en función de si ha de seleccionarse o no. De esta forma hay que recorrer cada ubicación posible llamando a *“x(índice)”* para situar los helióstatos disponibles en aquellas posiciones, escogidas de entre las posibles, en una cierta solución.

Se puede añadir, para concluir la perspectiva general del proceso de adaptación a GASUB, que la implementación recibida estaba preparada ya para un cierto problema de localización. Por este motivo ha sido necesario suprimir o ignorar aquellos atributos y métodos innecesarios de la clase INI, aprovechando la estructura conceptual básica y común. De esta forma se han mantenido simplemente las llamadas a *“INI.NewLoc()”*

reemplazándolas por “INI.NumeroDeHeliostatos()” y a “INI.Locations()” por “INI.PosicionesDisponibles()” en donde se emplean. Como se puede deducir por los nombres de los reemplazos, “INI.NumeroDeHeliostatos()” devuelve el número de posiciones que se pueden escoger mientras que “INI.PosicionesDisponibles()” devuelve el total de posiciones que existen. Estos dos parámetros definen el problema de localización de helióstatos abordado.

Apéndice D. Datos empíricos adicionales

En este apéndice se incluye información complementaria sobre los datos de los experimentos y mediciones realizadas que, por cuestiones prácticas, se omiten en detalle cuando se muestran y analizan en el cuarto capítulo.

D.1.- Información adicional sobre los promedios para el estudio del impacto del factor de bloqueo y sombreado

En esta sección se incluyen, además de los promedios mostrados en la sección 4.3, el máximo y mínimo valor de cada medición, la desviación típica y el intervalo de confianza (al 95%) de dichos promedios, sobre las dos fuentes de datos tomadas.

En la tabla D.1 se recogen los promedios de tiempo para el cálculo de rendimiento completo (incluyendo el factor de bloqueo y sus operaciones derivadas) sobre la primera fuente de datos. Esta fuente de datos son los resultados de la optimización basada en posiciones procedentes del resultado de la Búsqueda Voraz, junto con la mejor y peor solución encontrada por GASUB y la Búsqueda Aleatoria en cada caso. Los tiempos del cálculo de la eficiencia o rendimiento óptico de la central para cada distribución se han medido, a su vez, con cincuenta repeticiones para aumentar la fiabilidad de los tiempos.

Nº de Helióstatos	Tiempo Promedio Completo (s)	Mínimo & Máximo	Desviación Típica	Intervalo de Confianza (95%)
2	0,0847	0,0755 & 0,1124	0,0115	[0,0802; 0,0892]
5	0,2275	0,2156 & 0,2536	0,0109	[0,2232; 0,2318]
10	0,5390	0,5205 & 0,5625	0,0126	[0,5341; 0,5440]
12	0,7098	0,6707 & 0,8067	0,0285	[0,6986; 0,7210]
15	0,9665	0,9307 & 0,9934	0,0168	[0,9600; 0,9731]
18	1,3281	1,2838 & 1,4879	0,0615	[1,3040; 1,3522]
20	1,5505	1,4875 & 1,6933	0,0461	[1,5324; 1,5685]
22	1,8230	1,7781 & 1,8645	0,0270	[1,8124; 1,8336]
25	2,2837	2,1775 & 2,4452	0,0734	[2,2549; 2,3124]
28	2,8330	2,6682 & 3,1211	0,1206	[2,7857; 2,8803]
30	3,0847	2,9401 & 3,6457	0,1521	[3,0251; 3,1443]
32	3,4681	3,3598 & 3,5882	0,0628	[3,4435; 3,4927]

Tabla D.1.- Medidas de tiempo para el cálculo de rendimiento completo sobre las soluciones procedentes de la optimización sobre posiciones disponibles (Búsqueda Aleatoria Pura, GASUB y Algoritmo Voraz, 2ª Vertiente del problema).

Respecto a la segunda fuente de datos, los diseños generados mediante el muestreo y selección sistemática de “N” posiciones necesarias, se incluye su información adicional correspondiente al promedio de tiempos en la tabla D.2.

Nº de Helióstatos	Tiempo Promedio Completo (s)	Mínimo & Máximo	Desviación Típica	Intervalo de Confianza (95%)
2	0,1134	0,0925 & 0,1940	0,0451	[0,0739; 0,1529]
5	0,3534	0,3169 & 0,3804	0,0286	[0,3284; 0,3784]
10	0,8340	0,8092 & 0,8691	0,0239	[0,8130; 0,8550]
12	1,0289	1,0066 & 1,0749	0,0277	[1,0046; 1,0531]
15	1,3745	1,3412 & 1,3950	0,0218	[1,3555; 1,3936]
18	1,7754	1,7107 & 1,8997	0,0782	[1,7069; 1,8440]
20	1,9663	1,9253 & 2,0403	0,0434	[1,9283; 2,0044]
22	2,2556	2,2083 & 2,3123	0,0401	[2,2205; 2,2908]
25	2,6775	2,6245 & 2,7990	0,0703	[2,6159; 2,7391]
28	2,9877	2,9717 & 3,0006	0,0113	[2,9778; 2,9975]
30	3,2785	3,2688 & 3,2987	0,0126	[3,2675; 3,2895]
32	3,5924	3,5680 & 3,6176	0,0220	[3,5731; 3,6117]
50	7,6155	7,5476 & 7,6744	0,0463	[7,5750; 7,6561]
75	16,3335	16,1317 & 16,5117	0,1363	[16,2140; 16,4529]
100	27,2774	26,8305 & 27,4454	0,2528	[27,0558; 27,4990]
125	41,3709	40,7233 & 41,7947	0,3930	[41,0264; 41,7154]
150	58,4717	56,0294 & 60,8787	1,9260	[56,7835; 60,1600]
175	76,9004	75,2912 & 77,8255	1,0093	[76,0158; 77,7851]
200	97,5246	95,2477 & 99,9397	1,8612	[95,8932; 99,1560]

Tabla D.2.- Medidas de tiempo para el cálculo de rendimiento completo sobre la selección sistemática de posiciones muestreadas.

