



Universidad
Carlos III de Madrid
www.uc3m.es

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

TESIS DOCTORAL

OPTIMIZACIÓN EFICIENTE DE PROCESOS DE INTERACCIÓN LASER-MATERIA MEDIANTE CONFORMACIÓN TEMPORAL DE PULSOS ULTRACORTOS

Autor:

Inocencio Marcial Galván Sosa

Director:

Luis Moreno Lorente

Director:

Javier Solís Céspedes

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE SISTEMAS Y
AUTOMÁTICA

Leganés, Julio 2014

TESIS DOCTORAL

OPTIMIZACIÓN EFICIENTE DE PROCESOS DE INTERACCIÓN
LASER-MATERIA MEDIANTE CONFORMACIÓN TEMPORAL DE PULSOS
ULTRACORTOS

Autor: Inocencio Marcial Galván Sosa

Director : Luis Moreno Lorente
Director : Javier Solís Céspedes

Tribunal

Presidente : Fernando López Martínez _____

Secretario: Daniel Jaque García _____

Vocal : Luis Bañares Morcillo _____

Título: Doctorado en Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Automática
Calificación: _____

Leganés, 27 de Junio de 2014

Resumen

La interacción de pulsos láser ultracortos en el rango de los femtosegundos con medios materiales da lugar a una amplia variedad de fenómenos de naturaleza no lineal. Dichos efectos dependen de la potencia de pico del pulso y, por ende, de su estructura temporal. Mediante la utilización de métodos experimentales es posible manipular las componentes espectrales del pulso y sintetizar estructuras temporales de complejidad arbitraria. De esta forma es posible modificar el resultado de la interacción.

En el ámbito de esta tesis se ha utilizado como herramienta de conformación temporal del pulso ultracorto un sintetizador de pulsos basado en una configuración del tipo 4f con un modulador espacial de luz (*SLM*) ubicado en el plano de Fourier del sistema. El modulador posee un elevado número de parámetros de control (320 pixeles) que son utilizados para modificar la fase espectral del pulso ultracorto.

Encontrar el perfil temporal óptimo para que el pulso genere o maximice un determinado efecto, sin conocimiento suficiente de la dinámica en la interacción no lineal, hace necesario utilizar un bucle de aprendizaje para resolver el problema. En el mismo, un algoritmo de optimización controla el funcionamiento del *SLM*, usando como retroalimentación la evaluación una medida del efecto de interacción no lineal inducido por el pulso sintetizado. Los algoritmos más utilizados en este escenario, compuesto por un elevado número de variables de control que condicionan una interacción no-lineal con mecanismos subyacentes desconocidos, no modelizados o no modelizables, son los algoritmos evolutivos. Estos últimos son algoritmos estocásticos basados en poblaciones y requieren, por regla general, un elevado número de evaluaciones para alcanzar la convergencia. En los casos en los que la cantidad de recursos existentes es limitada, como puede ser el tiempo de vida en biomuestras fotosensibles o la cantidad de muestra disponible en experimentos de modificación estructural inducida por absorción multifotónica, la aplicación de algoritmos evolutivos puede resultar inviable. Ello hace necesario la utilización de algoritmos eficaces que permitan minimizar el número de evaluaciones requeridas. Atendiendo a determinadas consideraciones topológicas derivadas de estudios de teoría de control cuántico, hemos diseñado un nuevo algoritmo de optimización determinista que hace uso de optimización marginal de la fase en el dominio de la frecuencia. Dicho algoritmo, denominado *Multiple One-Dimensional Search (MODS)*, presenta una elevada velocidad de convergencia y ha sido validado experimentalmente en interacciones no lineales en sólidos (generación de efecto Kerr y absorción multifotónica), gases (optimización de alineamiento molecular de N_2 atmosférico) y en la nano-escala (optimización de la generación de segundo armónico en nanocrstales de $BaTiO_3$). Los resultados obtenidos muestran que MODS supone una alternativa real y eficaz frente a la utilización de algoritmos evolutivos en este tipo de problemas. De forma adicional se ha comprobado la viabilidad del uso de Differential Evolution (DE), un algoritmo evolutivo especialmente eficiente en la optimización de problemas no lineales con elevado número de variables de control y especialmente

robusto frente al ruido experimental. Este algoritmo no se había analizado anteriormente en este tipo de problemas de forma sistemática. El desempeño y robustez de ambos algoritmos, MODS y DE, han sido testados frente al estándar habitual en este tipo de problemas, un algoritmo genético (GA). Los resultados permiten concluir que tanto DE como MODS superan el rendimiento de los GA en este tipo de problemas, siendo MODS órdenes eficiente en cuanto al número de evaluaciones requerida para la convergencia y DE más robusto frente al ruido experimental.

A Michela y Rita.

Agradecimientos

La tesis que tienes entre manos ha sido posible gracias trabajo de mucha gente, es imposible detallar en unas palabras la ayuda y el apoyo que he recibido durante estos años.

En primer lugar gracias a mis directores Javier Solis y Luis Moreno por confiar en mi para poder llevar a cabo este trabajo. Sin su ayuda no habría sido posible mezclar estos dos mundos de la física experimental y la ingeniería.

Gracias a Jan Siegel por tener siempre una mano dispuesta, un gran sentido del humor, y un ratito para charlar. Eres un mago Jan, y haces la mejor fabada del mundo.

Gracias a Wojciech por su inmensa labor de hacer nuestro primer Sintetizador y FROG, los precursores de los sistemas actuales. Y a Javi Hernandez, sin su ayuda no habría sido posible aprender todo lo que he llegado a saber de estos sistemas.

Gracias a Alex Ruiz, por su paciencia infinita mientras me ayudaba, por enésima vez, a alinear el sistema, gracias por hacer fácil lo difícil.

Gracias a los miembros presentes y pasados del Grupo de Procesado por Láser por su acogida e inmensa labor de investigación que realiza, Resalía, Roberta, Giorgio, Jesus, Mario, Ramón, Lorena, Hector, David, Sara, Puerto,... Quiero mostrar mi especial agradecimiento a Carmen Afonso por sus valiosos consejos, a Pepe por sus charlas distendidas y por ser uno de los mejores testigos de boda del mundo, a Miguel Jimenez por ser cada vez mas antisistema y a Fátima que puede resolverlo todo mientras mantiene la sonrisa. Gracias a todos, ha sido muy agradable trabajar con ustedes.

Gracias a la gente de ICFO, Pablo Roque, Nicoló Accanto y Niek van Hulst, por facilitarme el acceso al mundo de los pequeño pequeño. Especialmente a Pablo, por haber estado siempre ahí, con sus consejos y sus ánimos, sin ti no habría sobrevivido. ¡gracias por enseñarme la cara asturiana de la vida!

Gracias a Rebeca de Nalda y Juan Ortigoso por su inestimable colaboración y ayuda con el alineamiento molecular.

Gracias a Porti, por sus inmensas aportaciones a este trabajo. !Aun nos quedan unos cuantos eternos debates pendientes!

Javier Solis merece una mención especial, gracias a ti mi visión del mundo es ahora un poquito mejor. Me has enseñado mucho Javier, gracias.

Y por último gracias a Rita y a Michela, por aguantarme durante todo este tiempo y darme su apoyo incondicional, sin ellas no habría podido llegar tan lejos. Gracias mis niñas.

Madrid, Junio 2014

Marcial Galván Sosa

Abreviaturas

AE - Algoritmo Evolutivo
AG - Algoritmo Genético
APD - Avalanche Photodiode
B - Barrido
CMA-ES - Covariance Matrix Adaptation
CPA - Chirped Pulse Amplification
D - número de nodos
DE - Differential Evolution
EE - Estrategia Evolutiva
FROG - Frecuency Resolved Optical Gating
f - Distancia focal
 \mathcal{F} - Fourier Transform
FFT - Fast Fourier Transform
fs - Femtosegundo
FWHM - Full With Half Maximun
 γ - Gamma, angulo de salto de refinamiento
GS - Gerchberg-Saxton
GW - GigaWatio
ICFO - Institut de Ciences Fotoniques
ITO - Indium Tin Oxide
km/s - Kilómetros por segundo
 λ - Lambda, longitud de onda
MA - Molecular Alignment
MEB - Microscopía Electrónica de Barrido
MIIPS - Multiphoton Intrapunse Interference Phase Scan
MODS - Multiple One-Dimensional Search
mJ - miliJulio
ms - milisegundo
mW - miliWatio
 μm - micrómetro
NC - Nano Cristal
nm - nanómetro
OSA - Optical Spectrum Analizer
pc - probabilidad de cruce
pm - probabilidad de mutacion
QCL - Quantum Control Landscape
QCT - Quantum Control Theory
rad - Radián
S - Salto
SA - Simmulated Annealing

SG - Seguidor de Gradiente
SH - Second Harmonic
SHG - Second Harmonic Generation
 σ - Sigma, distancia de salto
SLM - Spatial Light Modulator
TPA - Two Photon Absorption
TOD - Third Order Dispersion
V - Voltio

Índice general

Resumen	I
Agradecimientos	VII
Abreviaturas	IX
1. Introducción	1
1.1. Introducción	2
1.2. Objetivos y metodología	7
1.3. Estructura	8
2. Fundamentos	11
2.1. Introducción	12
2.2. Pulso láser ultracorto y conformación temporal	12
2.2.1. Pulso láser ultracorto	12
2.2.2. Conformación temporal	14
2.3. Efectos ópticos no-lineales	16
2.4. Optimización	19
3. Soporte Experimental	27
3.1. Introducción	28
3.2. Sistema láser	29
3.3. Sintetizador de pulsos	32
3.3.1. Configuración del sintetizador de pulsos	32
3.3.2. El modulador espacial de luz, <i>SLM</i>	36
3.3.3. Limitaciones del sistema	40
3.4. Caracterización temporal con PG-FROG	43
4. Soluciones Propuestas	47
4.1. Introducción	48
4.2. Modelo del espacio de control	48

4.2.1.	Capacidad de control sobre la fase	48
4.2.2.	Espacio de manipulación de parámetros	50
4.2.3.	Elección del espacio de búsqueda	50
4.2.4.	Codificación de la fase	50
4.2.5.	Interpolación de puntos de control de la fase	52
4.2.6.	Limitaciones por el número de nodos utilizados	55
4.2.7.	Multimodalidad intrínseca	55
4.3.	Algoritmo Genético	56
4.3.1.	Funcionamiento general	57
4.4.	Differential Evolution	60
4.4.1.	Funcionamiento general	61
4.4.2.	Variantes usadas	63
4.5.	Algoritmo propuesto: <i>MODS</i>	65
4.5.1.	Bases formales de <i>MODS</i>	69
4.5.2.	Descripción del algoritmo	70
4.5.3.	Algoritmo <i>MODS</i> completo	77
4.5.4.	Ilustración de funcionamiento	80
5.	Resultados Experimentales	85
5.1.	Restricciones experimentales	86
5.1.1.	Ruido intrínseco	86
5.1.2.	Ruidos emergentes. Efectos no deseados de la manipulación de fase	91
5.1.3.	Conclusiones	95
5.2.	Generación de formas de onda arbitrarias	97
5.2.1.	Descripción experimental	97
5.2.2.	Resultados experimentales	99
5.2.3.	Conclusiones	105
5.3.	Compresión de pulsos	107
5.3.1.	Absorción de dos fotones	107
5.3.2.	Generación de Segundo Armónico en la nano-escala	116
5.3.3.	Conclusiones	122
5.4.	Alineamiento molecular	123
5.4.1.	Descripción experimental	125
5.4.2.	Resultados experimentales	128
5.4.3.	Conclusiones	134
5.5.	<i>FROG</i> con desajuste temporal	135
5.5.1.	Descripción experimental	135
5.5.2.	Resultados experimentales	136
5.5.3.	Conclusiones	151

5.6. Visualización del espacio de soluciones	153
6. Conclusiones y desarrollo futuro	157
6.1. Conclusiones	158
6.2. Desarrollo Futuro	160
A. Publicaciones asociadas	161
A.1. Publicaciones y Comunicaciones a Congresos Internacionales relacionadas con el desarrollo y utilización de Algoritmo “Multiple, one-dimensional search” (MODS)	162
A.2. Publicaciones y Comunicaciones a Congresos Internacionales relacionadas con la utilización de técnicas de conformación temporal de pulsos ultracortos	163
Bibliografía	165

Índice de cuadros

3.1. Características principales de los dos sintetizadores utilizados.	34
4.1. Número de puntos de control de fase por cada cuadrante	49

Índice de figuras

1.1.	Visión global del problema. Los pulsos láser son estructurados temporalmente mediante la manipulación de su fase espectral. El resultado de la interacción del nuevo pulso conformado, $e_{trial}(t)$, con nuestro experimento es observado (medido) y esta información es utilizada por los algoritmos de optimización para guiar el resultado hacia nuestro objetivo	2
1.2.	Imágenes <i>MEB</i> de la irradiación con un pulso por transformada (superior) y el mismo pulso sometido a <i>TOD</i> . El pulso con <i>TOD</i> genera una cráter de un diámetro por debajo de límite de difracción [1]	3
2.1.	Campo eléctrico de un pulso de 100 fs <i>FWHM</i>	13
2.2.	Efectos de una fase cuadrática (a) y cúbica (b) sobre el perfil temporal de un pulso y fase necesaria para obtener una conformación temporal arbitraria determinada (c). Las fases se muestran desenrolladas y enrolladas.	15
2.3.	Ejemplos de espacios de soluciones mono y multimodal. En el caso de la esfera sólo disponemos de un mínimo global. La función <i>Rastrigin</i> posee múltiples mínimos de diferente valor, es multimodal.	20
2.4.	Clasificación de algoritmos de optimización. En azul los principales algoritmos que podemos encontrar en la literatura aplicados a nuestro problema.	22
2.5.	Exploración del espacio de soluciones de una función unimodal mediante los métodos monopunto de <i>paseo aleatorio</i> y <i>Hooke-Jeeves</i>	23
3.1.	Esquema relacional básico de los elementos que conforman el sistema experimental. El sistema láser proporciona los pulsos que serán modificados por el sintetizador de pulsos. Podemos observarlos gracias al caracterizador de pulsos (<i>FROG</i>). Una vez interaccionan en el experimento el optimizador genera las acciones necesarias sobre el sintetizador en base a su observación.	28

3.2. Esquema general del sistema de generación y amplificación de pulsos laser de fs empleado.	29
3.3. Esquema del camino óptico del haz procedente del oscilador (<i>Seed Pulses</i>) en la etapa de amplificación. El pulso es expandido temporalmente (Pulse Stretcher) antes de ser amplificado en la barra de Ti:Zafiro (medio de ganancia), posteriormente es recomprimido (Pulse Compressor) hasta alcanzar los 100 fs <i>FWHM</i>	31
3.4. Esquema simplificado de un sintetizador temporal con configuración de dispersión nula utilizando redes de difracción y lentes. En el centro geométrico del sistema está el plano de Fourier, donde las frecuencias espectrales se encuentran espacialmente separadas. Este es el punto de inserción del modulador de fase.	33
3.5. Esquema y configuración real del sintetizador de pulsos implementado. Se utilizan lentes de 1 m de focal. El recorrido interior del haz es de 4 metros (4f). En el montaje experimental el brazo de salida se encuentra plegado por limitaciones de espacio.(Configuración correspondiente al sintetizador 2, cuadro 3.3.1)	35
3.6. Cada una de las componentes de frecuencia experimentan un camino óptico diferente en <i>SLM</i> que podemos modificar a voluntad. De esa forma modificamos la fase espectral en el pulso y su conformación temporal. 37	37
3.7. Distribución física de los píxeles en el <i>SLM</i> . Cada uno posee una ventana de $97\mu m$ con una área opaca de $3\mu m$. Un 3 % de la energía espectral se pierde en la transmisión	37
3.8. Las partículas nemáticas que conforman el cristal líquido se orientan con el campo eléctrico aplicado, <i>E</i> , entre los electrodos, modificando su eje óptico.	38
3.9. Para la calibración del <i>SLM</i> se miden los cambios de intensidad de una fuente de luz monocromática colimada a través del <i>SLM</i> frente a los cambios de voltaje en los píxeles. Antes y después del mismo se han colocado dos polarizadores cruzados a $\pm 45^\circ$ respecto al eje horizontal. De esta forma es utilizado como modulador de amplitud, midiendo la transmitancia en función del voltaje aplicado a los píxeles	39
3.10. Curva de cambio de fase inducido en función de la tensión aplicada a los pixeles correspondiente a 799 nm. El desfase mínimo aplicable no es de 0 radianes, la curva presenta una acusada no-linealidad al incrementar el desfase	39

3.11. Transmisión del SLM con (superior izquierda) y sin (superior derecha) una fase aplicada (inferior). Los saltos bruscos de fase entre pixeles adyacentes generan una modulación de intensidad que podemos apreciar en forma de sombras. En las imágenes de transmisión podemos distinguir la zona de pixeles, área rectangular central, y los electrodos en la parte inferior y superior.	41
3.12. Curvas de <i>fase-tensión</i> para longitudes de onda (λ) entre 790 nm y 810 nm. Cada λ es afectada de forma ligeramente diferente por el índice extraordinario. Detalles de las curvas fase-tensión del entorno de fase 0 y fase 2π , los errores debidos a la utilización de una sola curva de calibración se incrementan al aumentar el cambio de fase inducido	42
3.13. Representación esquemática de <i>PG-FROG</i> e implementación experimental. El pulso de entrada es dividido en el de muestreo, que viaja a través de un par polarizador-analizador hasta el espectrómetro, y el de puerta, dotado de un retardo ajustable, que genera el efecto puerta <i>Kerr</i> que permite medir el pulso de muestreo.	45
3.14. Trazas de FROG típicas. De izquierda a derecha de un pulso por transformada, pulso con trino negativo y pulso con trino positivo [2].	46
4.1. Puntos de interpolación entre dos nodos adyacentes. Al ser $D < nPixels$ hemos de estimar el valor de fase que deben adoptar los píxeles entre los D parámetros	53
4.2. Exploración de la posición de un nodo. La forma temporal resultante presenta una transición continua con la exploración de la fase (1,2,3). Cuando la diferencia de fase entre dos nodos consecutivos es $> 2\pi$ (4) se genera el enrollado de fases, provocando una discontinuidad de la transición de formas temporales.	54
4.3. Esquema general de funcionamiento de un algoritmos genético.	57
4.4. Operación de cruce a nivel de parámetro entre dos individuos A y B. Utilizando dos puntos de cruce y una mascara de cruce se selecciona de que parente va a heredar el hijo los parámetros	59
4.5. Vectores diferencia posibles sobre una población de 9 individuos. Estos conforman las perturbaciones posibles aplicables a cada individuo, ponderadas por el factor F	62
4.6. Efecto del ajuste marginal de las fases a 0 rad para conseguir un pulso por transformada y su efecto en la generación de segundo armónico [3]	67
4.7. Secuencia de pasos en la optimización de un nodo. Representación en el plano de polar (izquierda) y cartesiana (derecha). En la representación cartesiana se muestra una posible curva de valores de costo, señalando en gris la zona de incertidumbre debida al ruido.	72