Tras la exposición de los datos para el cálculo de rendimiento completo se incluye análogamente la información adicional para el tiempo de cálculo del rendimiento parcial o reducido (sin considerar el factor de bloqueo y sombreado ni operaciones derivadas) sobre las dos fuentes de datos, en las tablas D.3 y D.4 respectivamente.

Nº de Helióstatos	Tiempo Promedio Reducido (s)	Mínimo & Máximo	Desviación Típica	Intervalo de Confianza (95%)
2	0,0104	0,0092 & 0,0114	0,0006	[0,0101; 0,0106]
5	0,0192	0,0178 & 0,0229	0,0011	[0,0188; 0,0196]

10	0,0333	0,0321 & 0,0357	0,0009	[0,0329; 0,0336]
12	0,0383	0,0367 & 0,0403	0,0008	[0,0380; 0,0386]
15	0,0470	0,0452 & 0,0495	0,0011	[0,0466; 0,0475]
18	0,0557	0,0537 & 0,0711	0,0033	[0,0544; 0,0570]
20	0,0627	0,0591 & 0,0778	0,0051	[0,0607; 0,0647]
22	0,0669	0,0648 & 0,0854	0,0040	[0,0653; 0,0685]
25	0,0749	0,0735 & 0,0813	0,0016	[0,0743; 0,0756]
28	0,0861	0,0813 & 0,1301	0,0122	[0,0813; 0,0909]
30	0,0883	0,0868 & 0,0893	0,0006	[0,0880; 0,0885]
32	0,0942	0,0924 & 0,0977	0,0015	[0,0936; 0,0948]

Tabla D.3.- Medidas de tiempo para el cálculo de rendimiento reducido sobre las soluciones procedentes de la optimización sobre posiciones disponibles (Búsqueda Aleatoria Pura, GASUB y Algoritmo Voraz, 2ª Vertiente del problema).

Nº de Helióstatos	Tiempo Promedio Reducido (s)	Mínimo & Máximo	Desviación Típica	Intervalo de Confianza (95%)
2	0,0102	0,0093 & 0,0109	0,0006	[0,0096; 0,0107]
5	0,0198	0,0186 & 0,0225	0,0015	[0,0184; 0,0211]
10	0,0329	0,0324 & 0,0336	0,0004	[0,0325; 0,0333]
12	0,0412	0,0380 & 0,0496	0,0048	[0,0370; 0,0454]
15	0,0467	0,0459 & 0,0476	0,0006	[0,0461; 0,0473]
18	0,0558	0,0544 & 0,0586	0,0017	[0,0544; 0,0573]
20	0,0611	0,0601 & 0,0620	0,0008	[0,0604; 0,0618]
22	0,0667	0,0658 & 0,0675	0,0007	[0,0661; 0,0674]
25	0,0740	0,0731 & 0,0750	0,0009	[0,0732; 0,0747]
28	0,0833	0,0818 & 0,0856	0,0015	[0,0820; 0,0846]
30	0,0876	0,0871 & 0,0882	0,0004	[0,0873; 0,0880]
32	0,0935	0,0923 & 0,0948	0,0009	[0,0927; 0,0943]
50	0,1434	0,1425 & 0,1440	0,0006	[0,1429; 0,1438]
75	0,2117	0,2104 & 0,2132	0,0012	[0,2106; 0,2127]
100	0,2809	0,2788 & 0,2832	0,0018	[0,2793; 0,2825]
125	0,3487	0,3460 & 0,3530	0,0028	[0,3462; 0,3511]
150	0,4297	0,4184 & 0,4581	0,0167	[0,4150; 0,4443]
175	0,4880	0,4864 & 0,4904	0,0020	[0,4863; 0,4898]
200	0,5523	0,5516 & 0,5538	0,0009	[0,5516; 0,5531]

Tabla D.4.- Medidas de tiempo para el cálculo de rendimiento reducido sobre la selección sistemática de posiciones muestreadas.

En las tablas D.5 y D.6 se incluye finalmente la información adicional sobre el promediado del valor de rendimiento óptico completo y reducido respectivamente para la primera fuente de datos. Nótese que se omiten estos datos sobre la segunda ya que no se trata de una combinación de distintos diseños para cada número de heliostatos y, por tanto las eficiencias son únicas en cada situación.

Nº de Heliostatos	Promedio de Eficiencia Completa [0, 1]	Mínimo & Máximo	Desviación Típica	Intervalo de Confianza (95%)
2	0,7779	0,7770 & 0,7783	0,0005	[0,7774; 0,7784]
5	0,7641	0,7622 & 0,7649	0,0011	[0,7631; 0,7651]
10	0,7504	0,7463 & 0,7529	0,0025	[0,7483; 0,7526]
12	0,7444	0,7396 & 0,7478	0,0035	[0,7414; 0,7475]
15	0,7390	0,7320 & 0,7424	0,0044	[0,7351; 0,7428]
18	0,7361	0,7312 & 0,7401	0,0036	[0,7330; 0,7392]
20	0,7325	0,7267 & 0,7361	0,0044	[0,7287; 0,7364]
22	0,7293	0,7233 & 0,7325	0,0040	[0,7258; 0,7329]
25	0,7236	0,7168 & 0,7275	0,0050	[0,7192; 0,7280]
28	0,7182	0,7112 & 0,7229	0,0054	[0,7135; 0,7230]
30	0,7150	0,7083 & 0,7202	0,0055	[0,7101; 0,7198]
32	0,7173	0,7090 & 0,7226	0,0057	[0,7123; 0,7223]

Tabla D.5.- Información del promediado de valores de rendimiento óptico completo en las soluciones procedentes de la optimización sobre posiciones disponibles (Búsqueda Aleatoria Pura, GASUB y Algoritmo Voraz, 2ª Vertiente del problema).

Nº de Heliostatos	Promedio de Eficiencia Reducida [0, 1]	Mínimo & Máximo	Desviación Típica	Intervalo de Confianza (95%)
2	0,7814	0,7811 & 0,7822	0,0005	[0,7810; 0,7818]
5	0,7731	0,7707 & 0,7748	0,0018	[0,7715; 0,7747]
10	0,7620	0,7569 & 0,7655	0,0033	[0,7591; 0,7649]
12	0,7587	0,7515 & 0,7634	0,0046	[0,7547; 0,7627]
15	0,7566	0,7503 & 0,7619	0,0044	[0,7528; 0,7604]
18	0,7570	0,7548 & 0,7610	0,0025	[0,7548; 0,7592]
20	0,7557	0,7519 & 0,7603	0,0032	[0,7529; 0,7584]
22	0,7554	0,7519 & 0,7583	0,0023	[0,7533; 0,7574]
25	0,7549	0,7530 & 0,7564	0,0013	[0,7537; 0,7560]
28	0,7516	0,7502 & 0,7529	0,0012	[0,7505; 0,7526]

30	0,7489	0,7440 & 0,7509	0,0028	[0,7464; 0,7514]
32	0,7522	0,7483 & 0,7546	0,0025	[0,7500; 0,7544]

Tabla D.6.- Información del promediado de valores de rendimiento óptico parcial en las soluciones procedentes de la optimización sobre posiciones disponibles (Búsqueda Aleatoria Pura, GASUB y Algoritmo Voraz, 2ª Vertiente del problema).

D.2.- Información adicional sobre los promedios para el estudio de la aceleración obtenida con la paralelización del modelo de rendimiento

En esta sección se incluyen, de forma análoga a la anterior, los valores máximo y mínimo medidos en la experimentación con el modelo de rendimiento paralelizado, la desviación típica de su promedio y su intervalo de confianza al 95%. Dicha información, basada también en cincuenta mediciones por caso, se encuentra en la tabla D.7. Además, como se indica en la sección 4.4, las mediciones de tiempo para la ejecución del modelo de rendimiento óptico “completo” incluidas en la tabla D.2 proceden de la versión secuencial de modelo de rendimiento óptico y se aplican también para la comparativa entre la versión paralela y en serie. Por este motivo, dicha tabla puede enmarcarse también en el ámbito de interés de esta sección.

Nº de Helióstatos	Tiempo Promedio Completo PARALELO (s)	Mínimo & Máximo	Desviación Típica	Intervalo de Confianza (95%)
2	0,1024	0,0951 & 0,1086	0,0005	[0,0977; 0,1072]
5	0,3136	0,2822 & 0,3633	0,0035	[0,2825; 0,3446]
10	0,6077	0,5704 & 0,6521	0,0033	[0,5784; 0,6370]
12	0,8548	0,7629 & 1,1125	0,0146	[0,7267; 0,9829]
15	1,0920	1,0311 & 1,2574	0,0094	[1,0093; 1,1747]
18	1,4013	1,3750 & 1,4727	0,0041	[1,3650; 1,4376]
20	1,5239	1,4817 & 1,5445	0,0027	[1,5004; 1,5473]
22	1,6984	1,6042 & 1,7623	0,0061	[1,6447; 1,7522]
25	2,0195	1,9545 & 2,0688	0,0042	[1,9828; 2,0562]
28	2,1805	2,1421 & 2,2498	0,0042	[2,1440; 2,2170]
30	2,3937	2,3678 & 2,4469	0,0032	[2,3657; 2,4216]
32	2,7740	2,5700 & 3,3855	0,0346	[2,4709; 3,0771]
50	4,9342	4,8757 & 4,9943	0,0053	[4,8875; 4,9810]
75	10,9402	10,6769 & 11,2182	0,0203	[10,7623; 11,1181]
100	17,3180	17,1606 & 17,5736	0,0159	[17,1791; 17,4570]

125	26,2723	26,0887 & 26,4257	0,0130	[26,1586; 26,3860]
150	38,8062	36,3595 & 41,8449	0,2653	[36,4811; 41,1314]
175	49,2573	48,9168 & 50,1860	0,0536	[48,7875; 49,7271]
200	61,7298	60,7152 & 63,0641	0,0977	[60,8738; 62,5857]

Tabla D.7.- Medidas de tiempo para el cálculo de rendimiento completo, en paralelo, sobre la selección sistemática de posiciones muestreadas.