4.8. Relación espacial entre la amplitud espectral y los nodos de control de la fase. Se muestra una fase cuadrática enrollada.	75
4.9. Curvas de convergencia típicas según el tipo de Barrido utilizado (a) y representación del recorrido de los nodos (b). El comportamiento depende de la energía asociada a cada nodo. En secuencial (negro) conforma una sigmoide, random (azul) se linealiza y por energía se maximiza la pendiente inicial (rojo).	76
4.10. Simulación de la optimización de <i>SHG</i> . La fase generada por <i>MODS</i> se añade a un espectro gausiano que posee cierta fase residual, el objetivo de la optimización es obtener la fase que maximice el valor del observable $\propto \int e(t) ^4 dt$	80
4.11. Fase obtenida (rojo) para compensar una fase residual cuadrática (gris) sobre un espectro gausiano (negro) y fase resultante (azul) utilizando 100 nodos de control. En los extremos espectrales, primeros y últimos píxeles, se producen errores debido a la poca energía disponible y al incremento de velocidad de la fase residual: se necesita una mayor densidad de nodos para ajustarla correctamente.	81
4.12. Compresión de un pulso expandido mediante la aplicación de una fase cuadrática. Evolución temporal las soluciones ensayadas por <i>MODS</i> durante la compresión (a) y evolución de la función de mérito durante dos Barridos de ajuste (b). La escala de color indica la intensidad del campo	82
4.13. Evolución temporal de la solución ensayada por <i>MODS</i> en recorrido secuencial con fase inicial plana. Partiendo de un pulso ensanchado por una fase cuadrática, el algoritmo reubica temporalmente la energía espectral disponible. En la zona central del barrido es mas evidente la reubicación temporal de la energía. Se muestra una ventana temporal de 3ps.	83
4.14. Evolución temporal de la solución ensayada por <i>MODS</i> en un recorrido secuencial con fase inicial aleatoria.	84
5.1. Dispositivo experimental utilizado para determinar las fluctuaciones asociadas a las oscilaciones naturales del láser en energía y duración de pulso. Utilizamos un fotodiodo lineal de <i>Si</i> y un fotodiodo de absorción de dos fotones de <i>GaAsP</i>	87
5.2. Registro de señal del fotodiodo de absorción a dos fotones y de fotodiodo lineal durante una hora, una muestra por segundo. Se aprecian variaciones en la señal <i>TPA</i> no existentes en la señal lineal, debidas a fluctuaciones temporales del pulso	88

5.3. Histograma de las señales lineal (a) y de TPA (b). El histograma de TPA muestra cierta tendencia hacia valores inferiores, indicando la expansión temporal de los pulsos por fluctuaciones de índice del aire en el interior del amplificador	89
5.4. Registro pulso a pulso, mediante la utilización de un boxcar, de la señal del fotodiodo <i>TPA</i> ante cambios repetitivos de fase. Se aprecia el transitorio de alineación del cristal líquido en el <i>SLM</i> y el ruido existente en la señal.	90
5.5. Trazas de <i>FROG</i> que muestran la modulación de amplitud consecuencia de la aplicación de fases planas de diferentes valores. Es especialmente notable para una fase de 5 radianes.	92
5.6. Efecto de la modulación de amplitud en el espectro del pulso. Se utilizan una fase compuesta por 50 nodos posicionados a 0 rad excepto el nodo 25 que se sitúa a 5 rad. Se aprecian cambios en la energía espectral asociada al cambio de fase.	93
5.7. Efecto de una fase aleatoria con y sin enrollado de fases. Los saltos bruscos de fase generan pérdidas de energía espectral y distorsión temporal del pulso.	94
5.8. Feedback de <i>MODS</i> durante un barrido y optimización de mérito. La modulación de amplitud hace que cualquier cambio introducido en la fase empeore la señal. Se puede apreciar el contorno espectral.	95
5.9. Esquema del bucle de optimización utilizado para testar los algoritmos. La fase generada por el algoritmo es añadida a un espectro sintético. Se aplica entonces un observador, en este caso el <i>ECM</i> de la forma temporal generada y la objetivo, que nos devuelve la señal de evaluación.	99
5.10. Pulso objetivo y resultado de aproximación conseguida mediante el algoritmo de Gerchberg-Saxton	100
5.11. Curvas de convergencia de <i>DE</i> en la optimización frente a los parámetros <i>F</i> y <i>C</i> , para 50 y 200 nodos. Mapas interpolados de bondad de la solución obtenida en función de los parámetros evaluados. La linea naranja indica el resultado alcanzado por <i>GS</i>	101
5.12. Comportamiento de <i>MODS</i> utilizando 50 y 200 nodos, partiendo de fase plana=0 rad. y aleatoria $[0, 2\pi)$, utilizando recorridos secuencial, aleatorio y por energía de los nodos. El recorrido por energía resulta más efectivo en todos los casos, 50 nodos son insuficientes para la conformación de fases. Se incluyen lineas visuales para la comparación de los resultados y tiempos de convergencia entre 50 y 200 nodos. . .	102

5.13. Comparación entre todos los resultados obtenidos. las evaluaciones requeridas por <i>MODS</i> para igual número de parámetros se han marcado con un rectángulo gris sobre <i>DE</i> , así como una guía visual del mejor resultado alcanzado. El resultado de <i>GS</i> coincide con el alcanzado por <i>MODS</i> utilizando 200 nodos y barrido por energía	103
5.14. Mejores aproximaciones al objetivo temporal. <i>GS</i> y <i>MODS</i> obtienen un resultado similar, <i>DE</i> se aproxima a la solución, pero aún está lejos de poder considerarse una buena solución.	104
5.15. Soluciones obtenidas por <i>MODS/320/p/s/3-3-3</i> comparadas con el resultado de <i>GS</i> al generar dos formas de onda compuestas por 7 y tres pulsos. Los resultados son esencialmente iguales.	105
5.16. Mecanismo de la absorción a dos fotones. Cada fotón individual no posee la energía suficiente para forzar la transición entre la banda de valencia y la de conducción del semiconductor. La energía resultante de la absorción simultánea de dos fotones permite la promoción del electrón a su estado excitado. Estos dos fotones provienen de la bandapectral del pulso de excitación.	108
5.17. Respuesta espectral de absorción del fotodiodo G1115, donde se observa que no posee absorción en 799 nm. Curva de calibración de respuesta no-lineal del fotodiodo de <i>TPA</i> G1115 respecto a la del fotodiodo lineal. El ajuste de la respuesta ajuste (rojo) $S = 0,4I^{2,2}$, esencialmente cuadrático.	109
5.18. Sistema experimental para la compresión de pulsos expandidos en el amplificador	110
5.19. Trazas de <i>FROG</i> de los pulsos iniciales, con trino de diferente signo, pulso optimizado y curvas de convergencia. Se muestra traza integrada (autocorrelación de tercer orden) de <i>FROG</i> (azul) y la correspondiente a un pulso comprimido del amplificador (rojo discontinua).	111
5.20. Fases recuperada a partir de las trazas de <i>FROG</i> de los pulsos expandidos y comprimidos y fases de compensación obtenidas. La linea verde horizontal indica la posición del <i>SLM</i> frente a las fases recuperadas. .	113
5.21. Sistema experimental utilizado para la compresión de pulsos distorsionados mediante plasma en aire. La ruptura dieléctrica se genera utilizando un telescopio 2:1 previo al sintetizador de pulsos. El control de la energía del pulso se realiza mediante un iris de apertura variable.	113

5.22. Trazas de FROG de los pulsos iniciales bajo diferentes condiciones de generación de plasma (plasma1, plasma 2), pulso optimizado y curvas de convergencia. Se muestra la energía temporal integrada de las trazas de FROG (traza azul) y la correspondiente a un pulso comprimido del amplificador (traza roja discontinua). Curvas de convergencia asociadas a ambas optimizaciones	114
5.23. Fases recuperada a partir de las trazas de FROG de los pulsos expandidos y comprimidos y fases de compensación obtenidas.	115
5.24. Sistema de experimental utilizado en la optimización de <i>SHG</i> sobre nanocristales. Fuente láser (1), sintetizador de pulsos (2), microscopio confocal (3)	117
5.25. Espectro de salida del sistema láser utilizado (negro), junto con su fase residual (rojo discontinuo) y la fase que presenta una vez se ha optimizado mediante <i>MIIPS</i> [4]	118
5.26. Nanocristales de <i>BaTiO₃</i> similares a los utilizados en la optimización de <i>SHG</i> . Imágenes de microscopio electrónico de barrido.	119
5.27. Curva de optimización e imagen confocal (a), del <i>NC</i> sujeto de la optimización de <i>SH NC</i> (circulo blanco). Espectro original y espectro después de la optimización (b).	120
5.28. Fase de compensación (rojo) y fase del pulso (azul) una vez aplicada la fase de compensación. Se ha incluido una guía visual sobre la fase residual resultante, que es básicamente una fase plana con cierta pendiente, indicativa de un desplazamiento temporal del pulso.	121
5.29. Curva de optimización e imagen confocal (a) del <i>NC</i> sujeto de la optimización de <i>SH</i> . Espectro original y espectro después de la optimización (b).	121
5.30. Esquema del ángulo θ entre el eje de polarización del campo \vec{E} y la molécula diatómica.	124
5.31. Señal de alineamiento para las moléculas diatómicas de <i>N₂</i> (a), <i>O₂</i> (b) y <i>CO</i> (c). El alineamiento ha sido inducido mediante un pulso de 110 fs a 799 nm con una intensidad de $6 \times 10^{13} W/cm^2$ [5]	125
5.32. Montaje experimental para la generación y medición del alineamiento molecular. La polarización del pulso de muestreo es perturbada por el alineamiento que genera el pulso de excitación. Las polarizaciones de los pulsos de muestreo y excitación están posicionadas a 45°. Estos cambios de polarización son detectados en el espectrómetro.	126
5.33. Mapa del alineamiento molecular y traza de energía espectral integrada. Se han marcado los diferentes tiempos de recurrencia que se observan para las moléculas de <i>N₂</i> y <i>O₂</i>	127

5.34. Mapa de alineamiento de referencia y su señal integrada correspondiente a un pulso de 250 fs con trino positivo, utilizado como referencia para la optimización mediante 50 nodos. Se ha marcado los tiempos objetivo de optimización correspondientes al efecto Kerr (a) y al primer $\frac{T_{rec}}{2}$ del N_2 (b)	128
5.35. Optimización de efecto Kerr inicial a -700 fs de $t = 0$ utilizando 50 nodos. Mapa de alineación (a), señal integrada (b), fase obtenida (c) y curva de optimización (d)	129
5.36. Optimización sobre $\frac{T_{rec}}{2}$ del N_2 mediante la utilización de 50 nodos. Mapa de alineación (a), señal integrada (b), fase obtenida (c) y curva de optimización (d)	130
5.37. Mapa de alineamiento correspondiente a un pulso de 250 fs con trino positivo, referencia para la optimización mediante 25 nodos. Se ha marcado los tiempos objetivo de optimización correspondientes al efecto Kerr (a) y primer $\frac{T_{rec}}{2}$ del N_2 (b)	131
5.38. Optimización de efecto Kerr inicial a -700 fs de $t = 0$ utilizando 50 nodos. Mapa de alineación (a), señal integrada (b), fase obtenida (c) y curva de optimización (d)	131
5.39. Optimización sobre $\frac{T_{rec}}{2}$ del N_2 mediante la utilización de 50 nodos. Mapa de alineación (a), señal integrada (b), fase obtenida (c) y curva de optimización (d)	132
5.40. Trazas de <i>FROG</i> de los pulsos original y optimizado correspondientes a la optimización de N_2 en $\frac{T_{rec}}{2}$ sobre 25 nodos y pulsos temporales resultantes.	132
5.41. Volumen focal del área de interacción, posee una extensión de $\approx 60 \mu m FWHM$ a lo largo del eje de propagación y $\approx 3 \mu m FWHM$ en la cintura de haz	133
5.42. Representación esquemática de los pulsos de excitación y muestreo en un sistema de <i>FROG</i> con los brazos desbalanceados. El pulso de muestreo y excitación se hayan separados 1 ps, de forma que su interacción sobre el medio no-lineal (<i>sf57</i>) es mínima	136
5.43. Curvas promedio de los algoritmos probados. En promedio, <i>MODSa</i> alcanza el mismo nivel de optimización que el <i>AG</i> pero utilizando un número de evaluaciones 8 veces menor.	137
5.44. Todas las curvas de convergencia de todos los algoritmos	138
5.45. Todas las evaluaciones de un lanzamiento de <i>MODSp</i> frente a un lanzamiento del <i>AG</i> al que se le ha permitido realizar 5000 evaluaciones (1 evaluación por segundo). Se aprecia cómo la evolución de <i>AG</i> sigue a las fluctuaciones de energía a medio plazo del láser.	140

5.46. Comparativa visual de todas las fases obtenidas en cada lanzamiento por los algoritmos. <i>MODSp</i> obtiene el mismo tipo de fases en cada lanzamiento. La fase aleatoria inicial de <i>MODSa</i> hace que exista una mayor variedad en las soluciones. <i>AG</i> presenta un resultado diferente en cada lanzamiento	140
5.47. Trazas de <i>FROG</i> de la mejor y peor solución obtenida por <i>AG</i> y <i>MODS</i> . Las soluciones obtenidas por <i>MODSa</i> son de calidad comparable en todos los casos, mientras que el <i>AG</i> presenta una considerable dispersión de energía.	141
5.48. Curvas promedio de convergencia, junto con todas las curvas de convergencia obtenidas por <i>MODS</i> y <i>AG</i>	142
5.49. Curva promedio de convergencia de <i>MODS</i> junto con todas las evaluaciones realizadas. La evolución de la curva está relacionada con la energía espectral asociada a cada nodo.	143
5.50. Trazas de <i>FROG</i> de la mejor y peor solución obtenida por el <i>AG</i> y <i>MODS</i>	144
5.51. Fase teórica para un doble pulso obtenida por <i>GS</i> (azul) y fase obtenida experimentalmente por <i>MODS</i> (rosa)	145
5.52. Aproximación temporal a un doble pulso con 1ps de separación obtenida por <i>GS</i> y solución experimental de <i>MODS</i>	146
5.53. Convergencias <i>DE</i> y <i>MODS</i> . Podemos observar la diversidad en el comportamiento de <i>DE</i> en cada lanzamiento, sorprende la diferencia entre las dispersiones de población , cómo la observada entre el 4 y décimo lanzamiento. <i>MODS</i> , pese a partir de fase plana, presenta diferentes puntos de partida, debido al ruido existente en el sistema.	147
5.54. Trazas de <i>FROG</i> de las mejores soluciones alcanzadas por <i>DE</i> y <i>MODS</i> , así como sus intensidades temporales integradas	148
5.55. Fases obtenidas experimentalmente por <i>DE</i> y <i>MODS</i> . <i>DE</i> obtiene una fase esencialmente sinusoidal.	149
5.56. Resultados temporal y de fase obtenidos por <i>MODS</i> en simulaciones en el problema analizado, con y sin presencia de ruido en forma de modulación de amplitud espectral aleatoria de un 10 %. Ante la presencia de ruido la capacidad de toma de decisiones en la optimización marginal se anula y el algoritmo se detiene en una solución intermedia.	150
5.57. Representación de la secuencia de exploración de los valores de los nodos ϕ_a, ϕ_b y ϕ_c que se ha seguido para muestrear el espacio de soluciones. Reducción a 4 valores por nodo. Los valores de ϕ_a no se muestran discretos por claridad de la imagen.	153

5.58. Registro de medición de los tres nodos a estudio con un muestreo de 40 puntos por nodo, 64000 muestras. Se puede observar cómo en toda la medida existe una sucesión de máximos y mínimo.	154
5.59. Mapas de soluciones correspondientes a la función de mérito en función de dos de los nodos. La evolución de las imágenes corresponde a la evolución del tercer nodo.	155
5.60. Visualización del espacio de soluciones realizado a partir de las muestras obtenidas del espacio definido por tres nodos Φ_a, Φ_b y Φ_c . Se muestran el mismo espacio desde tres puntos de vista diferente	156

Capítulo 1

Introducción

1.1. Introducción

Nuestro problema se encuentra resumido en la Figura 1.1. Se dispone de un pulso láser ultracorto de 100 fs que recorre el sistema experimental con una velocidad de unos 300000 km/s, así que se extiende alrededor de $30 \mu\text{m}$ en el espacio. Es un paquete de ondas electromagnéticas viajando por el espacio con una longitud de onda central de 799 nm y un ancho de banda de 9.5 nm *FWHM*¹. Este espectro conforma un pulso láser con una distribución temporal gausiana de 100 fs *FWHM* y es posible modificar su estructura temporal. Esto se consigue mediante a un *sintetizador de pulsos* que nos permite trabajar con el pulso en el dominio de la frecuencia, donde es posible manipular su fase espectral y, posteriormente, devolverlo al dominio temporal. El pulso, una vez modificado, interactúa con la materia en nuestro experimento causando un determinado efecto óptico no-lineal. Utilizando un bucle adaptativo, un algoritmo de optimización observa el efecto de esta interacción y maneja la fase espectral. El algoritmo manipula el flujo de energía que llega a la muestra para conseguir que el efecto producido se acerque al objetivo establecido.

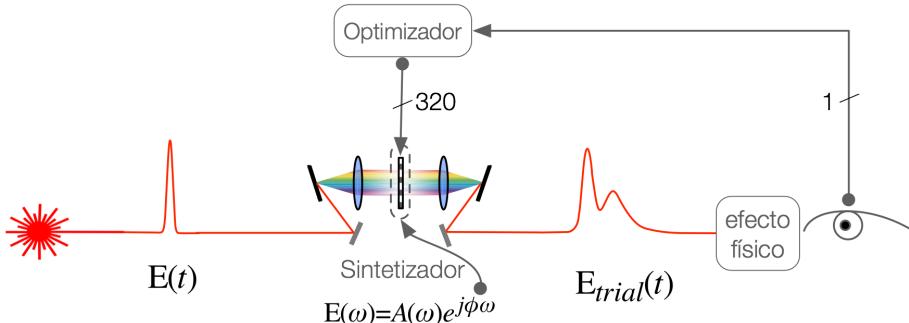


Figura 1.1: Visión global del problema. Los pulsos láser son estructurados temporalmente mediante la manipulación de su fase espectral. El resultado de la interacción del nuevo pulso conformado, $e_{trial}(t)$, con nuestro experimento es observado (medido) y esta información es utilizada por los algoritmos de optimización para guiar el resultado hacia nuestro objetivo

¿Qué se puede conseguir manipulando temporalmente un pulso láser ultracorto? En la Figura 1.2 tenemos un ejemplo de un efecto inesperado. En la figura se muestra una imagen de microscopía electrónica de barrido (*MEB*) donde se observa resultado de dos irradiaciones sobre sílice vítreo (SiO_2). En la zona superior se ve el efecto producido por un pulso transformada de 33 fs centrado en 798 nm. En la parte inferior al pulso se le ha aplicado una dispersión de frecuencias de tercer orden

¹Full Width Half Maximum, anchura a mitad de máximo. En adelante los acrónimos y derivados de expresiones en lengua inglesa se denotan en cursiva

(TOD^2) generando la conformación temporal que se muestra, un tren de pulsos con envolvente decreciente. El resultado de ambas irradiaciones, para la misma energía de pulso, es muy diferente, obteniéndose un agujero con un diámetro de unos nanómetros... ¡conformando el pulso se ha generado un cráter con un diámetro por debajo del límite de difracción!

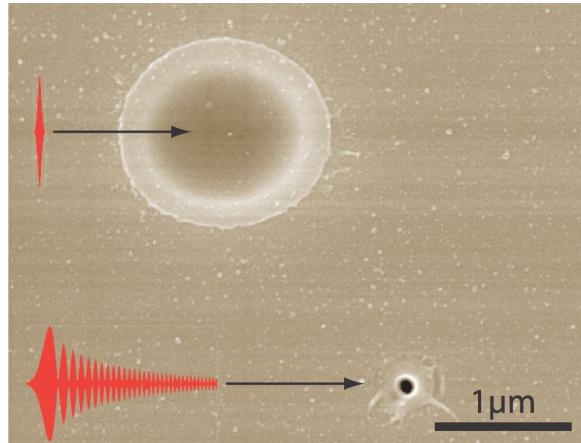


Figura 1.2: Imágenes *MEB* de la irradiación con un pulso por transformada (superior) y el mismo pulso sometido a *TOD*. El pulso con *TOD* genera una cráter de un diámetro por debajo de límite de difracción [1]

La explicación de por qué se produce este fenómeno es muy interesante y está relacionada con que se están modificando los papeles relativos de la ionización multifotónica y de avalancha en el proceso de ablación [1], ambos fenómenos de interacción no-lineal.