D.3.- Información adicional sobre los promedios para el estudio de distintos sistemas de muestreo del tiempo

En esta sección se incluye información extra sobre el promedio de tiempos medido según el tipo de muestreo del tiempo indicado en la sección 4.5. En la tabla D.8 se muestra, para cada tipo de muestreo tratado, el tiempo de cálculo empleado, en segundos, para determinar el factor de rendimiento óptico anual no ponderado con la intensidad de radiación. El modelo de rendimiento óptico se ha empleado en versión paralela. Se incluyen, además de los promedios, los valores máximo y mínimo junto con la desviación típica y el intervalo de confianza (al 95%) de dichos promedios. Estas mediciones se han realizado llevando a cabo diez repeticiones en cada caso.

En la tabla D.9 se incluye la información equivalente a la de la tabla anterior, aunque referente al cálculo del rendimiento óptico ponderado con la intensidad.

Tipo de Muestreo	Tiempo Promedio (Sin Ponderación)(s)	Mínimo & Máximo	Desviación Típica	Intervalo de Confianza (95%)
Constante: 1 medición por hora	2,3625	2,2953 & 2,5246	0,0963	[2,2780; 2,4469]
Constante: 1 medición por minuto	134,6803	130,2090 & 138,0430	2,8289	[132,2005; 137,1599]
Parabólico: 1 medición por minuto de mínimo; 1 medición cada 30 minutos de máximo	34,1760	33,4175 & 34,9620	0,7450	[33,5230; 34,8290]
Segmentado: 1	88,7394	87,3426 &	1,0013	[87,8617;

medición por minuto el 25% central del día, 1 medición cada 5 minutos el 41,67% siguiente y 1 medición cada 30 minutos el 33,33% final		89,4936		89,6170]
--	--	---------	--	----------

Tabla D.8.- Tiempos de cálculo del rendimiento óptico no ponderado según el tipo de muestreo.

Tipo de Muestreo	Tiempo Promedio (Con Ponderación)(s)	Mínimo & Máximo	Desviación Típica	Intervalo de Confianza (95%)
Constante: 1 medición por hora	2,3631	2,3279 & 2,3843	0,0210	[2,3447; 2,3815]
Constante: 1 medición por minuto	137,8652	135,3720 & 139,9450	1,8610	[136,2340; 139,4964]
Parabólico: 1 medición por minuto de mínimo; 1 medición cada 30 minutos de máximo	34,1946	33,8430 & 34,5513	0,3064	[33,9261; 34,4632]
Segmentado: 1 medición por minuto el 25% central del día, 1 medición cada 5 minutos el 41,67% siguiente y 1 medición cada 30 minutos el 33,33% final	89,1700	88,0737 & 90,8576	1,2515	[88,0730; 90,2668]

Tabla D.9.- Tiempos de cálculo del rendimiento óptico ponderado según el tipo de muestreo.

D.4.- Información adicional para el estudio del rendimiento de los optimizadores sobre la segunda vertiente del problema

En esta sección se incluye información complementaria de interés para la comparativa de rendimiento, en tiempo y resultados, de los optimizadores aplicados a la segunda vertiente del problema.

En la tabla D.10 se complementa la información del promedio de tiempos que se muestra en el capítulo 4 sección 6.2 para el optimizador de tipo voraz incluyendo los valores extremos, la desviación típica y el intervalo de confianza (al 95%). En las tablas D.11 y D.12 se incluye la misma información adicional referente a los tiempos de la BAP y GASUB respectivamente.

Nº de Helióstatos	Tiempo promedio (s)	Mínimo & Máximo	Desviación Típica	Intervalo de Confianza (95%)
2 sobre 6	0,8310	0,7885 & 0,8829	0,0421	[0,7941; 0,8679]
5 sobre 15	7,3442	7,2727 & 7,5554	0,1216	[7,2376; 7,4507]
10 sobre 30	48,0795	47,2739 & 48,8983	0,6902	[47,4746; 48,6845]
12 sobre 36	81,3618	81,0759 & 81,7608	0,2884	[81,1090; 81,6146]
15 sobre 45	165,4650	164,7637 & 166,0119	0,5534	[164,9799; 165,9502]
18 sobre 54	297,3440	294,8468 & 300,9691	2,2832	[295,3427; 299,3453]
20 sobre 60	438,0100	434,8665 & 446,2336	4,6983	[433,8918; 442,1282]
22 sobre 66	598,8712	592,3703 & 602,7465	3,9117	[595,4425; 602,3000]
25 sobre 75	925,7462	918,2158 & 948,8494	12,9700	[914,3775; 937,1150]
28 sobre 84	1538,7297	1404,2659 & 1669,0156	103,9007	[1447,6567; 1629,8026]
30 sobre 90	1739,9547	1688,8819 & 1828,3452	60,9798	[1686,5035; 1793,4058]
32 sobre 100	2335,5145	2286,9067 & 2386,3332	41,6885	[2298,9729; 2372,0561]

Tabla D.10.- Tiempos empleados en la optimización sobre posiciones por el optimizador voraz.