Los pulsos láser ultracortos tienen ciertas propiedades que los hacen únicos:

- La energía del pulso se concentra en un lapso de tiempo en el orden de $10^{-15} s$
- La potencia de pico que alcanzan es extremadamente elevada. Por ejemplo, un pulso de 100 fs con una energía de $1mJ$ posee una potencia de pico de $10 GW$.
- Geométricamente se extiende por el espacio tan solo unas micras. Un pulso de 100 fs tendrá una extensión espacial de $\approx 30\mu m$

Los pulsos láser ultracortos son la expresión temporal de un paquete de ondas electromagnético que posee un gran ancho de banda en frecuencia. Poseen una determinada envolvente temporal (gausiana, secante hiperbólica,...). Utilizando técnicas de

²Third Order Dispersion

conformación temporal [6] es posible modificar su estructura temporal. Partiendo de un pulso gausiano podremos sintetizar cualquier forma de pulso. Podemos desplazarlo temporalmente, expandirlo³, generar trenes de pulsos o, en general, generar pulsos con cualquier envolvente arbitraria⁴.

El resultado la interacción con un medio material dependerá de las características del material y del pulso de radiación, su polarización, energía, perfil espacial y perfil temporal. Las intensidades del campo eléctrico y magnético de un pulso ultracorto son comparables a las que experimenta un electrón en las capas profundas de un átomo, en estas condiciones podemos acceder a fenómenos de interacción no-lineales. Estos fenómenos son sensibles a la intensidad de pico del pulso, por lo tanto, mediante la conformación temporal podremos controlar el resultado de la interacción.

La utilización de pulsos ultracortos conformados se ha aplicado con éxito en numerosos procesos y campos. Por citar unos pocos ejemplos podemos encontrar aplicaciones en óptica no-lineal [7], física de estado sólido [8], biología [9], fotoquímica [10] [11], computación cuántica [12] o procesado de materiales [13], donde se ha demostrado la posibilidad de utilizar pulsos conformados para la generación de estructuras mas allá del límite de difracción [1] [14].

Para la síntesis de pulsos ultracortos la técnica mas utilizada es la del filtrado en el espacio de frecuencias [15]. El pulso se traslada desde el dominio del tiempo al espacio de frecuencias mediante una transformada óptica de Fourier. Un modulador espacial de luz (*SLM*⁵) actúa como elemento de manipulación de las componentes espectrales de fase, amplitud y/o polarización [6][16]. Utilizando una transformada inversa se devuelve al dominio temporal, donde obedecerá a las modificaciones realizadas sobre el espectro. En esta tesis se utilizará la síntesis de pulsos mediante la modificación de la fase espectral. El *SLM* modifica la fase relativa de las diferentes componentes espectrales que posee el pulso mediante, en este caso, 320 elementos de control de fase independientes, 320 variables a manejar por los algoritmos de optimización para realizar la síntesis temporal.

A la hora de sintetizar los pulsos láser disponemos de tres esquemas posibles para la determinación de la forma temporal.

- *Pre-diseño de pulsos* En los casos en los que la dinámica de interacción sea suficientemente conocida, podremos realizar un diseño los pulsos para poder lograr el resultado deseado. Una vez determinada la forma temporal se puede obtener la fase necesaria mediante algún algoritmo iterativo [17].

³No podremos comprimirlo, la duración mínima está limitada por su ancho de banda espectral

⁴Naturalmente, limitadas por el ancho de banda y la capacidad de control del dispositivo de síntesis utilizado

⁵Spatial Light Modulator

- *Exploración sistemática* El estudio sistemático del efecto producido por los pulsos láser, cuya estructura temporal se varía siguiendo un determinado criterio [1] [18] [19]. Al igual que en el caso anterior, partiendo de una forma temporal determinada, se obtienen los parámetros para la conformación de pulso.
- *Utilización de un bucle adaptativo* En los casos en los que no disponemos de información acerca del proceso involucrado, el control temporal de los pulsos se realiza mediante un bucle adaptativo (fig.1.1). En el mismo un algoritmo de optimización toma el control del sintetizador y se encarga de guiar el efecto inducido hacia el objetivo deseado.

El esquema en bucle adaptativo es el utilizado en esta tesis y define el objeto de la misma ¿Cómo manipular esas 320 variables para optimizar el efecto que observamos?

En la optimización de fase los algoritmos se enfrentan un espacio de control formado por un hipercubo de 320 dimensiones, con una longitud de arista de 2π radianes, que en el sistema experimental utilizado actúa sobre la fase espectral de un pulso con anchura de 9.5 nm *FWHM* centrados en 799 nm. Cada uno de los puntos de este espacio, posibles combinaciones de las variables de conformación de fase, generará una estructura temporal del pulso diferente. Se ha de elegir la adecuada para optimizar el efecto de interacción no-lineal deseado. Si se probaran una a una todas las soluciones posibles⁶, utilizando 1ns para cada ensayo, la edad del universo no sería tiempo suficiente para poder ensayarlas todas. Adicionalmente, en la interacción con el material la cantidad de procesos implicados hacen que en la mayoría de los casos la modelización teórica sea inviable. El papel de los algoritmos de optimización es encontrar la fase que optimiza la interacción.

La primera referencia a la utilización de este esquema para obtener el pulso adecuado la encontramos en el campo de la femtoquímica *Teaching Lasers to Control Molecules, 1992* [10]. Podemos encontrar ejemplos de bucles adaptativos⁷ para la generación de segundo armónico [20](AG) [21](SA) [3](EE) [22] (EE) [23](SG), compensación de dispersión en fibras ópticas [24](AG), absorción de dos fotones [25](AG) [26](DE), alineamiento molecular [27](EE) [28](AG) [29](AG,EE) o construcción de puertas lógicas cuánticas⁸ [30](AG) por citar algunos ejemplos.

En relación a la modalidad de algoritmo utilizado, la mayoría de aplicaciones hacen uso de algoritmos evolutivos, en alguna de sus variantes, como elemento de control en el bucle adaptativo. Podemos destacar dos motivos para este hecho. En primer lugar, el elevado número de variables a manejar (las máscaras de control utilizadas en

⁶Cada una de las 320 variables puede adoptar 2^{12} valores diferentes

⁷Se señala junto a la referencia el tipo de algoritmo utilizado, se verán en el capítulo 2.4. Algoritmo genético (AG), simulated annealing(SA), Estrategia Evolutiva (EE), Differential Evolution (DE),seguidos de gradiente(SG)

⁸Quantum Gates

los sintetizadores de pulso suelen estar compuestas por cientos de elementos). A su vez los efectos a optimizar son derivados de interacción no-lineal y que presentan una gran complejidad en los mecanismos de excitación/relajación implicados. Además en su recorrido a lo largo del sistema experimental el propio pulso sufre de modificaciones temporales. Estas circunstancias hacen que los algoritmos evolutivos sean la opción natural. Los algoritmos evolutivos no hacen asunciones acerca del problema que han de resolver, y tienen la capacidad de manejar un gran número de variables sobre funciones no-lineales. Estos algoritmos también presentan una alta robustez ante la presencia de ruido experimental.

Si bien su aplicación sobre problemas de conformación temporal de pulsos está fuera de toda duda, su funcionamiento hace que sean inherentemente *lentos*. Su velocidad vendrá determinada por el número de observaciones que han de realizar sobre el efecto a optimizar (evaluaciones), típicamente en el entorno de los miles o decenas de miles. Este elevado número de evaluaciones hace que su aplicación en determinado tipo de experimentos sea inviable, especialmente en aquellos donde alguno de los recursos disponibles sea limitado. Por ejemplo, en biomuestras las muestras pueden tener un tiempo de vida relativamente corto. En irradiaciones sobre material, incluso inorgánico, tendríamos limitaciones en la superficie disponible y el tiempo de procesado necesario,... Múltiples escenarios nos exigen minimizar la ventana de recursos utilizados a lo largo de la optimización, así que la velocidad de convergencia es uno de los parámetros que pueden hacer inviable la aplicación de este esquema de búsqueda.

Se decidió pues inicialmente abordar el problema aplicando una estrategia evolutiva que se ha destacado frente a otros algoritmos evolutivos [31] y poco explorada en este campo, Differential Evolution [32]. A lo largo del desarrollo de la tesis encontramos con algo que no esperábamos. Según diferentes trabajos de Teoría de Control Cuántico (*QCT*⁹), el problema podía presentar un espacio de soluciones cuántico (*QCL*)¹⁰ con unas características topológicas muy particulares. Ello nos ha permitido desarrollar una aproximación alternativa a la utilización de algoritmos evolutivos. Explorando ese camino hemos desarrollado, implementado y probado un nuevo algoritmo determinista de optimización marginal, al que denominamos *Multiple One-Dimensional Search*¹¹ (*MODS*), que presenta una elevada velocidad de convergencia y soluciones de alta calidad. Creemos que ofrece una alternativa real y útil en este tipo de problemas, especialmente en aquellas aplicaciones en las que el consumo de recursos sea uno de los factores limitantes.

⁹Quantum Control Theory

¹⁰Quantum control Landscape

¹¹Búsqueda múltiple unidimensional

1.2. Objetivos y metodología

Hemos visto cómo mediante utilización de un bucle de control adaptativo es posible obtener los pulsos adecuados para mejorar algún determinado efecto de interacción no-lineal. El objetivo final de esta tesis es utilizar esta aproximación para la conformación de pulsos ultracortos en problemas en los que el consumo de recursos sea un factor limitante. Un ejemplo característico sería su uso en la generación de transformaciones estructurales en direcciones predefinidas. En este tipo de modificaciones, inducidas por ejemplo por ionización multifotónica, los recursos disponibles son limitados. La disponibilidad de las muestras y el tamaño de las mismas hace inviable la utilización de métodos con elevado tiempo de convergencia. Ante este escenario la utilización de algoritmos eficientes es fundamental.

Este objetivo global queda desglosado en los siguientes puntos:

- Implementar una configuración experimental para poder llevar a cabo la conformación temporal de los pulsos
- Definir los criterios de optimización y restricciones existentes a la hora de alcanzar los objetivos de optimización
- Seleccionar o desarrollar un algoritmo de optimización eficiente que permita realizar la optimización en un intervalo temporal compatible con la ventana de recursos disponible.
- Ejecución de experimentos de test no destructivos en los que la disponibilidad de recursos no sea una limitación, para poder estudiar el efecto del ruido experimental, eficiencia de exploración, propiedades de convergencia...

En la tesis no hemos abordado la optimización en procesos que impliquen optimizaciones estructurales o experimentos destructivos. Nuestro objetivo, dada la extensión temporal limitada del trabajo, ha sido confirmar la viabilidad de varias aproximaciones, centrándolo principalmente en el algoritmo desarrollado (*MODS*). Se han realizado también experimentos de optimización con un algoritmo evolutivo cuyo uso no se encuentra extendido en el campo (*DE*) y con un *AG*, este último utilizado como referencia.

Metodología

Se ha desarrollado un sistema de conformación de pulsos ultracortos con capacidad de trabajar con pulsos de 100 fs y 1 mJ de energía.

En el proceso de identificación del algoritmo adecuado para su inserción en el bucle adaptativo, se han encontrado características del espacio de control y topológicas del espacio de soluciones que han posibilitado el desarrollado un algoritmo propio de optimización. El desarrollo de este algoritmo y su prueba en condiciones reales han determinado en buena medida el desarrollo de la tesis.

De forma adicional se ha comprobado la viabilidad del uso de Differential Evolution (*DE*), un algoritmo evolutivo especialmente eficiente en la optimización de problemas no-lineales con elevado número de variables de control y especialmente robusto frente al ruido experimental. Este algoritmo no se había analizado anteriormente en este tipo de problemas. El desempeño de ambos algoritmos, *MODS* y *DE*, han sido testados frente al estándar habitual en este tipo de problemas, un algoritmo genético (*AG*). Los resultados permiten concluir que tanto *DE* como *MODS* superan el rendimiento de los *AGs* en este tipo de problemas, siendo *MODS* mas eficiente en cuanto al número de evaluaciones requerida para la convergencia y *DE* más robusto frente al ruido experimental.

Con el fin de explorar la viabilidad de algoritmo desarrollado se han realizado experimentos de optimización de interacción no-lineal en sólidos, donde se han realizado ensayos que involucran la generación de efecto Kerr y absorción multifotónica. En nano-escala se ha realizado optimización de generación de segundo armónico sobre nanocristal de *BaTiO₃*. También se ha analizado la optimización de alineamiento molecular de *N₂* en fase gaseosa.

Tanto los algoritmos de optimización como el software de control del sintetizador de pulsos ha sido desarrollado en *Labview 8.2 (National Instruments)*.

1.3. Estructura

El contenido de la tesis está distribuido en 6 capítulos, incluido el presente de introducción (*capítulo 1*).

En el *capítulo 2* describiremos los aspectos mas relevantes asociados a los pulsos ultracortos, proporcionando la representación matemática que se utilizará posteriormente para mostrar los resultados. Se mostraran también las bases de la síntesis de formas de onda mediante manipulación espectral y los conceptos básicos de interacción laser-materia en régimen no-lineal. En el terreno de la optimización se descubren las generalidades del problema de optimización y se realizará un recorrido por los diferentes algoritmos que existen para poder abordar este tipo de problemas.

En el *capítulo 3* se describen los elementos que hacen posible la experimentación, se describen las características principales y funcionamiento del sistema de amplificación láser, del dispositivo de síntesis de pulsos y el sistema de caracterización de pulso.

En el *capítulo 4* se detalla la solución que se ha adoptado para trabajar con la fase, así cómo una descripción detallada de los algoritmos evolutivos utilizados experimentalmente, los Algoritmos Genéticos (*AG*) y Differential Evolution (*DE*). Se describe también el algoritmo de optimización desarrollado a lo largo de esta tesis denominado Multiple One Dimensional Search (*MODS*).

El *capítulo 5* corresponde a los resultados experimentales, en el que se describen

- Los principales problemas de ruido existentes en nuestro sistema experimental que dificultan el proceso de optimización.
- Desarrollo de *MODS* y *DE* en la generación de formas temporales con conformación arbitraria
- La Capacidad de *MODS* para realizar compresión de pulsos a partir del rendimiento de un proceso de absorción de dos fotones. Los pulsos son expandidos mediante dos procesos diferentes: trino introducido desde el amplificador láser y distorsión mediante ruptura dieléctrica en aire. Compararemos su resultado con el ofrecido por un *AG*. Se exponen también ejemplos de *MODS* aplicado a la optimización de generación de segundo armónico sobre nanocristales de $BaTiO_3$.
- La viabilidad de aplicación de *MODS* en procesos de alineación no adiabática de moléculas de N_2 a temperatura ambiente.
- La capacidad de *MODS* para optimizar el efecto Kerr a través de un laberinto geométrico. Compararemos su resultado con el ofrecido por el *AG* y *DE*.
- Finalmente, se visualizará la estructura topológica del espacio de soluciones en el que los algoritmos se desenvuelven.

El *capítulo 6*, que cierra esta tesis, incluyen las conclusiones del trabajo y el posible desarrollo futuro que se deriva del mismo.

Finalmente se ha añadido un *Anexo* en el que se desglosan las publicaciones más relevantes asociadas al desarrollo de esta tesis.

Capítulo 2

Fundamentos

2.1. Introducción

Esta tesis se encuentra a caballo entre dos campos muy diferentes, uno de ellos es la interacción laser-materia, el otro es el de la optimización. Nuestro sistema experimental permite modificar la estructura temporal de los pulsos láser ultracortos, por tanto, es posible estructurar la distribución temporal de su intensidad instantánea. Los fenómenos ópticos cuya respuesta es sensible a la intensidad de la radiación son, precisamente, los de naturaleza no-lineal, como la absorción multifotónica o la generación de radiación a frecuencia doble. Este tipo de fenómenos son los sujetos de optimización. Optimizar no consiste en otra cosa sino en encontrar la mejor solución para un problema determinado. Nuestro problema de optimización es cómo, a partir de un observable generado por la interacción no-lineal de un pulso ultracorto con un medio material, ha de estructurarse el pulso para guiar el efecto hacia un objetivo predeterminado.

En este capítulo de fundamentos se introducen los aspectos básicos necesarios para el desarrollo de la tesis en lo concerniente a los pulsos láser ultracortos, la óptica no-lineal y la optimización.

2.2. Pulso láser ultracorto y conformación temporal

2.2.1. Pulso láser ultracorto

La generación pulsos ultracortos necesita de un gran ancho de banda en frecuencias. para conseguir este ancho de banda se utiliza la técnica de generación de pulsos láser mediante anclaje de modos [33]. Básicamente los modos longitudinales permitidos en una cavidad resonante se anclan en fase de forma constructiva, cuantas más componentes de frecuencia dispongamos dentro del ancho de banda de ganancia, más corto podrá ser nuestro pulso. Por ejemplo, si disponemos como medio de ganancia un cristal de Ti:Zafiro en una cavidad típica de un metro de longitud, para un ancho de banda de ganancia de 650-1100 nm podemos generar pulsos de hasta 5 fs [34][35]. Los pulsos generados mediante anclaje de modos poseen energías típicas de unos pocos nano-Julios, pero pueden amplificarse mediante la técnica *CPA*¹².

Los pulsos ultracortos generados por nuestro sistema láser están situados en el rango de los femtosegundos¹³ (fs), con una envolvente gausiana temporal de $\approx 100 \text{ fs FWHM}$. Espectralmente el pulso presenta una longitud de onda central de 799 nm

¹²Chirped Pulse Amplification, se describe brevemente en el capítulo 3

¹³1 fs = 10^{-15} s

con un ancho de banda de 9.5 nm $FWHM$. En el dominio de la frecuencia, el pulso puede expresarse¹⁴ cómo

$$\tilde{E}(\omega) = |E(\omega)| e^{i\phi(\omega)} = A(\omega) e^{i\phi(\omega)} \quad (2.1)$$

Donde $A(\omega)$ es la envolvente de la amplitud espectral y $\phi(\omega)$ su fase. La relación entre el dominio temporal y el de la frecuencia la obtenemos mediante la transformada de Fourier, \mathcal{F} , de forma que

$$\tilde{E}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} E(t) e^{-i\omega t} dt = \mathcal{F}[E(t)] \quad (2.2)$$

y su relación inversa

$$E(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} E(\omega) e^{i\omega t} d\omega = \mathcal{F}^{-1}[E(\omega)] = |E(t)| e^{i\phi(t)} \quad (2.3)$$

Ambas descripciones del pulso (temporal y espectral) quedan definidas mediante su amplitud y su fase. En la Figura 2.1 podemos ver su representación temporal de un pulso de 100 fs $FWHM$, donde podemos observar su campo y la envolvente asociada.

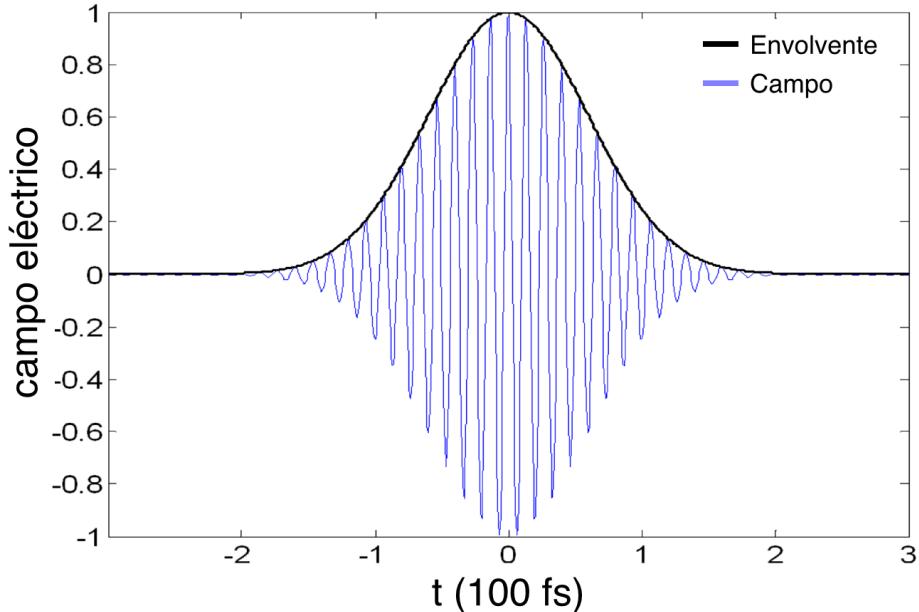


Figura 2.1: Campo eléctrico de un pulso de 100 fs $FWHM$

¹⁴Para una explicación detallada ver [36]

2.2.2. Conformación temporal

Mediante la manipulación de las componentes de amplitud y/o fase espectral podemos modificar la estructura temporal del pulso. Para conseguirlo utilizaremos un sintetizador de pulso, que tiene la capacidad de modificar estos parámetros del campo eléctrico para poder generar formas temporales bajo demanda.

Para describir su funcionamiento podemos tratar el sintetizador de pulsos como un sistema lineal. El pulso de salida estará determinado por la convolución del pulso de entrada con la función de transferencia ($h(t)$) del sintetizador.

$$E_{out}(t) = h(t) * E_{in}(t) \quad (2.4)$$

que puede expresarse en frecuencia cómo:

$$\tilde{E}_{out}(\omega) = \tilde{H}(\omega)\tilde{E}_{in}(\omega) = \left| H(\tilde{\omega}) \right| \left| E(\tilde{\omega}) \right| e^{i\phi_H(\omega)+i\phi_{in}(\omega)} \quad (2.5)$$

En nuestro dispositivo experimental utilizamos un sintetizador de pulsos que únicamente modifica la fase espectral, manteniendo constante la amplitud, $\left| H(\tilde{\omega}) \right| = 1$. La fase juega un papel fundamental en la conformación temporal [37], pero la restricción impuesta al renunciar al grado de control que ofrece la amplitud espectral hace que no se puedan alcanzar, por regla general, una conformación temporal exacta del pulso deseado.

El objetivo de los algoritmos de optimización en este problema es encontrar qué $\phi_H(\omega)$ hay que aplicar para que el resultado de la interacción del campo $|E(t)|$ con el medio sea la deseada. Experimentalmente se realiza una transformada de Fourier óptica que traslada el pulso al dominio de la frecuencia. Esto permite la utilización de un modulador espacial de luz (*SLM*) para manipular la fase espectral $\phi(\omega)$. Una transformada inversa de Fourier óptica devuelve el pulso al dominio temporal, conformando $|E(t)|$ según la fase aplicada.

Para hacernos una idea sencilla del efecto de la fase espectral sobre el perfil temporal del pulso podemos expresarla como una serie de Taylor de forma que

$$\phi(\omega) = \phi_0 + \phi_1\omega + \frac{\phi_2}{2!}\omega^2 + \frac{\phi_3}{3!}\omega^3 + \dots \quad (2.6)$$

La componente de orden cero, ϕ_0 , nos proporciona información de la posición de la portadora sobre la envolvente del pulso, pero no afecta a su conformación, como tampoco lo hace la componente de orden uno, $\phi_1(\omega)$, que genera un desplazamiento temporal del pulso. La componente cuadrática, $\frac{\phi_2}{2!}$, también conocida como dispersión de la velocidad de grupo (*GDD*¹⁵), genera un incremento en la duración del pulso al introducir un incremento lineal en la frecuencia instantánea de la portadora del

¹⁵Group Delay Dispersion

pulso(fig.2.2.a). Este término es conocido como *trino*¹⁶; hablaremos de trino positivo o negativo según se adelanten/retrasen las frecuencias altas/bajas. El termino de tercer orden (*TOD*), $\frac{\phi_3}{3!}\omega^3$, corresponde a una fase cúbica, genera un tren de pulsos asimétrico(fig.2.2.b).

Al generar una forma arbitraria de pulso (fig.2.2.c) la conformación de fase se vuelve mas compleja. Podemos ver cómo el pulso conformado (rojo) y el pulso objetivo de la conformación (verde) no poseen exactamente el mismo perfil debido a la falta de modulación de amplitud. La fase se ha obtenido mediante un algoritmo de Gerchberg-Saxton¹⁷ [17] que posibilita, dado un perfil temporal objetivo, obtener la fase que es necesario aplicar sobre una amplitud espectral determinada para obtenerlo.

Las fases mostradas en la Figura 2.2 se muestran enrolladas y desenrolladas. El enrollado de fases se puede realizar gracias a la periodicidad del soporte de fase, podemos acotar su expresión a el entorno entre 0 y 2π radianes. De esta forma el elemento de control de la fase (*SLM*) del sintetizador sólo necesitará trabajar dentro de dicho rango.

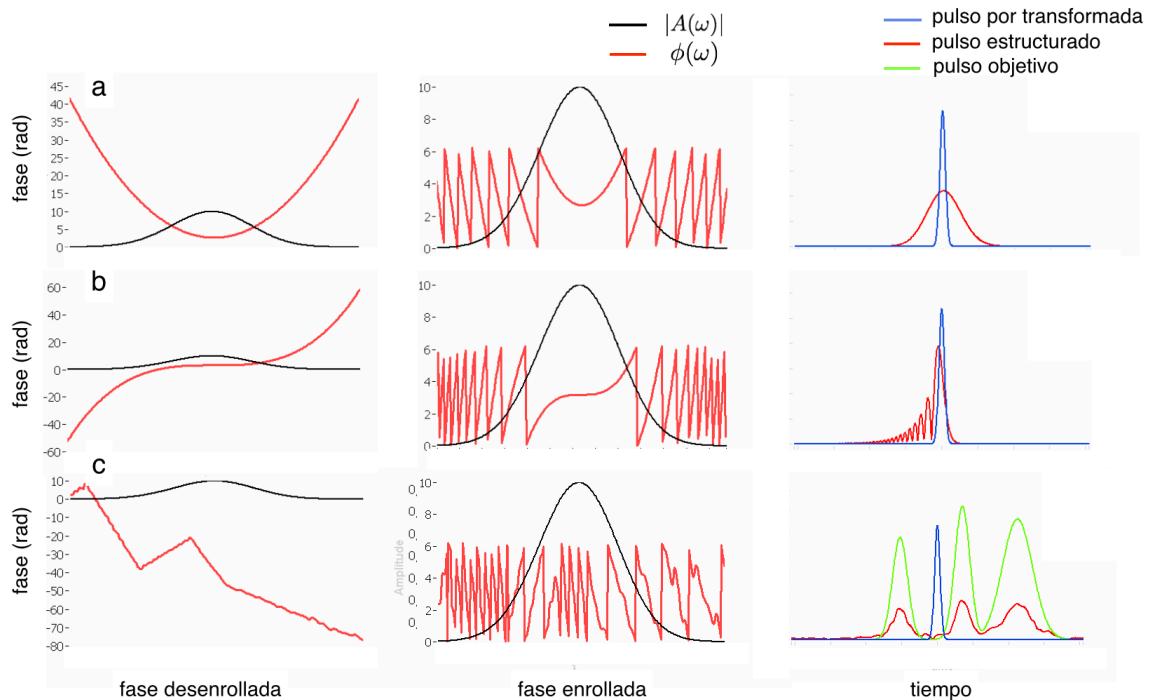


Figura 2.2: Efectos de una fase cuadrática (a) y cúbica (b) sobre el perfil temporal de un pulso y fase necesaria para obtener una conformación temporal arbitraria determinada (c). Las fases se muestran desenrolladas y enrolladas.

¹⁶chirp

¹⁷Se vera con detalle en el capítulo 5.2

2.3. Efectos ópticos no-lineales

Uno de los requerimientos para que el proceso de optimización del perfil temporal del pulso ultracorto sea posible es que la interacción laser-materia sea de tipo no-lineal, este tipo de interacción posee dependencias con la intensidad del pulso y por lo tanto con su estructura temporal. Una descripción exhaustiva de los fundamentos de la Óptica no-lineal queda fuera de nuestro objetivo, por lo que hemos optado por describir en esta sección, de forma muy resumida, los fundamentos de las interacciones que hemos analizado en mayor número. Estas son las de tercer orden no-lineal (asociadas al tensor de susceptibilidad óptica no-lineal, $\chi^{(3)}$), todos los materiales poseen una susceptibilidad de tercer orden $\chi^{(3)} \neq 0$. Debido a esta susceptibilidad, para campos suficientemente intensos, el índice de refracción del medio deja de ser constante y depende de la intensidad de la luz que se propaga en su seno (efecto Kerr óptico). En el caso de un haz intenso polarizado linealmente, una consecuencia de lo anterior es que la radiación induce una asimetría en el índice de refracción del medio dando lugar a un efecto de birrefringencia.

De forma general, la respuesta del material ante la radiación electromagnética puede expresarse en términos de la polarización. En régimen lineal podemos relacionar la polarización inducida en el medio (\tilde{P}) con el campo aplicado (\tilde{E}) mediante el tensor de susceptibilidad óptica de primer orden ($\chi^{(1)}$). La polarización eléctrica que se induce en el material es

$$\tilde{P} = \varepsilon_0 \chi^{(1)} \tilde{E} \quad (2.7)$$

El efecto combinado de la polarización inducida y el campo aplicado suele describirse en términos del vector desplazamiento \tilde{D}

$$\tilde{D} = \varepsilon_0 \tilde{E} + \tilde{P} = \varepsilon_0 (1 + \chi^{(1)}) \tilde{E} = \varepsilon \tilde{E} \quad (2.8)$$

que es proporcional al campo aplicado a través de la función dieléctrica compleja $\varepsilon = \varepsilon_1 + i\varepsilon_2$, que a su vez está relacionada con el índice de refracción complejo del medio ($n + ik$).

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_0 (n^2 - k^2) \quad \varepsilon_2 = \varepsilon_0 (2nk) \quad (2.9)$$

$$n = \sqrt{\frac{\sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2} + \varepsilon_1}{2}} \quad k = \sqrt{\frac{\sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2} - \varepsilon_1}{2}} \quad (2.10)$$

Donde n es el índice de refracción del medio y k su coeficiente de absorción.

Cuando el campo posee intensidad suficiente la polarización deja de ser una función lineal de \tilde{E} , apareciendo términos anarmónicos en la respuesta óptica del medio. En régimen no-lineal podemos expresar \tilde{P} mediante una expansión en serie, en la que las

componentes de la polarización están correlacionadas con potencias crecientes de las componentes del campo aplicado, a través de los tensores de susceptibilidad óptica de órdenes sucesivos [38]:

$$P_i = \varepsilon_0 \left[\sum_j \chi_{ij}^{(1)} E_j + \sum_{j,k} \chi_{ijk}^{(2)} E_j^* E_k + \sum_{j,k,l} \chi_{ijkl}^{(3)} E_j E_k^* E_l + \dots \right] \quad (2.11)$$

Donde $\chi^{(n)}$ es la susceptibilidad no-lineal de orden n . Cuando el material posee alguna de estas susceptibilidades y el campo es lo suficientemente intenso estos fenómenos no-lineales se tornan evidentes. El primer término de la ecuación 2.11 es la susceptibilidad lineal de primer orden de la ecuación 2.7 y está relacionado con el índice de refracción lineal del medio. El segundo término da cuenta de las interacciones no-lineales de segundo orden, es responsable de fenómenos como la generación de segundo armónico y otras interacciones paramétricas. Este término se anula, debido a razones de simetría, en medios isótropos y está presente en materiales no centro-simétricos.

El término asociado al tercer orden puede reescribirse como :

$$P_{NL}^{(3)} = \sum_{j,k,l} \chi_{ijkl}^{(3)} (E_j E_k^*) E_l = \sum_l \tilde{\chi}_{il}^{(1)} (I) E_l \quad (2.12)$$

donde se observa como la polarización de tercer orden adopta la forma de un término similar al de orden uno, con una *susceptibilidad nominal* que depende de la intensidad del campo aplicado. Si expresamos el vector D como la suma de una componente lineal y otra no-lineal de polarización:

$$\tilde{D} = \varepsilon_0 \tilde{E} + \tilde{P} + P_{NL}^{(3)} = \left[\varepsilon + \Delta\varepsilon(\chi_{ijkl}^{(3)}, I) \right] \tilde{E} \quad (2.13)$$

nos conduce a un término adicional en la función dieléctrica $\Delta\varepsilon$ que depende del tensor de susceptibilidad de tercer orden ($\chi_{ijkl}^{(3)}$) y de la intensidad (I) del campo aplicado. La ecuación 2.13 puede interpretarse como una dependencia lineal del índice de refracción complejo del medio con la intensidad del campo aplicado. Con ello

$$n = n_0 + n_2 I \quad (2.14)$$

$$k = k_0 + k_2 I \quad o \quad \alpha = \alpha_0 + \beta I \quad (2.15)$$

donde α es la absorción del medio. El subíndice 0 corresponde a los términos en ausencia de campo aplicado y el subíndice 2 corresponde a la contribución de tercer orden. El término n_2 se conoce como índice de refracción no-lineal (coeficiente Kerr) del medio, mientras que $k_2(\beta)$ designa el coeficiente de absorción (o la absorción) no-lineal del medio. Dado que la modificación de índice se produce a lo largo del eje

del campo eléctrico, si un haz polarizado intenso se propaga en un medio anisótropo induce una asimetría en su respuesta óptica. La existencia de diferentes valores de índice en función de la orientación del campo respecto a determinados ejes del medio es un fenómeno conocido en óptica como birrefringencia. Así pues, una primera consecuencia de la dependencia del índice de refracción con la intensidad es la birrefringencia inducida por un haz polarizado intenso [38]. Veremos que este efecto es de especial utilizada para determinar la intensidad y la fase de un pulso ultracorto en la sección 3.4 cuando describamos la técnica de *Polarization-Gating Frequency Resolved optical Gatin (PG-FROG)* [2]. De forma general el efecto óptico Kerr es el origen de una amplia gama de fenómenos ópticos no-lineales entre los que cabe destacar el autoenfoque no-lineal (presente en cualquier medio transparente cuando el perfil espacial del pulso no es plano), la automodulación de fase, y los fenómenos de mezclado de cuatro ondas (*Four Wave Mixing*) [38].

Respecto al término absorbivo no-lineal, en sentido estricto, el coeficiente de absorción no-lineal (β) de la ecuación 2.15 hace referencia a procesos de absorción de dos fotones. Dado que el coeficiente de absorción es proporcional a la intensidad, la ecuación que rige la atenuación en el medio durante la propagación es:

$$\frac{dI}{dz} = \alpha I = \alpha_0 I + \beta I^2 \quad (2.16)$$

con lo que la potencia absorbida escala con el cuadrado de la intensidad incidente. Esta es la situación de los procesos de absorción a dos fotones (*Two Photon Absorption, TPA*) en fotodiódos que se describen en el capítulo 5.3.1.

Si el proceso involucra la absorción de más de dos fotones ($k > 2$), una descripción formal rigurosa involucra el uso de una susceptibilidad de orden superior ($2k - 1$). Debe destacarse que, aunque similares en el número de fotones involucrados y en sus dependencias (cuadráticas) con la potencia del haz, la absorción de dos fotones (*TPA*) es un fenómeno no-lineal de tercer orden ($\chi^{(3)}$) que ocurre en todos los materiales, mientras que la generación de segundo armónico (*Second Harmonic Generation, SHG*) es un fenómeno no-lineal de segundo orden ($\chi^{(2)}$) que solo puede tener lugar en materiales no-centrosimétricos.

Finalmente, si el medio es no absorbente ($k \approx 0$), las partes real e imaginaria de la susceptibilidad de tercer orden son directamente proporcionales al índice de refracción y a la absorción no-lineal respectivamente,

$$\chi_R^{(3)} = \frac{4}{3} n_0^2 \varepsilon_0 c n_2 \quad (2.17)$$

$$\chi_I^{(3)} = \frac{n_0^2 \varepsilon_0 c \lambda}{3\pi} \quad (2.18)$$

mientras que en medio absorbentes existe un entrelazado entre las partes real e imaginaria de la susceptibilidad de tercer orden y el índice de refracción no-lineal [39]:

$$\chi_R^{(3)} = \frac{4n_0\epsilon_0c}{3}(n_0n_2 - k_0k_2) \quad (2.19)$$

$$\chi_I^{(3)} = \frac{4n_0\epsilon_0c}{3}(n_0n_2 + k_0k_2) \quad (2.20)$$

Experimentalmente en esta tesis se ha realizado optimización en generación de segundo armónico (*SHG*) ($\chi^{(2)}$), efecto Kerr óptico ($\chi^{(3)}$) y absorción a dos fotones ($\chi^{(3)}$). También se han realizado experimentos de optimización sobre procesos de alineación molecular. El intenso campo eléctrico de los pulso es capaz de alinear las moléculas de nitrógeno (N_2) del aire con el plano de polarización del láser, lo que da lugar a efectos de birrefringencia inducida. Los procesos de *SHG* y alineación molecular se describirán con detalle en sus respectivos apartados de resultados experimentales.

2.4. Optimización

La optimización puede ser definida como el proceso de determinar la *mejor* solución para un determinado problema y puede ser aplicada a todo tipo de situaciones y problemas. Se puede optimizar un problema matemático o de índole aplicada como , el establecimiento de rutas comerciales, el diseño de reactores químicos, logística, enrutamiento en redes de comunicación,...

En general podemos definir un problema de optimización como encontrar el valor óptimo (deseado) de $f(\mathbf{x})$, donde $\mathbf{x} \in S^D$ es un vector de D parámetros $\mathbf{x} = \{x_1, x_2, \dots, x_D\}$. Denominaremos a estos D parámetros como espacio de control y al conjunto de valores de $f(\mathbf{x})$ asociado a cada uno de los posibles vectores \mathbf{x} , espacio de soluciones.

En nuestro problema el espacio de control está constituido por la fase espectral, $\phi(\omega)$, del pulso laser. Experimentalmente¹⁸ está compuesto por 320 variables, cada una de ellas controlables en el rango $[0, 2\pi]$. Hemos de encontrar $\phi(\omega)$ para optimizar nuestro observable, la generación de un efecto óptico no-lineal producido por el campo eléctrico $E(t) = \mathcal{F}^{-1}[E(\omega)]$ sobre un medio.

Disponemos de un espacio de control de una alta dimensionalidad, con un observable no-lineal. Debido a que no tenemos conocimiento suficiente sobre el sistema (mecanismos de interacción implicados, caracterización del pulso, perturbaciones en el camino óptico...) para poder hacer un diseño de $E(t)$ *a priori*, hemos de utilizar una configuración en bucle cerrado como la que muestra la Figura 1.1 para encontrar la conformación temporal. Esto permite que la observación del efecto producido por

¹⁸Debido a las características del sintetizador de pulsos, capítulo 5.2

$E(t)$ sea utilizada por un algoritmo de optimización para poder encontrar la fase $\phi(\omega)$ adecuada.