Nº de Helióstatos	Tiempo promedio (s)	Mínimo & Máximo	Desviación Típica	Intervalo de Confianza (95%)
2 sobre 6	0,8792	0,7954 & 1,0260	0,1018	[0,7900; 0,9685]
5 sobre 15	7,3332	7,2336 & 7,4251	0,0859	[7,2579; 7,4085]
10 sobre 30	48,1770	47,8833 & 48,5890	0,3026	[47,9118; 48,4423]

12 sobre 36	80,4244	79,8989 & 81,5194	0,6583	[79,8473; 81,0014]
15 sobre 45	160,8636	158,4290 & 163,5700	1,8488	[159,2430; 162,4842]
18 sobre 54	299,0658	295,5360 & 303,7300	3,1812	[296,2774; 301,8542]
20 sobre 60	433,3778	430,7780 & 436,0900	1,9328	[431,6836; 435,0720]
22 sobre 66	598,3338	584,8010 & 620,9990	13,5956	[586,4167; 610,2509]
25 sobre 75	998,9310	908,0370 & 1305,0000	171,5428	[848,5671; 1149,2949]
28 sobre 84	1482,4620	1465,7000 & 1519,5000	22,5703	[1462,6783; 1502,2457]
30 sobre 90	1750,7340	1722,3500 & 1792,9700	35,4537	[1719,6575; 1781,8105]
32 sobre 100	2264,8980	2246,6200 & 2324,5000	33,4551	[2235,5733; 2294,2227]

Tabla D.11.- Tiempos empleados en la optimización sobre posiciones por el optimizador BAP.

Nº de Helióstatos	Tiempo promedio (s)	Mínimo & Máximo	Desviación Típica	Intervalo de Confianza (95%)
2 sobre 6	64,8000	63,0000 & 69,0000	2,4900	[62,6174; 66,9826]
5 sobre 15	170,0000	163,0000 & 175,0000	4,4721	[166,0800; 173,9200]
10 sobre 30	384,6000	381,0000 & 389,0000	2,9665	[381,9998; 387,2002]
12 sobre 36	492,4000	488,0000 & 496,0000	3,7815	[489,0853; 495,7147]
15 sobre 45	695,6000	677,0000 & 730,0000	22,5344	[675,8477; 715,3523]
18 sobre 54	950,4000	935,0000 & 961,0000	10,0896	[941,5561; 959,2439]
20 sobre 60	1131,6000	1117,0000 & 1144,0000	12,1778	[1120,9256; 1142,2744]
22 sobre 66	1322,2000	1306,0000 & 1341,0000	13,5167	[1310,3521; 1334,0479]
25 sobre 75	1688,0000	1680,0000 & 1698,0000	8,0312	[1680,9604; 1695,0396]
28 sobre 84	1932,6000	1920,0000 & 1950,0000	14,6219	[1919,7833; 1945,4167]
30 sobre 90	2149,4000	2140,0000 & 2163,0000	9,1542	[2141,3760; 2157,4240]
32 sobre 100	2450,8000	2387,0000 & 2535,0000	56,5924	[2401,1946; 2500,4054]

Tabla D.12.- Tiempos empleados en la optimización sobre posiciones por el optimizador GASUB.

En las tablas D.13, D.14 y D.15, a título de complemento, se muestran conjuntamente los valores de eficiencia tanto ponderados como sin ponderar, según la intensidad de radiación incidente. La tabla D.13 contiene la información procedente del optimizador de tipo voraz, mientras que la D.14 y la D.15 de BAP y GASUB respectivamente. Nótese también que, aunque para el enfoque voraz hay una única solución que tratar, para los diseños de los algoritmos de naturaleza estocástica se seleccionan el mejor y peor como muestra.

Nº de Helióstatos	Eficiencia Sin Ponderar	Eficiencia Ponderada
2	0,7770	0,8133
5	0,7648	0,8051
10	0,7509	0,7864
12	0,7461	0,7861
15	0,7412	0,7842
18	0,7378	0,7824
20	0,7357	0,7811
22	0,7325	0,7816
25	0,7275	0,7819
28	0,7229	0,7774
30	0,7202	0,7753
32	0,7210	0,77801

Tabla D.13.- Eficiencias ponderadas y sin ponderar para los diseños obtenidos mediante optimización sobre posiciones por un optimizador de tipo voraz.

PEOR DISEÑO		
Nº de Helióstatos	Eficiencia Sin Ponderar	Eficiencia Ponderada
2	0,7777	0,8133
5	0,7622	0,8020
10	0,7463	0,7857
12	0,7396	0,7795
15	0,7320	0,7711
18	0,7312	0,7805
20	0,7267	0,7748
22	0,7233	0,7740
25	0,7168	0,7733
28	0,7112	0,7672
30	0,7083	0,7639
32	0,7090	0,7667
MEJOR DISEÑO		
Nº de Helióstatos	Eficiencia Sin Ponderar	Eficiencia Ponderada
2	0,7783	0,8126
5	0,7639	0,8018
10	0,7505	0,7922

12	0,7420	0,7854
15	0,7374	0,7778
18	0,7338	0,7824
20	0,7289	0,7740
22	0,7270	0,7812
25	0,7195	0,7741
28	0,7137	0,7688
30	0,7099	0,7639
32	0,7140	0,7708

Tabla D.14.- Eficiencias ponderadas y sin ponderar para los diseños obtenidos mediante optimización sobre posiciones por el optimizador BAP.