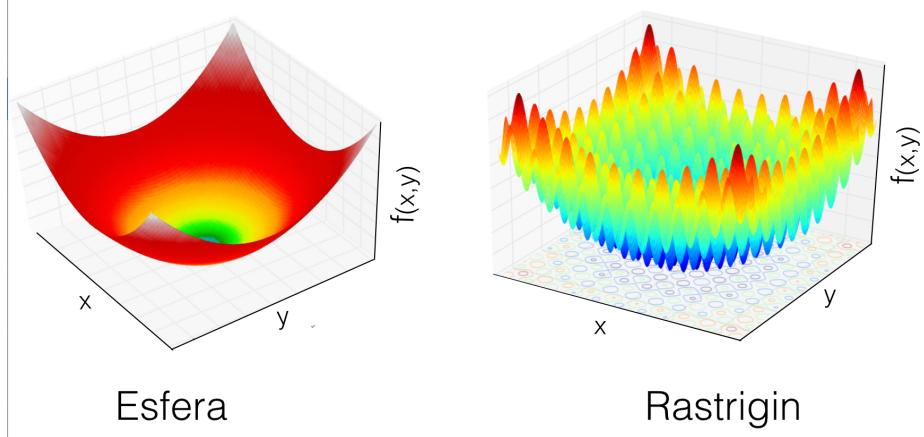


Figura 2.3: Ejemplos de espacios de soluciones mono y multimodal. En el caso de la esfera sólo disponemos de un mínimo global. La función *Rastrigin* posee múltiples mínimos de diferente valor, es multimodal.

La topología del espacio de soluciones y el ruido al que está sometido el experimento determinarán la eficiencia de la aplicación de un algoritmo. Para ilustrar el concepto de topología del espacio de soluciones en la Figura 2.3 tenemos dos espacios de soluciones continuos bidimensionales que muestran diferente complejidad. Imaginemos que tenemos que encontrar el mínimo de cada uno de estos espacios. Es claro que para el caso de la esfera nos bastará con seguir su gradiente. Este espacio sólo posee un mínimo claramente localizado, es un ejemplo de una función *unimodal*, solo existe una cuenca de atracción en la que reside el mínimo global. En contraposición nos podemos encontrar con un espacio *multimodal*, como el correspondiente a la función *Rastrigin*, vemos múltiples mínimos/máximos que no poseen el mismo valor, constituyen soluciones locales. En la búsqueda del mínimo global los mínimos locales suponen trampas en la que los algoritmos de optimización pueden quedar atrapados. Hacen falta métodos mas complejos para encontrar el óptimo en este tipo de espacio de soluciones.

Cada espacio de soluciones tiene un algoritmo que lo recorre mejor. cómo nos dice el *"Non Free Lunch Theorem"* [40], no existen algoritmos de aplicabilidad universal, de hecho, en promedio frente a los diferentes tipos de espacios, todos los algoritmos se comportan con igual eficiencia. La elección del algoritmo de optimización es, por lo tanto, fundamental para minimizar el número de evaluaciones necesarias en la optimización. Mantener baja la ventana de recursos consumidos y obtener un resultado satisfactorio son los dos aspectos mas importante de esta elección.

Básicamente, los algoritmos de optimización se diferencian en cómo muestran el espacio de soluciones y en cómo toman las decisiones para realizar los siguientes muestreos. Aparece aquí el concepto de distancia de salto, normalmente denotado σ , que determina la distancia a la que se evalúan las soluciones en el espacio. El problema de determinar el tamaño de σ es fundamental. Por ejemplo, un tamaño de paso reducido puede hacer que no podamos escapar de una cuenca perteneciente a un mínimo local, uno demasiado grande puede hacer que no podamos encontrar un mínimo muy localizado.

Existen múltiples criterios posibles para catalogar los diferentes algoritmos de optimización, existiendo un gran solapamiento de clases ante cualquier clasificación que se establezca. Una primera división general la podemos establecer entre métodos basados en la derivada (derivativos) y no basados en la derivada (no-derivativos).

- **Derivativos.** Estos métodos utilizan información del gradiente que ofrece el espacio de soluciones para establecer la dirección y distancia de la búsqueda que realizan. Suelen ser veloces en la obtención de soluciones. Ejemplos de estos métodos los tenemos en la búsqueda de Newton-Raphson o el descenso de gradiente.
- **No-Derivativos.** Se utilizan cuando el espacio de soluciones no es derivable o no es continuo. Suelen presentar una marcada componente estocástica y pueden estar basados en conceptos como la evolución (algoritmos evolutivos) o la termodinámica (*simmulated annealing*)

Dentro de los derivativos y los no derivativos podemos hacer una distinción en función del número de soluciones que utilizan a la vez en la exploración. De esta forma podemos distinguir entre algoritmos mono-punto y multi-punto.

- **Mono-punto.** Exploran el espacio de soluciones mediante la evolución controlada de un único punto que se irá desplazando hasta alcanzar el mínimo de la función de coste.
- **Multi-punto.** Utilizan múltiples puntos para explorar el espacio de soluciones. Los algoritmos evolutivos son uno de sus ejemplos mas conocidos, en los que los puntos de prueba se agrupan en poblaciones, que evolucionan generación tras generación, hasta encontrar el óptimo.

También resulta útil clasificarlos en función de cómo generan sus soluciones de prueba a la hora de explorar el espacio. Atendiendo a este aspecto en la Figura 2.4 vemos su clasificación en dos grandes grupos, aleatorios y deterministas

Los algoritmos deterministas podemos definirlos como aquellos algoritmos en los que conociendo sus entradas tenemos perfectamente definida su salida, ante el mismo

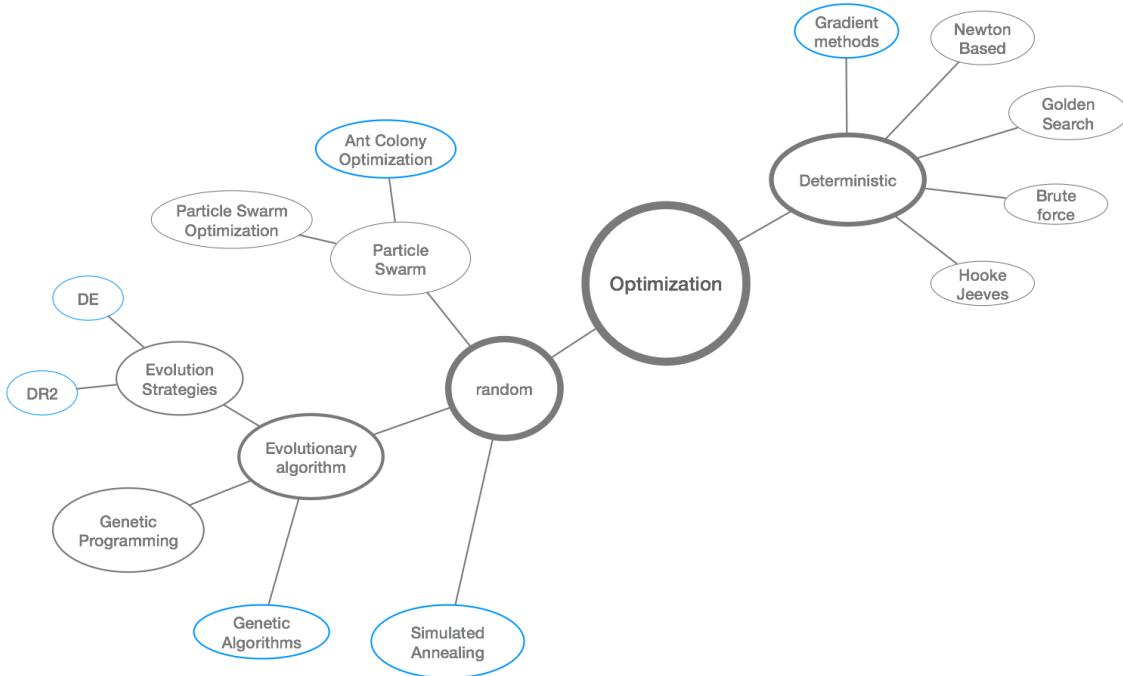


Figura 2.4: Clasificación de algoritmos de optimización. En azul los principales algoritmos que podemos encontrar en la literatura aplicados a nuestro problema.

problema y punto de partida nos ofrece siempre la misma respuesta. Su secuencia de pasos de optimización no se encuentra condicionada por factores aleatorios. Son más eficientes que los algoritmos probabilísticos, pero esta aproximación es muy restrictiva y el número de problemas para los que existe un algoritmo determinista eficaz es limitado.

Los algoritmos con base aleatoria, o algoritmos probabilísticos, que son aquellos en, en mayor o menor grado, tienen dependencia del azar en su exploración y/o toma de decisiones. Ante el mismo problema nos ofrece siempre una respuesta diferente, por lo que es posible que hay que tener que recurrir a la estadística para poder validar sus resultados.

Atendiendo a la aleatoriedad podemos encontrarnos:

- **Deterministas**

Newton-Raphson. Utilizado para encontrar raíces de una función, no muy eficiente si dicha función no es cuadrática.

Métodos de gradiente (*Gradient Descent*). Se establece una dirección y distancia de búsqueda a partir de la evaluación local de la pendiente que ofrece la solución.

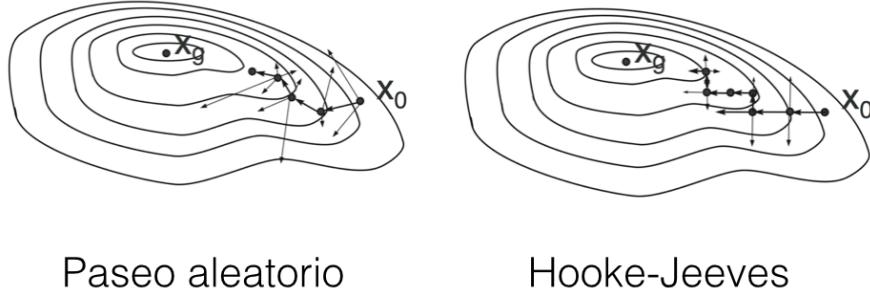


Figura 2.5: Exploración del espacio de soluciones de una función unimodal mediante los métodos monopunto de *paseo aleatorio* y *Hooke-Jeeves*

Fuerza Bruta (*Brute Force search*). Sigue un patrón establecido de búsqueda a lo largo de todo espacio, con un tamaño de paso, σ determinado. Son poco eficientes y requieren un gran número de muestras para encontrar la solución.

Paseo aleatorio (*Random Walk*). Explora mediante la generación de puntos aleatorios basados en adición de una perturbación, normalmente con distribución gaussiana, al punto de exploración, con adopción del nuevo punto probado si este ofrece mejor resultado (fig2.5).

Búsqueda Áurea (*Golden section search*). Se utiliza para encontrar extremos (mínimo/máximo) en funciones unimodales, se basa en restringir en sucesivas iteraciones el rango de valores en el que el extremo existe.

Hooke-Jeeves (*Pattern Search*). Explora cada eje de coordenadas, en cada punto, y con un paso determinado, se exploran todas las D dimensiones en direcciones positivas y negativas. Si el mejor de los puntos probados es mejor que el base se acepta y se realiza una exploración en la misma dirección que generó la mejora, si no lo es, se disminuye el tamaño de paso (fig2.5).

Nelder-Mead (*Simplex*) Se basa en la evolución de un polígono¹⁹ de $n + 1$ vértices denominado simplex, siendo n el número de dimensiones del espacio. El simplex evoluciona mediante reflexiones y expansiones, dependiendo de la evaluación que proporcionan sus vértices, a lo largo del espacio de soluciones.

■ Aleatorios

Simulated Annealing. Inspirado en la termodinámica, imita el comportamiento de los átomos en el enfriamiento lento de una sustancia, en el que buscan alcanzar una configuración de mínima energía. Se explora el espacio de forma

¹⁹Estrictamente hablando se trata de un politopo

aleatoriedad, pero se permite la evolución hacia peores valores de evaluación con una probabilidad que dependerá de la "temperatura", decreciente con el número de evaluaciones del algoritmo.

Optimización de enjambre de partículas (*Particle Swarm Optimization*) Es un conjunto de técnicas de optimización basadas en el comportamiento de partículas (soluciones) que imitan el comportamiento de un enjambre, como bancos de peces, abejas, hormigas...

Algoritmos evolutivos. Inspirados en la evolución Darwiniana, los algoritmos evolutivos (*AE*) hacen pocas o ninguna asunción acerca del problema que tratan de resolver. Son capaces de encontrar soluciones en espacios de soluciones muy grandes y topológicamente adversos. Son la solución mas extendida en el problema que nos ocupa.

Estas clasificaciones no son exclusivas, por ejemplo, a un algoritmo determinista se le puede incorporar cierto grado de aleatoriedad. De esta forma se puede mejorar su capacidad de exploración. Igualmente, un algoritmo monopunto se puede utilizar con aproximación multipunto, lanzando varias soluciones que evolucionen de forma paralela.

Los *AEs* son estrategias de búsqueda bio-inspiradas en los mecanismos de adaptación y evolución. Imitan la evolución, un mecanismo que se ha mostrado tremendamente efectivo para resolver el problema de sobrevivir en un entorno fuertemente no-lineal y no predecible cómo es nuestro planeta. En un *AE* el problema se trata cómo un entorno biológico artificial, las soluciones se agrupan en poblaciones que evolucionan a lo largo de generaciones en la búsqueda del óptimo. Cada población es un conjunto de soluciones posibles, a las que se asigna un valor dependiendo del resultado de su evaluación. Las soluciones, siguiendo determinadas reglas, se reproducen y generan una descendencia que constituye (o forma parte) la siguiente generación. Generación tras generación la población evoluciona hasta lograr la convergencia al óptimo. Por su carácter probabilístico la solución ofrecida será diferente en cada caso.

Dentro de los *AEs* podemos distinguir dos grandes grupos, las estrategias evolutivas (*EE*) y los algoritmos genéticos (*AG*); existiendo entre ellos dos grandes diferencias. La primera es que los (*AG*) codifican la solución mediante tramas de bits, imitando el comportamiento del genoma, mientras que en las *EEs* se trabaja con parámetros en coordenadas reales (aunque podemos encontrar *AG* que trabajan con parámetros reales). La segunda gran diferencia es su forma de generar la descendencia a partir de las poblaciones. En los *AG* la evolución de la población es producida solamente por los mecanismos de mutación y cruce sobre los genes (bits) o parámetros que componen sus soluciones. En las *EE* se utiliza también información acerca del espacio de soluciones, que se obtiene a través de la evaluación de los individuos, para generar un esquema autoadaptativo de exploración.

Cómo se ha mostrado en la gran mayoría de las soluciones de optimización sobre fenómenos ópticos de interacción no-lineal mediante conformación temporal de pulsos está basada en algoritmos probabilísticos. Especialmente extendido está uso de los *AEs*, aunque también podemos encontrar aplicaciones en las que se prueban otro tipo de algoritmos como los de *ant colony* [41] o *simulated annealing* [21].

La paralelización en el proceso de optimización es una ventaja de los *AEs*. Todos los individuos de la población pueden ser evaluados de forma independiente y paralela. En el caso de la experimentación computacional la ventaja es clara, pero en nuestro caso (optimización real en laboratorio) esta ventaja directamente desaparece: experimentalmente sólo podemos realizar una evaluación de solución sobre el experimento cada vez. Por fuerza nuestro proceso de evaluación ha de ser en serie.

Aunque su aplicación y capacidad de encontrar soluciones en el problema que nos ocupa esta fuera de duda, los *AEs* tienen un importante inconveniente derivado de los mecanismos estocásticos y poblacionales: requieren un número elevado de evaluaciones para converger. Además pueden sufrir una importante perdida de velocidad de convergencia al aumentar el número de variables a optimizar. Es la denominada explosión combinatoria. El incremento de variables en el espacio de control, hace que los espacios de soluciones asociados incrementen su tamaño de forma exponencial. Esto puede repercutir de forma notable en el proceso de búsqueda. Uno de nuestros objetivos es, precisamente, intentar mantener bajo el número de ensayos requeridos en la optimización.

Dado que los *AEs* son ampliamente utilizados en los problemas de optimización que nos afectan, en esta tesis hemos utilizado dos de ellos, de los que se encontrará una descripción detallada en el Capítulo 4.

- *Algoritmos Genéticos*. Se han incluido por ser uno de los algoritmos más extendidos en este tipo de problemas.
- *Differential Evolution*. Hemos empleado este algoritmo alternativo a las estrategias habitualmente encontradas en la literatura. Se ha elegido por presentar buenas propiedades de convergencia en un gran número de problemas con alta dimensionalidad y de tipo no-lineal [31].

A lo largo del desarrollo de esta tesis nos hemos encontrado con determinados aspectos topológicos del espacio de soluciones²⁰ y del comportamiento del espacio de control que nos ha llevado a desarrollar un algoritmo novedoso. Lo denominamos *Multiple One-Dimensional Search (MODS)*, Se verá con detalle en el capítulo 4. .

Podríamos clasificarlo cómo:

²⁰Conocer la topología del espacio de soluciones es una gran ayuda a la hora de realizar una optimización

- Determinista: siempre sigue los mismos pasos y siempre nos ofrece la misma solución ante las mismas condiciones, haciendo una exploración sistemática del espacio de soluciones.
- Mono-punto: Usamos una sola solución que perturbamos para explorar el espacio
- Marginal: Optimiza los parámetros del espacio de control de forma individual
- Utiliza conceptos de exploración similares a Hooke-Jeeves y de restricción de espacio similar a la búsqueda áurea.

Este algoritmo presenta un excelente balance entre la bondad de las soluciones obtenidas y el número de evaluaciones requeridas para lograr la convergencia, minimizando así la ventana de recursos consumidos, y presentando una alternativa realista ante optimizaciones donde el número de evaluaciones a realizar se encuentra limitado por alguna circunstancia.

Capítulo 3

Soporte Experimental

3.1. Introducción

En este capítulo se describirán los elementos que hacen posible la realización de los experimentos, el esquema general del sistema experimental utilizado se muestra en la Figura 3.1. En él podemos ver cómo el pulso generado por el sistema láser se conforma temporalmente por el sintetizador de pulsos. El efecto físico generado por el pulso conformado es observado por el algoritmo de optimización, que ejerce las acciones sobre la síntesis de pulsos para guiar el efecto hacia el objetivo que se le ha asignado. Es posible extraer el pulso para su caracterización una vez se ha conformado, con el fin de obtener información sobre los mecanismos físicos del proceso.

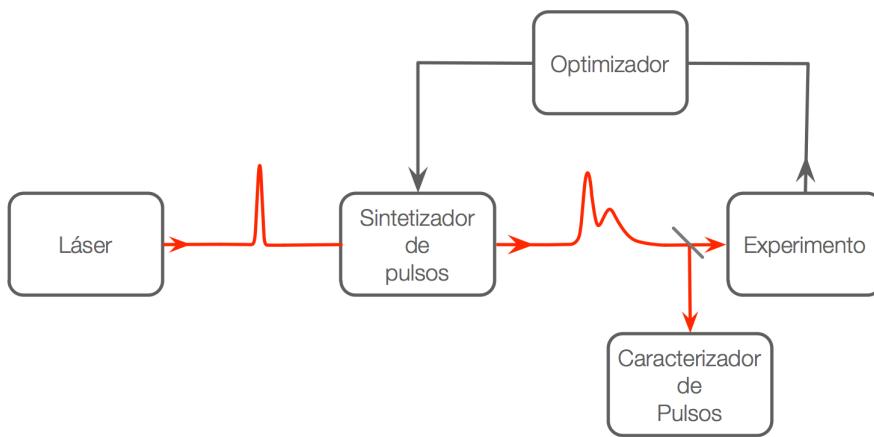


Figura 3.1: Esquema relacional básico de los elementos que conforman el sistema experimental. El sistema láser proporciona los pulsos que serán modificados por el sintetizador de pulsos. Podemos observarlos gracias al caracterizador de pulsos (*FROG*). Una vez interaccionan en el experimento el optimizador genera las acciones necesarias sobre el sintetizador en base a su observación.

Se describirá el funcionamiento y principales características de los siguientes elementos.

- **Sistema laser.** Proporciona los pulsos ultracortos de 100 fs.
- **Sintetizador de pulsos.** Permite sintetizar formas de onda de $E(t)$ a través de la manipulación de la fase espectral en el dominio de la frecuencia. En él se encuentra el *SLM*, que constituye el espacio de control de los algoritmos de optimización.
- **Caracterizador de pulsos** Permite analizar el pulso resultante resolviendo su amplitud y fase tanto en frecuencia como en tiempo.

Los dos elementos restantes, el algoritmo y el observable necesitan de este soporte. Los algoritmos de optimización utilizados, así como el método de manipulación de la fase, se verán en el capítulo 4. Los observables utilizados se describirán en cada una de las optimizaciones experimentales que se analizan en el capítulo 5.

3.2. Sistema láser

Nuestra fuente de luz laser es un amplificador regenerativo de Ti:Zafiro (*Spitfire Pro XP*), que genera pulsos amplificados de 100 fs centrados en 799 nm (9.5 nm FHMW) de 1 mJ de energía con una frecuencia de repetición de hasta 1 kHz, lo que equivale a una potencia de pico del orden de 10 GW por pulso.

Este equipo es comercial de la marca *Spectra-Physics* y su configuración general se muestra en la Figura 3.2. En resumen, el sistema *bombeo-oscilador* genera un haz láser pulsado que es amplificado en el amplificador regenerativo (*Spitfire*), bombeado 1 kHz.

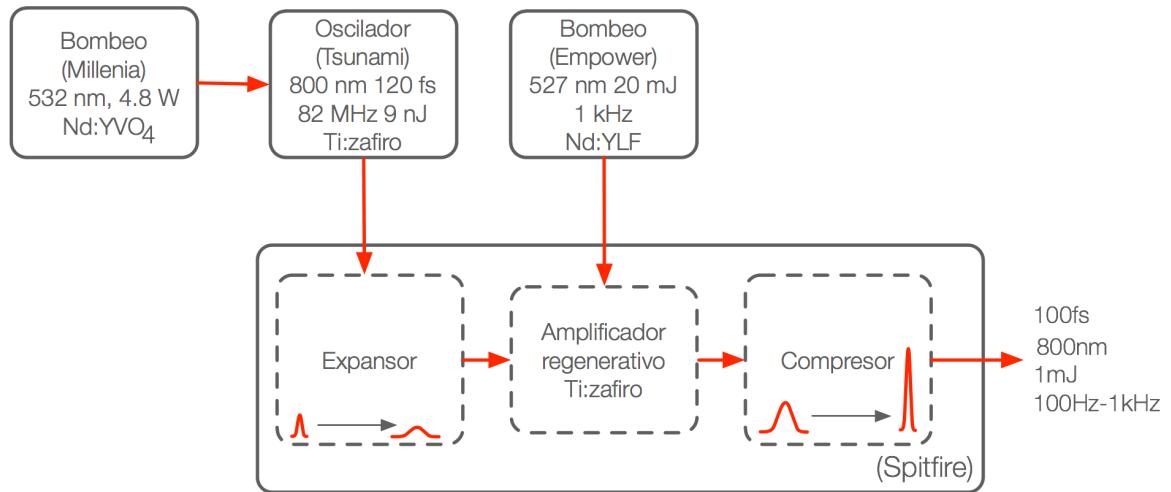


Figura 3.2: Esquema general del sistema de generación y amplificación de pulsos laser de fs empleado.

En el amplificador regenerativo recibe los pulsos láser semilla generados por el oscilador (*Tsunami*) de estado sólido de Ti:Zafiro anclado en modos. Este genera pulsos de 120 fs con una frecuencia de repetición de 82MHz, su energía de bombeo es proporcionada por un láser continuo de estado sólido (*Millenia*) de 4.8W centrado en 532nm. El bombeo de energía para la amplificación proviene de un láser pulsado por conmutación de Q²¹ con un medio activo de Nd:YLF bombeado por diodos de

²¹ *Q-switched*

AlGaAs (*Empower*). Este genera pulsos a 1053 nm, doblados en frecuencia dentro de la cavidad mediante un cristal de triborato de Litio (LBO) generando pulsos de 20 mJ centrados en 527 nm a 1 kHz.

En la Figura 3.3²² se muestra el camino óptico que siguen los pulsos semilla procedentes del oscilador dentro del amplificador regenerativo. Después de atravesar el aislador de Faraday²³ (*F1*) los pulsos son expandidos temporalmente por medio de un sistema de espejo-red de difracción de varios pasos (*Pulse Stretcher*). Mediante la expansión temporal se disminuye la potencia de pico de los pulsos, de forma que pueden ser introducidos en la etapa de regeneración y amplificados. Mediante un par de células de Pockels el pulso hace múltiples pasadas por el cristal de Ti:Zafiro. La célula pockels de inyección permite sincronizar las frecuencias de repetición del oscilador y el amplificador para generar pulsos amplificados con una frecuencia de repetición de 1 kHz. Esta es la etapa de amplificación en la que se incrementa su energía en cada paso hasta un factor $\approx 10^6$. Después de alcanzar el nivel deseado de amplificación, los pulsos se extraen mediante la célula pockels de salida y alcanzan el compresor (*Pulse Compressor*), donde son recomprimido para conformar el pulso de salida. Este tiene 100 fs duración, con un ancho de banda de 9,5nm *FWHM* centrado a 799nm. Estos son los pulsos láser con los que trabajaremos.

La etapa de compresión se encuentra motorizada, permitiéndonos cambiar la cantidad de trino²⁴ del pulso y, por lo tanto, su duración. Este mecanismo se utilizará en la experimentación para expandir temporalmente los pulsos y comprobar la capacidad de recompresión temporal de los algoritmos.

Las oscilaciones en los niveles de bombeo tanto del oscilador como del amplificador, así como fluctuaciones en el sincronismo entre los pulsos del oscilador (82 MHz) y el tren de pulsos de bombeo (1 kHz), generan fluctuaciones de energía en el pulso amplificado, si bien el fabricante especifica que estas son menores al 1%*RMS*, en la práctica nos encontramos con que son considerablemente mayores (ver Figura 5.2, página 88).

Disponemos también de una fuente de incertidumbre temporal en los pulsos que proviene del hecho de tener que realizar la amplificación con el pulso expandido temporalmente [42]. Durante las etapas de expansión y compresión los pulsos láser se encuentran dispersados espacialmente en el dominio de la frecuencia²⁵ [43], siendo extremadamente sensibles a las variaciones existentes de densidad y temperatura del medio (aire) por el que viajan. Estas variaciones provienen de corrientes térmicas producidas por los elementos que generan calor dentro del amplificador (células de

²²Figura tomada del manual del amplificador *Spitfire-pro* de *Spectra-Physics*

²³Rotador de polarización basado en efecto magneto-óptico que impide el retorno de los pulsos (p.e. retroreflexiones), que podrían dañar el oscilador

²⁴Fase cuadrática, genera una variación lineal de frecuencias en el tiempo

²⁵Veremos este aspecto en mas detalle al hablar del sintetizador de pulsos en el apartado siguiente

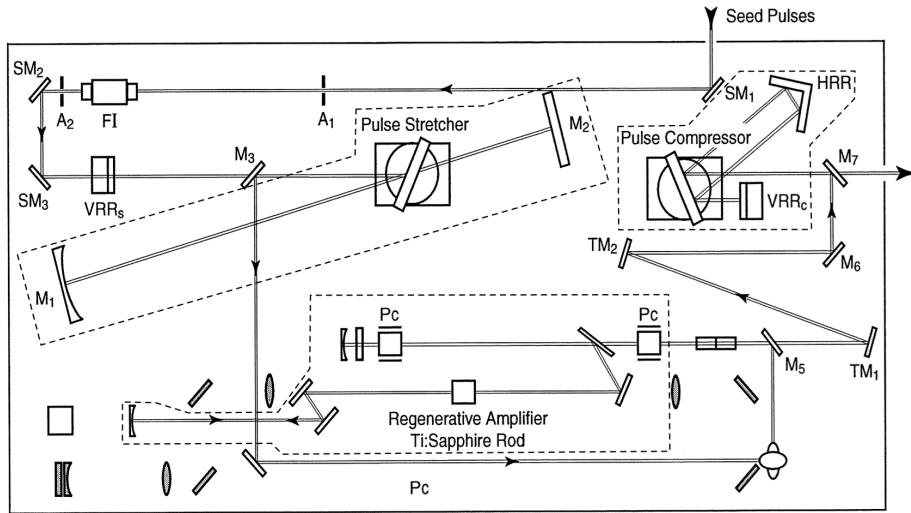


Figura 3.3: Esquema del camino óptico del haz procedente del oscilador (*Seed Pulses*) en la etapa de amplificación. El pulso es expandido temporalmente (Pulse Stretcher) antes de ser amplificado en la barra de Ti:Zafiro (medio de ganancia), posteriormente es recomprimido (Pulse Compressor) hasta alcanzar los 100 fs *FWHM*.

Pockels y bombeo de la barra de Ti:Zafiro principalmente), y de variaciones de presión producidas en el exterior, que se introducen en la cavidad del amplificador a través de la apertura de salida. La consecuencia es la aparición de cambios de fase espectrales y, por lo tanto, cambios en la conformación temporal del pulso. En procesos como la generación de segundo armónico o la absorción a dos fotones, donde el proceso depende de la potencia de pico, esto será de especial relevancia²⁶.

En definitiva, disponemos de un sistema de generación de pulsos láser ultracortos de 100 fs centrado en 799 nm, con 1mJ de energía y 1 kHz de frecuencia de repetición, pero cuyos pulsos poseen variaciones intrínsecas tanto de amplitud como temporales que van a afectar a nuestra observación de los fenómenos a optimizar, introduciendo incertidumbre en la señal de realimentación para los algoritmos. Mas adelante se verá cómo ello se refleja en el laboratorio en el capítulo sobre restricciones experimentales, 5.1.3, página 96.

²⁶Hemos trabajado experimentalmente con estos fenómenos, capítulo 5.3.3, página 122

3.3. Sintetizador de pulsos

Debido a las limitaciones en velocidad de los dispositivos electro-ópticos, en el rango de los femtosegundos han de usarse técnicas indirectas para la síntesis de formas temporales ($E(t)$). Nuestro sistema utiliza la técnica de filtrado de Fourier en el espacio de frecuencias. Para realizar la modulación temporal del pulso las componentes de frecuencia son dispersadas espacialmente, de forma que podemos interactuar sobre ellas. En el sintetizador de pulsos modificamos la fase espectral mediante un modulador espacial de luz programable controlado por ordenador. Una vez restituido el paquete de luz al dominio del tiempo su estructura temporal obedecerá a las modificaciones de fase que realicemos.

En este capítulo veremos cómo se realizan las traslaciones tiempo-frecuencia mediante una transformada de Fourier óptica y los aspectos mas relevantes del modulador de fase, así como sus problemas asociados.

3.3.1. Configuración del sintetizador de pulsos

De las múltiples configuraciones existentes para la generación de pulsos conformados temporalmente [44], se ha utilizado síntesis temporal de pulsos mediante manipulación de la fase espectral o *Phase Only Pulse Shaping*. Aunque la modulación de amplitud y fase son necesarias para una conformación temporal exacta, el uso de la fase espectral permite, en la práctica, alcanzar resultados muy satisfactorios [45] [46] [47]. Presenta, asimismo, la ventaja de conservar la energía del pulso de entrada, facilitando de esta forma la interpretación de la relación entre los fenómenos inducidos y la estructura temporal del pulso.

Para poder trabajar con el pulso en el dominio de la frecuencia se utiliza un sistema $4f^2$ ²⁷ con dispersión nula²⁸ [48] [49]. El esquema básico es el mostrado en la Figura 3.4. Por simplicidad visual se muestra con lentes aunque en la configuración experimental se utilizan espejos cilíndricos, tal y como se muestra en la Figura 3.5. La utilización de espejos cilíndricos permite evitar problemas de dispersión y aberración cromática que presentan las lentes, pero presenta el inconveniente de tener que trabajar fuera de eje óptico del sistema.

Básicamente, el sintetizador realiza una transformada de Fourier óptica en las primeras $2f$ y una transformada inversa en las últimas $2f$. El funcionamiento es cómo sigue. Las componentes de frecuencia que conforman el pulso ultracorto son dispersadas mediante la red de difracción de entrada, situada en el plano focal primera lente. Son enfocadas en el Plano de Fourier del sistema, en el que se forma la imagen de las

²⁷Por f entendemos la distancia focal

²⁸Básicamente en ausencia de mascara de fases la entrada y salida del sistema debe ser la misma. Así pues, tanto las lentes como las redes de difracción han de estar libres de dispersión.

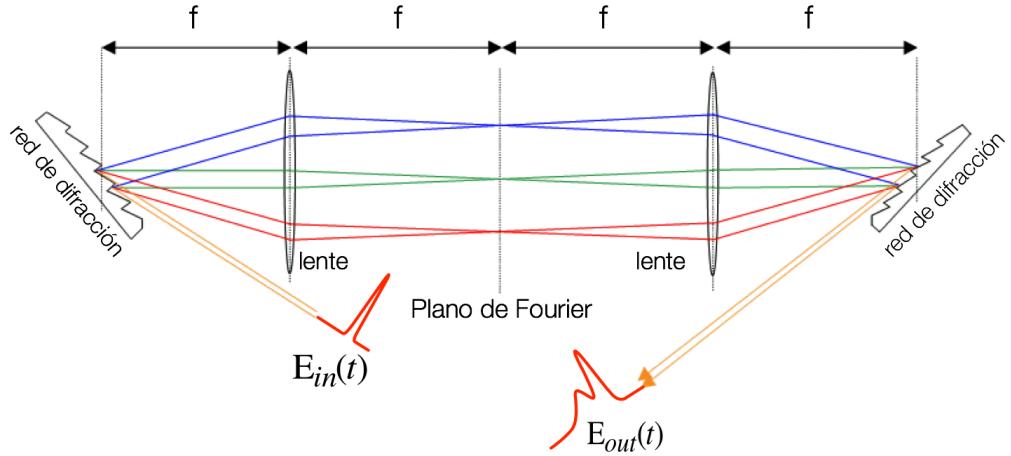


Figura 3.4: Esquema simplificado de un sintetizador temporal con configuración de dispersión nula utilizando redes de difracción y lentes. En el centro geométrico del sistema está el plano de Fourier, donde las frecuencias espaciales se encuentran espacialmente separadas. Este es el punto de inserción del modulador de fase.

componentes espectrales del pulso, encontrándose espacialmente separadas y enfocadas a lo largo de una dimensión. La segunda lente y red de difracción se encargan de la recombinación de todas las componentes espectrales en un haz colimado: el pulso es devuelto al dominio temporal.

Durante el desarrollo de esta tesis se han implementado dos sintetizadores de pulsos diferentes, ambos, por motivos de compatibilidad con otros experimentos, diseñados para ser utilizado a la salida del amplificador regenerativo²⁹. Este hecho impone importantes limitaciones, como son el diámetro de haz (≈ 8 mm a $1/e^2$) y su energía (1 mJ).

Para la implementación del primer sintetizador de pulsos (*sintetizador 1*) se utilizó la configuración descrita por Prakelt [49]. Se trata de un *sintetizador compacto* basado en redes de difracción fuertemente dispersivas (2000 líneas/mm) y lentes de ≈ 25 cm de focal. Sobre la red de entrada se utilizó un haz comprimido un factor dos, fuertemente atenuado para evitar el dañado del *SLM* y otros elementos ópticos, aun así, el diámetro conseguido no puede ser considerado como puntual en las redes de difracción. Este hecho, en combinación con los ángulos de entrada y salida en las redes (cuadro 3.3.1), el rango de Rayleigh de los espejos cilíndricos empleados (sólo 2 mm) y los ángulos necesarios entre elementos ópticos para el montaje compacto, generaban problemas irresolubles de astigmatismo, y el sistema mostraba un perfil

²⁹El sintetizador es utilizado para conformar el *Probe* en la realización de experimentos Pump-Probe en microscopía con resolución de femtosegundos, dichos pulsos requieren una considerable cantidad de energía

	<i>sintetizador 1, f:258mm</i>	<i>sintetizador 2, f:1000mm</i>
Longitud de onda	799 nm	799 nm
Red de difracción	2000 líneas/mm	1400 lineas/mm
Periodo	$5 \cdot 10^{-7}$ mm	$7.14 \cdot 10^{-7}$ mm
Ángulo de Littrow	53,13°	34,00°
Ángulo incidente	53,12°	53,12°
Ángulo difractado	53,14°	53,14°
Diámetro de haz ($1/e^2$)	8 mm	8 mm
Focal de la lente cilíndrica	258 mm	1000 mm
Rango de Rayleigh	2.11 mm	40.49 mm
Ventana temporal	29 ps	41 ps
Resolución espectral por pixel	0.20 nm	0.14 nm

Cuadro 3.1: Características principales de los dos sintetizadores utilizados.

espacial de salida no del todo satisfactorio³⁰ y una dispersión residual que ensanchaba el pulso de salida a unos 200 fs *FHWM*. A pesar de estos problemas, los resultados de los experimentos de optimización en compresión de pulsos fueron extremadamente satisfactorios.

No obstante se optó por desarrollar un segundo sintetizador de pulsos de alta energía (*sintetizador 2*) basándose en los esquemas desarrollados por Monmayrant et al. [37]. Este sintetizador fue diseñado *ex profeso* para cumplir con las necesidades de alta energía y diámetro de haz de nuestro sistema de amplificación, con ópticas de distancia focal larga (1 m) y redes de difracción menos dispersivas. Ello ha permitido disponer de un verdadero sistema 4f con dispersión nula con el que se ha realizado la mayor parte del trabajo de la tesis. Debe destacarse que es, hasta la fecha, el único sistema reportado en la literatura [50] capaz de emplear pulso del orden de 100 fs con energías en el rango de 1 mJ. En el cuadro 3.3.1 se muestran las principales características más importantes de ambos sintetizadores en relación a los parámetros empleados en la referencia [37], así como el rango de Rayleigh de las ópticas empleadas y los ángulos de incidencia y difracción empleados que condicionan el control de los problemas de astigmatismo del sistema.

Los resultados experimentales mostrados en el Capítulo 5 corresponden, excepto en las ocasiones en las que se especifica lo contrario, a resultados obtenidos con el *sintetizador 2*.

El modulador espacial de luz (*SLM*³¹) se sitúa en el plano de Fourier del sistema 4f del sintetizador. Es un conjunto lineal de 320 pixeles, cada uno de ellos con capacidad de modificar su índice de refracción extraordinario de forma independiente. Así las

³⁰Principalmente trino espacial, la distribución de frecuencias en el haz no era uniforme

³¹Spatial Light Modulator, se verá en detalle en la sección 3.3.2, pág. 36

longitudes de onda que atraviesan cada pixel sufrirán un desfase óptico diferente. Ello permite modificar la posición temporal relativa de las componentes espectrales, es decir, modificar su fase relativa.