PEOR DISEÑO		
Nº de Helióstatos	Eficiencia Sin Ponderar	Eficiencia Ponderada
2	0,7783	0,8126
5	0,7649	0,8047
10	0,7515	0,7906
12	0,7466	0,7891
15	0,7419	0,7800
18	0,7378	0,7847
20	0,7352	0,7841
22	0,7315	0,7821
25	0,7267	0,7791
28	0,7209	0,7740
30	0,7176	0,7730
32	0,7199	0,7757
MEJOR DISEÑO		
Nº de Helióstatos	Eficiencia Sin Ponderar	Eficiencia Ponderada
2	0,7783	0,8126
5	0,7649	0,8047
10	0,7529	0,7940
12	0,7478	0,7894
15	0,7424	0,7886
18	0,7401	0,7872
20	0,7361	0,7880
22	0,7323	0,7812
25	0,7273	0,7807
28	0,7224	0,7784
30	0,7189	0,7752
32	0,7226	0,7806

Tabla D.15.- Eficiencias ponderadas y sin ponderar para los diseños obtenidos mediante optimización sobre posiciones por el optimizador GASUB.

En las tablas D.16 y D.17 se complementa la información correspondiente a los promedios de eficiencia derivados de las distintas soluciones obtenidas para el optimizador BAP y GASUB respectivamente.

Número de Helióstatos	Eficiencia Promedio	Mínimo & Máximo	Desviación Típica	Intervalo de Confianza (95%)
2 sobre 6	0,7779	0,7777 & 0,7783	0,0003	[0,7777; 0,7782]
5 sobre 15	0,7635	0,7622 & 0,7639	0,0007	[0,7629; 0,7642]
10 sobre 30	0,7482	0,7463 & 0,7505	0,0016	[0,7467; 0,7496]
12 sobre 36	0,7408	0,7396 & 0,7420	0,0010	[0,7399; 0,7417]
15 sobre 45	0,7350	0,7320 & 0,7374	0,0020	[0,7333; 0,7368]
18 sobre 54	0,7327	0,7312 & 0,7338	0,0011	[0,7317; 0,7336]
20 sobre 60	0,7275	0,7267 & 0,7289	0,0009	[0,7267; 0,7282]
22 sobre 66	0,7250	0,7233 & 0,7270	0,0016	[0,7237; 0,7264]
25 sobre 75	0,7178	0,7168 & 0,7195	0,0011	[0,7168; 0,7188]
28 sobre 84	0,7122	0,7112 & 0,7137	0,0013	[0,7111; 0,7133]
30 sobre 90	0,7087	0,7083 & 0,7099	0,0006	[0,7082; 0,7093]
32 sobre 100	0,7110	0,7090 & 0,7140	0,0021	[0,7092; 0,7128]

Tabla D.16.- Información extendida sobre el valor de las soluciones alcanzadas por el optimizador BAP aplicado a un conjunto de posiciones disponibles.

Número de Helióstatos	Eficiencia Promedio	Mínimo & Máximo	Desviación Típica	Intervalo de Confianza (95%)
2 sobre 6	0,7783	0,7783 & 0,7783	0,0000	[0,7783; 0,7783]
5 sobre 15	0,7649	0,7649 & 0,7649	0,0000	[0,7649; 0,7649]
10 sobre 30	0,7522	0,7515 & 0,7529	0,0005	[0,7517; 0,7526]
12 sobre 36	0,7471	0,7466 & 0,7478	0,0005	[0,7467; 0,7475]
15 sobre 45	0,7422	0,7419 & 0,7424	0,0002	[0,7420; 0,7424]
18 sobre 54	0,7387	0,7378 & 0,7401	0,0009	[0,7379; 0,7395]
20 sobre 60	0,7357	0,7352 & 0,7361	0,0004	[0,7354; 0,7360]
22 sobre 66	0,7318	0,7315 & 0,7323	0,0003	[0,7315; 0,7321]
25 sobre 75	0,7269	0,7267 & 0,7273	0,0003	[0,7267; 0,7272]
28 sobre 84	0,7213	0,7209 & 0,7224	0,0006	[0,7207; 0,7218]
30 sobre 90	0,7183	0,7176 & 0,7189	0,0006	[0,7178; 0,7188]
32 sobre 100	0,7214	0,7199 & 0,7226	0,0010	[0,7206; 0,7222]

Tabla D.17.- Información extendida sobre el valor de las soluciones alcanzadas por el optimizador GASUB aplicado a un conjunto de posiciones disponibles.

D.5.- Información adicional para el estudio del rendimiento de los optimizadores sobre la primera vertiente del problema

En esta sección se incluye información complementaria de interés para la comparativa de rendimiento, en tiempo y resultados, de los optimizadores aplicados a la primera vertiente del problema.

En la tabla D.18 se complementa la información del promedio de tiempos que se muestra en el capítulo 4 sección 6.3 para el optimizador de tipo voraz incluyendo los valores extremos, la desviación típica y el intervalo de confianza (al 95%). En las tablas D.19 y D.20 se incluye la misma información adicional referente a los tiempos de la BAP y GASUB respectivamente.