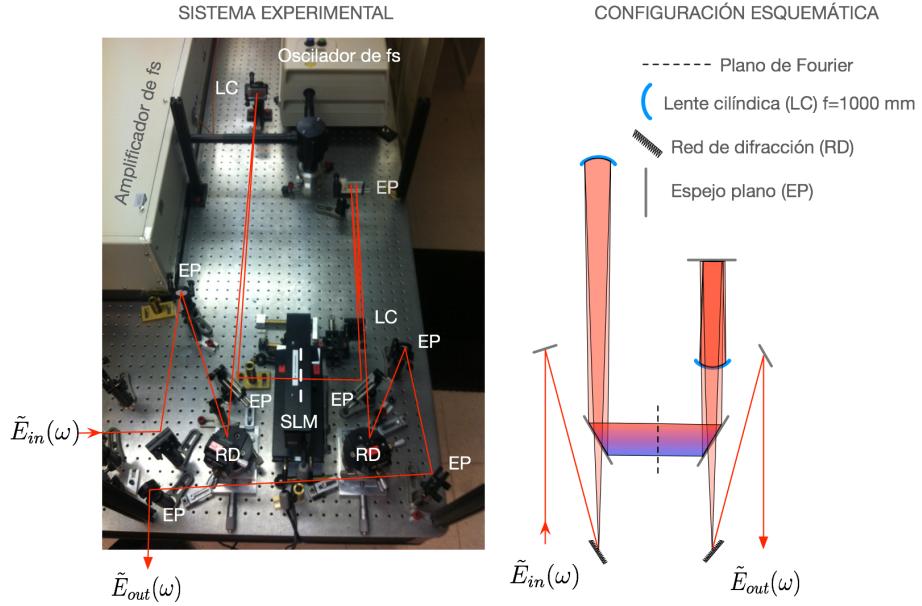


Figura 3.5: Esquema y configuración real del sintetizador de pulsos implementado. Se utilizan lentes de 1 m de focal. El recorrido interior del haz es de 4 metros (4f). En el montaje experimental el brazo de salida se encuentra plegado por limitaciones de espacio.(Configuración correspondiente al sintetizador 2, cuadro 3.3.1)

La respuesta en frecuencia del sintetizador puede expresarse como:

$$\tilde{E}_{out}(\omega) = \tilde{E}_{in}(\omega)H(\omega) \quad (3.1)$$

El pulso $\tilde{E}_{out}(\omega)$ es el producto del pulso de entrada por la función de transferencia espectral del sistema $H(\omega)$. Idealmente, un sistema 4f de dispersión nula presentara $|H(\omega)| = 1$, con lo que la energía del pulso de salida es igual a la del pulso de entrada. Mediante el *SLM*, situado sobre el plano de Fourier, podemos modificar la fase que introduce la función de transferencia, ϕ_{SLM} , sobre el espectro, con lo que nuestro pulso de salida será

$$\tilde{E}_{out}(\omega) = \tilde{E}_{in}(\omega)H(\omega) = |A_{in}(\omega)| e^{j\phi_{in}} 1 e^{j\phi_{SLM}} = |A_{in}(\omega)| e^{j\phi_{in} + j\phi_{SLM}} \quad (3.2)$$

Siendo $|A(\omega)_{in}|$ la envolvente espectral del pulso de entrada y ϕ_{in} su fase. El pulso de salida es obtenido mediante la aplicación de la transformada inversa de Fourier

óptica.

$$E_{out}(t) = \mathcal{F}^{-1}(|A_{in}(\omega)| e^{j\phi_{in} + j\phi_{SLM}}) \quad (3.3)$$

Por supuesto, esto es en condiciones ideales, en el sistema experimental real se presenta, sobre todo por efectos debidos al comportamiento y estructura de la mascara de fases (se verá en el siguiente apartado), aparecerá una cierta modulación de amplitud.

3.3.2. El modulador espacial de luz, *SLM*

Una vez disponemos del dispositivo óptico que nos permite transportar nuestro pulso temporal al dominio de la frecuencia podemos manipular sus componentes espectrales, ahora especialmente separadas. Para realizar la manipulación espectral el *SLM* opera sobre el plano de Fourier del sistema 4f. Podríamos realizar modificación de fase, amplitud y/o polarización [51], cada una de estas operaciones requiere su propia configuración y/o dispositivo de manipulación diferentes, como moduladores acusto-ópticos [15], mascaras holográficas, espejos deformables,... Nuestro sistema experimental utiliza un modulador espacial de luz de cristal líquido programable SLM-S320 (*Jenoptik*) que nos permite hacer una modificación dinámica de la fase espectral³².

Cambiar la fase espectral consiste literalmente en modificar la posición temporal relativa de las componentes espectrales de pulso. El *SLM* está compuesto por un array de 320 píxeles de cristal líquido que pueden modificar, de forma independiente y bajo demanda, su índice de refracción. Ello permite que las componentes de frecuencia del espectro que viajan por cada uno de los píxeles experimenten un camino óptico diferente: estamos modificando su fase relativa (fig. 3.6³³). La disposición geométrica de los píxeles puede observarse en la Figura 3.7.

La superficie que ocupa la mascara de fases tiene 32 mm de ancho por 13 mm de altura, cada uno de los pixeles tiene $97\mu m$ de anchura y se encuentran separados por zonas opacas de $3\mu m$. Un 3% de la energía espectral se pierde en estos espacios de separación, que también son responsables de una cierta modulación temporal³⁴.

Cada pixel del *SLM* es básicamente un lama retardadora controlada por voltaje, consistente en una capa de cristal líquido nemático entre dos sustratos de vidrio. Para cada pixel se disponen electrodos transparentes de *ITO*³⁵ y una capa de alineación

³²El SLM-320 nos permite, potencialmente, trabajar mediante modulación de amplitud, si quisieramos realizar a la vez modulación de fase y amplitud necesitaríamos dos dispositivos de modulación

³³Figura inspirada en <https://www.mbi-berlin.de/en/research/projects/4-1/subprojects/UP2/>

³⁴Es equivalente a someter al espectro a una serie de “compuertas” cómo se analizará en el apartado 3.3.3

³⁵Indium Tin Oxide. Óxido de indio y estaño

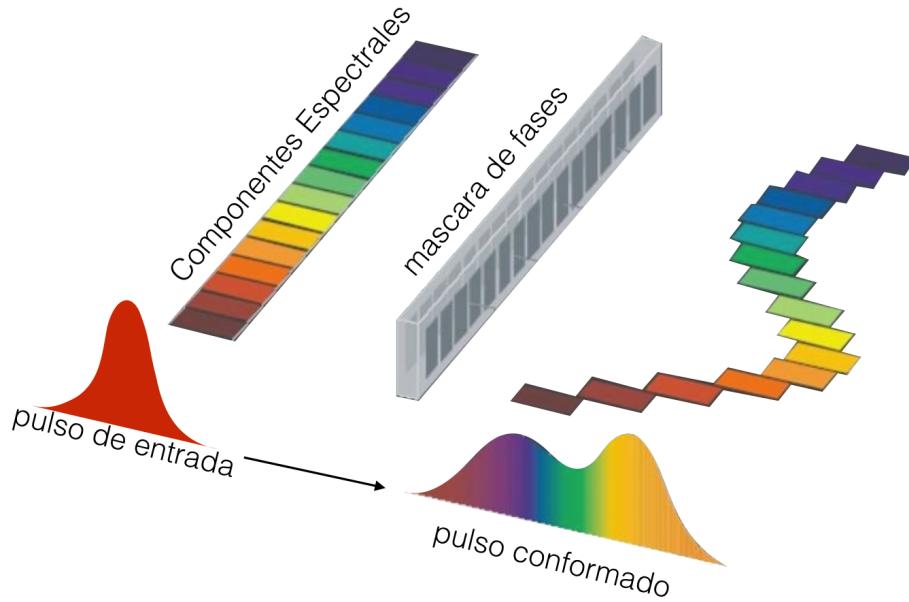


Figura 3.6: Cada una de las componentes de frecuencia experimentan un camino óptico diferente en *SLM* que podemos modificar a voluntad. De esa forma modificamos la fase espectral en el pulso y su conformación temporal.

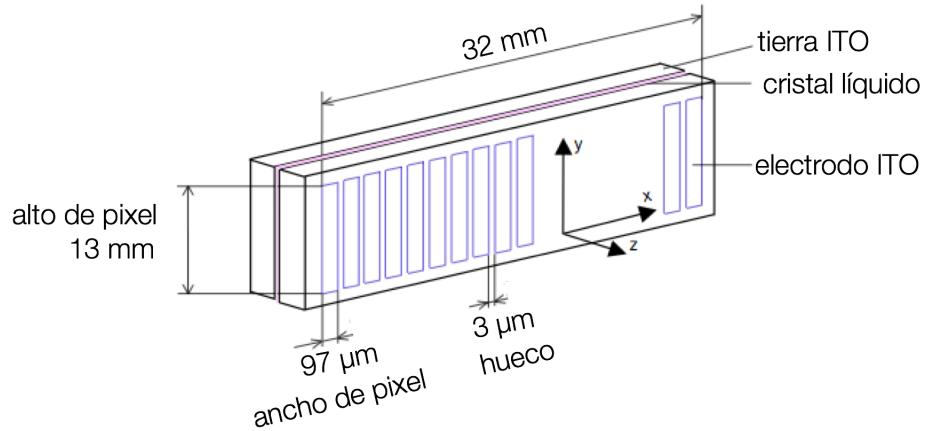


Figura 3.7: Distribución física de los píxeles en el SLM. Cada uno posee una ventana de $97\mu\text{m}$ con una área opaca de $3\mu\text{m}$. Un 3 % de la energía espectral se pierde en la transmisión

para la orientación geométrica de las moléculas (Figura 3.8).

Debido a su forma, las moléculas del cristal líquido tienden a orientarse de forma paralela, generando una anisotropía óptica. En ausencia de voltaje, las moléculas se

alinean a lo largo del eje x (fig. 3.8), que es el eje óptico. Un haz polarizado en el eje x experimenta el índice ordinario, n_o , del medio, mientras que un haz polarizado en el eje y experimenta el índice extraordinario, n_e . Al aplicar un voltaje V sobre los electrodos las moléculas tienden a alinearse respecto al campo eléctrico aplicado, disminuyendo n_e . Esta modificación de n_e es la responsable de la modulación de fase. Los píxeles funcionan sobre 8V y el controlador del sistema nos proporciona de 2^{12} niveles de control de este voltaje (0V=0 y 8V=4095).

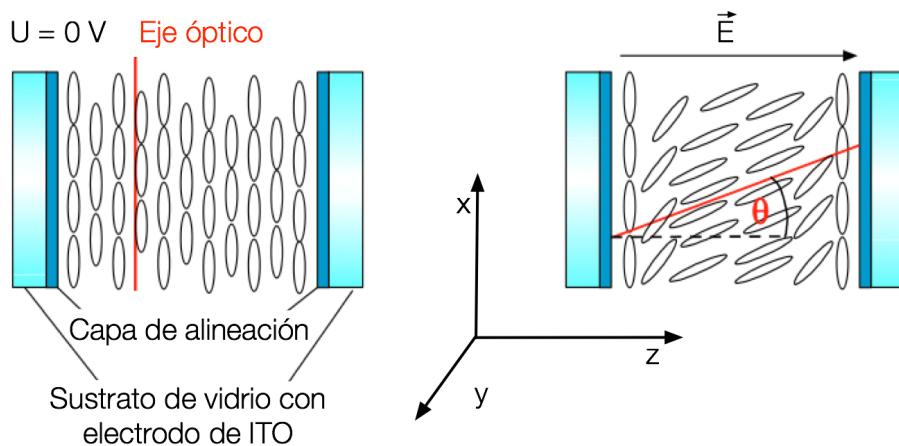


Figura 3.8: Las partículas nemáticas que conforman el cristal líquido se orientan con el campo eléctrico aplicado, E , entre los electrodos, modificando su eje óptico.

La variación del índice de refracción extraordinario en función del voltaje aplicado ha de ser calibrada ya que no todos los dispositivos fabricados tienen exactamente la misma respuesta. Además, n_e depende de la longitud de onda aplicada: cada una de las frecuencias sufre un cambio de fase ligeramente diferente para un mismo voltaje aplicado. En nuestro caso la curva de calibración la hemos realizado tomando como fuente láser el oscilador de fs, centrado en 799 nm, utilizando el esquema que se muestra en la Figura 3.9

Para realizarla se colocan polarizadores cruzados a ambos lados del *SLM* y se mide la curva de transmitancia (fig3.9) del haz del oscilador frente al cambio de voltaje en los píxeles del *SLM*. La transmitancia en función del voltaje se muestra en escala logarítmica para poder apreciar los cambios a niveles bajos de voltaje. A partir de las modificaciones de transmitancia se obtiene el cambio de fase que se introduce en función de la tensión aplicada. En la Figura 3.10 puede verse la curva obtenida, en la que se muestra el cambio de fase conseguido frente al valor de voltaje. Cuando el voltaje es máximo (8V=4095), las moléculas del cristal líquido tienen la máxima orientación en el eje de propagación del haz (eje Z), presentando el menor desfase posible que podemos conseguir. cómo se aprecia en la curva este cambio mínimo no

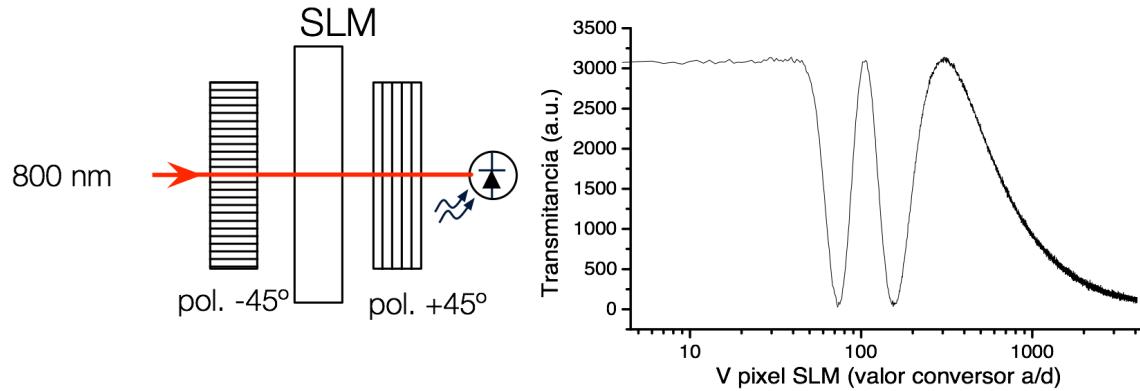


Figura 3.9: Para la calibración del *SLM* se miden los cambios de intensidad de una fuente de luz monocromática colimada a través del *SLM* frente a los cambios de voltaje en los píxeles. Antes y después del mismo se han colocado dos polarizadores cruzados a $\pm 45^\circ$ respecto al eje horizontal. De esta forma es utilizado como modulador de amplitud, midiendo la transmitancia en función del voltaje aplicado a los píxeles

es de 0 rad. El cambio de fase máximo que podemos obtener es superior a 16 radianes, correspondiente a la aplicación del nivel 0 de voltaje.

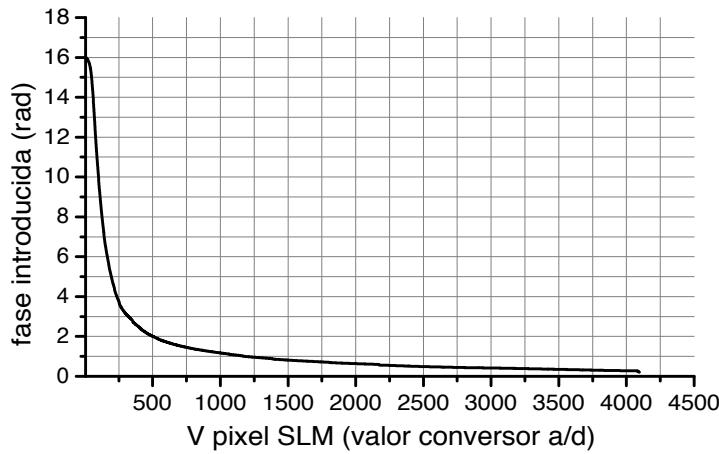


Figura 3.10: Curva de cambio de fase inducido en función de la tensión aplicada a los píxeles correspondiente a 799 nm. El desfase mínimo aplicable no es de 0 radianes, la curva presenta una acusada no-linealidad al incrementar el desfase

Dado que generalmente los cambios de fase necesarios en el diseño de los pulsos conformados supera ampliamente los 16 radianes, hemos de trabajar con la fase enrollada, acotando la zona de trabajo entre 0 y 2π radianes, utilizando valores de voltaje que estarán entre los niveles ≈ 350 y 4095. Se escoge esta zona de la curva por ser donde menor pendiente existe presentando, por tanto, mayor controlabilidad.

3.3.3. Limitaciones del sistema

La implementación experimental del sistema 4f presenta desviaciones frente al caso ideal. Sucede lo mismo con el elemento de control de fase, presentándose diversos problemas asociados a su construcción y funcionamiento, que afectan a la capacidad de control en la optimización, como veremos a continuación.

En el capítulo 5 (Restricciones experimentales, página 96) veremos las consecuencias que de estos y otros fenómenos tienen en la fidelidad de observación de los fenómenos a optimizar.

3.3.3.a. Resolución en la aplicación de la fase

Tal y como se aprecia en la Figura 3.10 el número de puntos de control disponibles para el control de la fase es diferente en cada una de los cuadrantes en los que podemos dividir el espacio de fases. como consecuencia, el error introducido será diferente según la fase aplicada. En el cuadro 4.1 (página 49) se muestra la capacidad de control por cuadrantes de fase. En el primer cuadrante disponemos de aproximadamente 3500 puntos de control de fase pasando a 45 en el último. Este cambio de granularidad en el control de la fase nos afecta negativamente al control que podemos ejercer, especialmente en la zona cercana a 2π rad

3.3.3.b. Modulación de amplitud

Como consecuencia de la resolución espacial finita y discretizada, cuando el salto de fase es muy brusco entre píxeles adyacentes, como ocurre en las fronteras de la fase enrollada, aparece un modulación de amplitud en el espectro [52], este efecto tiene un impacto no despreciable sobre la energíapectral.

Se puede apreciar este efecto en el la Figura 3.11 donde los saltos de fase son claramente apreciables. Se muestran imágenes de transmisión de la máscara de fases obtenidas utilizando luz blanca proyectada sobre una pantalla a través del *SLM*. La imagen superior derecha corresponde a una consigna de 0 radianes en todos los pixeles. Las franjas verticales que aparecen en la imagen superior izquierda corresponden a los saltos de fase producidos por la máscara mostrada. Estas sombras implican una pérdida de energía espectral del pulso, que se suman a las producidas por el espacio opaco entre píxeles y afectan a la conformación temporal. Suponen una fluctuación

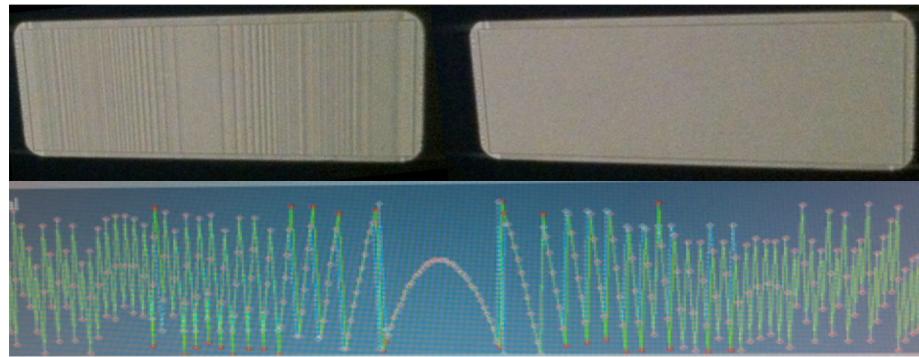


Figura 3.11: Transmisión del SLM con (superior izquierda) y sin (superior derecha) una fase aplicada (inferior). Los saltos bruscos de fase entre pixeles adyacentes generan una modulación de intensidad que podemos apreciar en forma de sombras. En las imágenes de transmisión podemos distinguir la zona de pixeles, área rectangular central, y los electrodos en la parte inferior y superior.

de la energía del pulso que no está directamente relacionada con la conformación temporal que la fase debería producir, y por lo tanto afectan a nuestra observación experimental. Este efecto, ademas, implica la aparición de fenómenos difractivos sobre el espectro, provocando también que una fracción no despreciable de la energía espectral quede fuera del camino óptico del sistema 4f, provocando una pérdida no controlada de energía extra.

3.3.3.c. Dependencia del cambio de fase con longitud de onda

La curva *fase-tensión*, Figura 3.10, relaciona la tensión aplicada con el cambio de fases inducido. Este cambio de fase está relacionado con el diferente camino óptico que experimentan las diferentes frecuencias, será por lo tanto será diferente para cada longitud de onda.