Nº de Helióstatos	Tiempo promedio (s)	Mínimo & Máximo	Desviación Típica	Intervalo de Confianza (95%)
2	18,8428	18,7165 & 19,0470	0,1249	[18,7334; 18,9523]
5	47,0349	46,1235 & 49,0490	1,1623	[46,0161; 48,0537]
10	89,8618	89,2472 & 90,6300	0,5200	[89,4060; 90,3175]
12	114,9240	113,2256 & 117,3154	1,5740	[113,5444; 116,3037]
15	158,3560	151,6855 & 163,6544	4,8951	[154,0653; 162,6468]
18	202,5248	200,7067 & 205,9035	2,0485	[200,7292; 204,3204]
20	232,3592	231,8514 & 232,7370	0,4320	[231,9806; 232,7379]
22	280,4892	275,7763 & 285,8556	3,9752	[277,0047; 283,9736]
25	381,1852	377,0304 & 391,5257	5,9053	[376,0089; 386,3614]
28	434,7264	423,2863 & 444,8614	10,2349	[425,7552; 443,6977]
30	438,7743	429,5953 & 456,2143	10,6857	[429,4079; 448,1407]
32	502,1431	499,2357 & 504,5919	2,0510	[500,3453; 503,9408]

Tabla D.18.- Tiempos empleados en la optimización sobre un modelo de diseño por el optimizador voraz.

Nº de Helióstatos	Tiempo promedio (s)	Mínimo & Máximo	Desviación Típica	Intervalo de Confianza (95%)
2	18,5678	18,4056 & 18,6998	0,1139	[18,4680; 18,6677]
5	46,5042	46,1126 & 46,9213	0,3670	[46,1826; 46,8259]
10	94,3988	93,8140 & 94,9136	0,4133	[94,0366; 94,7611]
12	111,7327	109,3171 & 115,2345	2,5377	[109,5084; 113,9571]
15	153,1341	150,9518 & 154,9217	1,5533	[151,7725; 154,4956]
18	203,4227	201,0721 & 205,5596	1,8271	[201,8212; 205,0243]
20	233,6062	232,0987 & 236,3613	1,8462	[231,9879; 235,2245]
22	272,8154	270,5426 & 276,3194	2,1659	[270,9170; 274,7139]
25	364,2245	359,5953 & 368,9691	3,5438	[361,1182; 367,3307]
28	447,8822	433,9822 & 456,3726	9,1104	[439,8966; 455,8678]

30	424,0820	402,3188 & 451,9808	18,4167	[407,9390; 440,2250]
32	564,0570	555,3808 & 571,1238	7,1263	[557,8106; 570,3035]

Tabla D.19.- Tiempos empleados en la optimización sobre un modelo de diseño por el optimizador BAP.

Nº de Helióstatos	Tiempo promedio (s)	Mínimo & Máximo	Desviación Típica	Intervalo de Confianza (95%)
2	15,2000	13,0000 & 17,0000	1,4832	[13,8999; 16,5001]
5	51,0000	47,0000 & 56,0000	4,1833	[47,3332; 54,6668]
10	92,8000	90,0000 & 95,0000	1,9235	[91,1139; 94,4861]
12	123,4000	117,0000 & 133,0000	6,2690	[117,9050; 128,8950]
15	171,0000	151,0000 & 196,0000	16,2173	[156,7849; 185,2151]
18	223,4000	210,0000 & 245,0000	13,0307	[211,9781; 234,8219]
20	276,4000	223,0000 & 319,0000	39,7718	[241,5384; 311,2616]
22	296,2000	283,0000 & 305,0000	9,0388	[288,2771; 304,1229]
25	423,6000	377,0000 & 488,0000	49,8929	[379,8670; 467,3330]
28	447,2000	416,0000 & 495,0000	29,2951	[421,5218; 472,8782]
30	491,4000	467,0000 & 511,0000	18,2291	[475,4215; 507,3785]
32	520,4000	500,0000 & 537,0000	15,9154	[506,4495; 534,3505]

Tabla D.20.- Tiempos empleados en la optimización sobre un modelo de diseño por el optimizador UEGO.

En las tablas D.21, D.22 y D.23, como complemento, se muestran de forma conjunta los valores de eficiencia, ponderados y sin ponderar según la intensidad de radiación incidente. La tabla D.21 contiene la información procedente del optimizador de tipo voraz, mientras que la D.22 y la D.23 de BAP y GASUB respectivamente. Nótese también que, aunque para la solución voraz hay un único resultado que tratar, para los diseños de los algoritmos de naturaleza estocástica se seleccionan el mejor y peor, de cada instancia, como muestra.

Nº de Helióstatos	Eficiencia Sin Ponderar	Eficiencia Ponderada
2	0,7761	0,8121
5	0,7650	0,8066
10	0,7570	0,7963
12	0,7582	0,7975
15	0,7536	0,7940
18	0,7469	0,7895
20	0,7440	0,7872
22	0,7500	0,7937

25	0,7424	0,7954
28	0,7383	0,7929
30	0,7363	0,7796
32	0,7377	0,7827

Tabla D.21.- Eficiencias ponderadas y sin ponderar para los diseños obtenidos mediante optimización sobre posiciones por un optimizador de tipo voraz.

PEOR DISEÑO		
Nº de Helióstatos	Eficiencia Sin Ponderar	Eficiencia Ponderada
2	0,7760	0,8123
5	0,7663	0,8051
10	0,7576	0,7932
12	0,7572	0,7949
15	0,7539	0,7945
18	0,7496	0,7862
20	0,7466	0,7963
22	0,7453	0,7840
25	0,7435	0,7850
28	0,7426	0,7861
30	0,7389	0,7819
32	0,7388	0,7846
MEJOR DISEÑO		
Nº de Helióstatos	Eficiencia Sin Ponderar	Eficiencia Ponderada
2	0,7762	0,8122
5	0,7669	0,8052
10	0,7599	0,7970
12	0,7597	0,7993
15	0,7553	0,7928
18	0,7507	0,7949
20	0,7492	0,7886
22	0,7477	0,7880
25	0,7470	0,7877
28	0,7446	0,7870
30	0,7427	0,7914
32	0,7408	0,7884

Tabla D.22.- Eficiencias ponderadas y sin ponderar para los diseños obtenidos mediante optimización sobre posiciones por el optimizador BAP.

PEOR DISEÑO		
Nº de Helióstatos	Eficiencia Sin Ponderar	Eficiencia Ponderada
2	0,7760	0,8123

5	0,7669	0,8050
10	0,7605	0,7970
12	0,7585	0,7965
15	0,7539	0,7943
18	0,7507	0,7930
20	0,7490	0,7871
22	0,7459	0,7943
25	0,7450	0,7837
28	0,7431	0,7872
30	0,7398	0,7813
32	0,7408	0,7863
MEJOR DISEÑO		
Nº de Helióstatos	Eficiencia Sin Ponderar	Eficiencia Ponderada
2	0,7763	0,8124
5	0,7670	0,8053
10	0,7612	0,7989
12	0,7600	0,7981
15	0,7564	0,7990
18	0,7527	0,7926
20	0,7508	0,7933
22	0,7481	0,7887
25	0,7487	0,7914
28	0,7453	0,7891
30	0,7448	0,7910
32	0,7433	0,7923

Tabla D.23.- Eficiencias ponderadas y sin ponderar para los diseños obtenidos mediante optimización sobre posiciones por el optimizador GASUB.

En las tablas D.24 y D.25 se complementa la información de los promedios de eficiencia obtenidos a partir de las distintas soluciones obtenidas para el optimizador BAP y UEGO respectivamente.

Número de Helióstatos	Eficiencia Promedio	Mínimo & Máximo	Desviación Típica	Intervalo de Confianza (95%)
2	0,7761	0,7760 & 0,7762	0,0000	[0,7760; 0,7761]
5	0,7665	0,7663 & 0,7669	0,0002	[0,7663; 0,7667]
10	0,7592	0,7576 & 0,7599	0,0009	[0,7584; 0,7600]
12	0,7584	0,7572 & 0,7597	0,0009	[0,7575; 0,7592]
15	0,7543	0,7539 & 0,7553	0,0006	[0,7538; 0,7548]
18	0,7503	0,7496 & 0,7507	0,0004	[0,7499; 0,7506]
20	0,7482	0,7466 & 0,7492	0,0011	[0,7472; 0,7491]
22	0,7460	0,7453 & 0,7477	0,0010	[0,7451; 0,7469]
25	0,7446	0,7435 & 0,7470	0,0014	[0,7434; 0,7459]
28	0,7436	0,7426 & 0,7446	0,0008	[0,7429; 0,7443]

30	0,7407	0,7389 & 0,7427	0,0016	[0,7393; 0,7420]
32	0,7399	0,7388 & 0,7408	0,0008	[0,7392; 0,7405]

Tabla D.24.- Información extendida sobre el valor de las soluciones alcanzadas por el optimizador BAP. aplicado a un modelo de diseño.

Número de Helióstatos	Eficiencia Promedio	Mínimo & Máximo	Desviación Típica	Intervalo de Confianza (95%)
2	0,7761	0,7760 & 0,7763	0,0001	[0,7760; 0,7762]
5	0,7669	0,7669 & 0,7670	0,0000	[0,7669; 0,7670]
10	0,7609	0,7605 & 0,7612	0,0003	[0,7606; 0,7612]
12	0,7592	0,7585 & 0,7600	0,0006	[0,7586; 0,7597]
15	0,7551	0,7539 & 0,7564	0,0011	[0,7542; 0,7560]
18	0,7518	0,7507 & 0,7527	0,0008	[0,7511; 0,7525]
20	0,7498	0,7490 & 0,7508	0,0007	[0,7492; 0,7504]
22	0,7474	0,7459 & 0,7481	0,0009	[0,7466; 0,7482]
25	0,7468	0,7450 & 0,7487	0,0014	[0,7456; 0,7481]
28	0,7442	0,7431 & 0,7453	0,0009	[0,7434; 0,7450]
30	0,7423	0,7398 & 0,7448	0,0022	[0,7404; 0,7443]
32	0,7422	0,7408 & 0,7433	0,0009	[0,7413; 0,7430]

Tabla D.25.- Información extendida sobre el valor de las soluciones alcanzadas por el optimizador GASUB aplicado a un modelo de diseño.