Hemos intentado caracterizar esta dependencia sustituyendo el fotodiodo de la Figura 3.9 por un Analizador de Espectros Óptico (OSA)³⁶, de esta forma se pueden obtener las curvas de cambio de fase para cada longitud de onda dentro del espectro del oscilador de fs. El resultado se muestra en la Figura 3.12

Todas las curvas ofrecen el mismo comportamiento global, con ligeras desviaciones dependientes de la longitud de onda específica. Cuando las observamos en detalle estas diferencias se tornan mas evidentes, tal y como podemos ver en la Figura 3.12(detalle). En la misma se ve ampliada la zona correspondiente al mínimo desfase aplicable y a la zona donde el desfase es fase $2\pi rad$. Se observa cómo el rango de valores de cambio

³⁶Optical Spectrum Analyzer YOKOGAWA 6370B

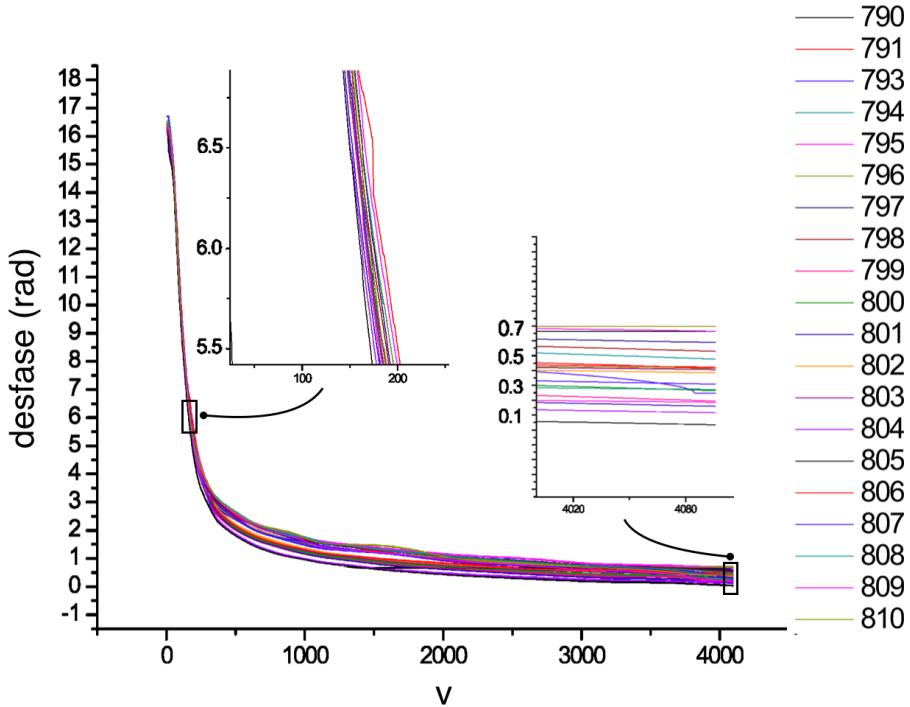


Figura 3.12: Curvas de *fase-tensión* para longitudes de onda (λ) entre 790 nm y 810 nm. Cada λ es afectada de forma ligeramente diferente por el índice extraordinario. Detalles de las curvas fase-tensión del entorno de fase 0 y fase 2π , los errores debidos a la utilización de una sola curva de calibración se incrementan al aumentar el cambio de fase inducido

mínimo de fase, en nuestro ancho espectral es de hasta 0.7 radianes ($\approx 40^\circ$). Este error es importante, pero no tanto como el que se produce al trabajar en el cuarto cuadrante. En esta zona, por su elevada pendiente, el error cometido puede llegar a ser de varios radianes.

No hemos podido establecer sin dudas que las medidas anteriores no estén contaminadas por efectos de automodulación de fase en la fibra óptica utilizada. Así pues hemos decidido trabajar con solo una de las curvas de calibración, la correspondiente a la frecuencia central de nuestro pulso, 799 nm. Las posibles desviaciones de establecimiento de fase derivadas de la dependencia con la longitud de onda quedan, por lo tanto, dentro del problema de optimización objetivo de esta tesis.

3.3.3.d. Acoplamiento espacio-temporal

La resolución espacial finita que nos ofrece tanto en el sistema 4f como el *SLM* tiene como consecuencia la existencia de un acoplamiento espacio temporal [53]. En

pocas palabras, cuando el haz conformado mediante un sistema 4f es enfocado existirán variaciones, tanto de la posición espacial del foco [45] como de su distribución espectral en el mismo [54], que serán dependientes de la fase aplicada. El desplazamiento espacial puede no tener relevancia en los casos donde la muestra irradiada sea lo suficientemente homogénea y se utilice un adecuado sistema de detección que pueda acomodar dicho desplazamiento. Sin embargo, cuando la muestra se encuentra en la nanoscala, o es enfocado fuertemente, sus efectos no pueden ser ignorados [55].

3.4. Caracterización temporal con PG-FROG

Las limitaciones en la velocidad de los dispositivos electrónicos hacen necesario la utilización de métodos indirectos para la caracterización temporal (intensidad/espectro) de los pulsos ultracortos. La reconstrucción del perfil temporal de intensidad y fase de un pulso ultracorto requiere la utilización de otro pulso ultracorto y una interacción óptica no-lineal.

Un pulso láser queda completamente definido por su campo eléctrico en el dominio del tiempo, $E(t)$, o de la frecuencia, $\tilde{E}(w)$. El objetivo de la caracterización es conocer, sin ambigüedades, tanto la intensidad como la fase en ambos dominios.

Para la caracterización completa de pulsos ultracortos las técnicas mas destacadas son *SPIDER* (*Spectral Phase Interferometry for Direct Electric-field Reconstruction*) [56], *GRENOUILLE* (*Grating-eliminated no-nonsense observation of ultrafast incident laser light e-fields*) [57] y *FROG* (*Frecuency Resolve Optical Gating*) [2]. Esta última es la que se ha implementado para la medición de pulsos ultracortos en el laboratorio del Grupo de Procesado por Láser del CSIC.

Antes de la aparición de la técnica *FROG* para caracterizar un pulso láser se disponía de sistemas de autocorrelación y correlación cruzada así como de espectrómetros. En los autocorreladores³⁷ el pulso es dividido en dos, con un camino óptico (retardo) variable de un pulso respecto al otro. Los pulsos interactúan sobre un medio con respuesta no-lineal instantánea, ofreciendo la respuesta expresada en la fórmula 3.4. Típicamente se utiliza el proceso de Generación de Segundo Armónico (*SHG*). La *SHG* genera un campo al doble de la frecuencia del de los haces incidentes con una intensidad que es proporcional al producto de la intensidad instantánea de ambos pulsos. Este mecanismo de generación de frecuencias ofrece ciertas características que hace que sea utilizada en varios experimentos de esta tesis³⁸. La amplitud de la señal

³⁷El proceso descrito es idéntico en el caso de los correladores cruzados, en los que se utiliza un pulso conocido para realizar la medición en vez de la división del pulso.

³⁸Capítulo 5.3, página 107, donde se ofrece una explicación mas detallada del proceso de generación de segundo armónico

generada viene dada por

$$A(\tau) \propto \int_{-\infty}^{+\infty} I(t)I(t - \tau)dt \quad (3.4)$$

El resultado experimental de la autocorrelación se obtiene variando τ , el retardo relativo entre ambos pulsos y midiendo la intensidad de *SHG* correspondiente. Este sistema no ofrece una caracterización temporal precisa del pulso, la estructura fina queda oculta, e irrecuperable, debido al proceso de la autocorrelación en sí. Además, al ser la señal de los sistemas de detección proporcional al módulo del campo, la información de fase no es accesible.

Una implementación experimental que es capaz de evitar estos problemas y ofrecernos información acerca de la fase del campo es *FROG*. Básicamente es un sistema de autocorrelación temporal resuelto espectralmente que permite observar cómo varían las componentes espectrales del pulso a lo largo del tiempo.

Existen múltiples implementaciones de este concepto, dependiendo del fenómeno de interacción no-lineal (segundo armónico, tercer armónico,...), siendo la que hemos elegido Polarization Gate-FROG, *PG-FROG*, en adelante *FROG*. Esta ha sido elegida debido a que no presenta ambigüedades en la dirección del tiempo cómo si ocurre con *SHG-FROG*. La configuración experimental se muestra en la Figura 3.13.

PG-FROG utiliza como interacción no-lineal el efecto de puerta óptica *Kerr*. Cómo vemos en la Figura 3.13 el pulso es dividido en dos mediante el divisor de haz de la entrada, obteniendo el pulso de excitación o puerta y el pulso de muestreo. El pulso de muestreo viaja a través de dos polarizadores cruzados, actuando el primero como polarizador y el segundo como analizador. El segundo pulso viaja a través de una lámina retardadora $\lambda/2$ de forma que se fuerza un desfase de polarización de 45° respecto al pulso de muestreo. Los dos pulsos son enfocados y solapados espacialmente en un medio con respuesta no-lineal intensa. En nuestro caso se ha utilizado una lámina de SF57 (*Schott*) de $\approx 100\mu m$.

El pulso de puerta genera una birrefringencia inducida en la lámina de SF57 por efecto *Kerr*³⁹ electrónico. Cómo resultado, la lámina de SF-57 actúa como lámina retardadora variable cuyo desfase depende de la intensidad del pulso de excitación. La combinación de polarizador-analizador que atraviesa el pulso de muestreo hace que, en ausencia de dicha birrefringencia inducida, el pulso sea rechazado en el analizador. La rotación de polarización inducida por la puerta Kerr permite a una porción del pulso de muestreo atravesar el analizador y ser detectada en un espectrómetro. Mediante la traslación de la linea de retardo, a través de la que viaja el pulso puerta, se hace un barrido temporal que nos permite obtener el registro espectral en función del tiempo de la interacción entre ambos pulsos. Esto constituye la traza de *FROG*. La intensidad

³⁹Kerr Polarization Gating

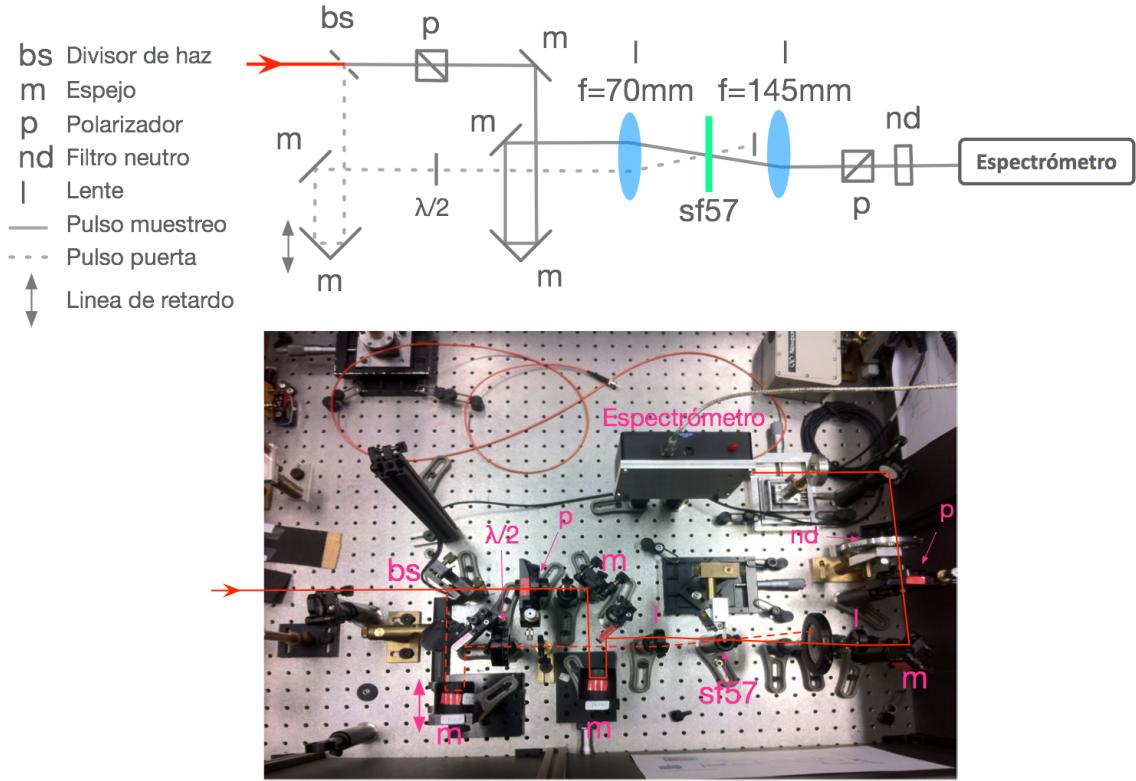


Figura 3.13: Representación esquemática de *PG-FROG* e implementación experimental. El pulso de entrada es dividido en el de muestreo, que viaja a través de un par polarizador-analizador hasta el espectrómetro, y el de puerta, dotado de un retraso ajustable, que genera el efecto puerta *Kerr* que permite medir el pulso de muestreo.

de señal registrada corresponde a

$$I_{PG-FROG}(w, \tau) = \left| \int_{-\infty}^{\infty} E(t) - |E(t - \tau)|^2 e^{-iwt} dt \right| \quad (3.5)$$

Las trazas de *PG-FROG* ofrecen una representación intuitiva y directa de lo que sucede en el pulso, reflejando con precisión la evolución de las componentes espectrales a lo largo del tiempo. Diferentes trazas de *PG-FROG* típicas se muestran en la Figura 3.14.

Se muestran las trazas correspondientes al pulso gausiano más corto posible para un espectro determinado (fase plana), denominado pulso por transformada, así como a pulsos con trino de diferente signo.

Una vez obtenida la traza de *FROG* del pulso es necesario aplicar algoritmos de recuperación de fase. Estos se encargan de la deconvolución de la señal para obtener,

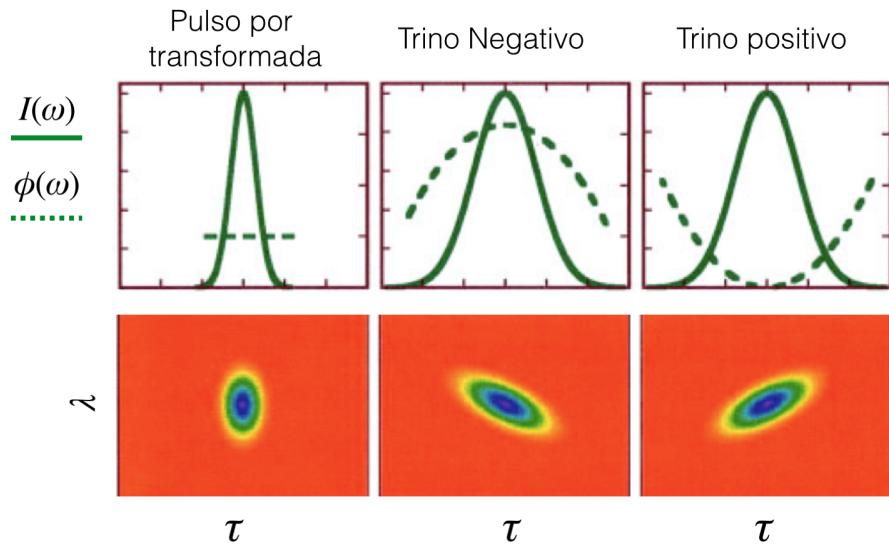


Figura 3.14: Trazas de FROG típicas. De izquierda a derecha de un pulso por transformada, pulso con trino negativo y pulso con trino positivo [2].

sin ambigüedades, la caracterización completa del pulso, obteniendo su amplitud y fase, tanto espectral como temporal.

Capítulo 4

Soluciones propuestas

4.1. Introducción

Hemos visto cómo para modificar la estructura temporal de nuestros pulsos utilizamos el filtrado de Fourier en el espacio de frecuencias mediante modulación de fase, así como el soporte experimental utilizado para su implementación y medición, pero ¿Cómo trabajamos con la fase? y ¿cómo encontramos la mejor fase para optimizar el efecto a estudiar?

Estas dos preguntas son el eje fundamental de este capítulo, en el que trataremos:

- El espacio de control: La manipulación de la fase se realizará mediante el SLM que nos proporciona 320 puntos de control. Veremos cómo se trabaja con ellos.
- La optimización: Una vez establecidos los parámetros bajo los que se va a manipular la fase se pasará a la fase de optimización. En esta se realiza la búsqueda y determinación de la fase adecuada para optimizar el efecto deseado.

A lo largo del capítulo veremos cómo se ha realizado una reducción de dimensionalidad sobre el espacio de control para hacer el problema más accesible, intentando no perder capacidad de manipulación temporal de la energía del pulso. ¿Exploramos en el tiempo o en la frecuencia?, ¿codificamos con fases o con tensiones? Hay ciertas decisiones que se han de tomar, explicaremos cuáles y por qué las hemos tomado.

En el terreno de la optimización se verá cómo funcionan los algoritmos de optimización utilizados, tema central de esta tesis. Se utilizarán dos algoritmos evolutivos: algoritmos genéticos (*AG*) y *differential evolution (DE)*, así como un algoritmo con una filosofía de funcionamiento completamente diferente: es de tipo determinista. Se ha desarrollado específicamente teniendo en cuenta ciertas características topológicas esperadas del espacio de soluciones. Puede ser una alternativa real y eficiente al enfoque evolutivo tradicional, al menos en un grupo de problemas que posean dicha topología. Si bien existen métodos teóricos para estudiar las propiedades de convergencia de un algoritmo, sólo su aplicación práctica sobre un número suficiente de problemas nos puede ofrecer una perspectiva de su comportamiento. En el capítulo 5 veremos el comportamiento de los algoritmos en experimentos reales.

4.2. Modelo del espacio de control

4.2.1. Capacidad de control sobre la fase

Nuestro espacio de control está constituido por 320 elementos independientes de control de fase, pixeles en el *SLM*, cada uno de ellos con un rango de modificación de fase de hasta 16 radianes. Esta excursión de fase es una limitación seria a la hora de conformar pulsos. Para poder alcanzar valores superiores a estos 16 rad de fase sobre

el espectro hemos de trabajar con la fase enrollada, con lo que cada pixel manejará un rango de fases $[0-2\pi]$.

El valor de la tensión de control de fase aplicable está cuantificado por un controlador de 12 bits (4096 niveles). Debido a que la zona en la que el desfase inducido es superior a 2π no se utiliza, el rango de uso se restringe al intervalo 150-4095. Esta es una reducción mínima en el espacio ya que seguimos necesitando 12 bits para cuantificarlo.

cómo vimos en la Figura 3.10, página 39, la relación tensión aplicada-fase proporcionada, no es lineal. Este hecho condiciona la controlabilidad de la fase. En el cuadro 4.1 se muestra el número de puntos de control correspondientes a los cuadrantes del plano polar. cómo puede verse existen niveles de cuantificación muy diferentes en cada cuadrante. Esto representa un serio problema de precisión a la hora de imprimir la fase y es insalvable⁴⁰, ya que está determinado por el comportamiento del cristal liquido. Disponemos de una resolución de 4.5×10^{-4} rad (0.026°) en el primer cuadrante, 5.2×10^{-3} rad (0.29°) en el segundo, 1.9×10^{-2} rad (1.1°) en el tercero y 3.4×10^{-2} rad (2°) en el cuarto.

Cuadrante	Ptos de control	resolución(rad/grados)
$1^\circ, 0-\pi/2$	3500	$4.5 \times 10^{-4}/2.57 \times 10^{-2}$
$2^\circ, \pi/2-\pi$	300	$5.2 \times 10^{-3}/0.29$
$3^\circ, \pi-3\pi/2$	80	$1.9 \times 10^{-2}/1.125$
$4^\circ, 3\pi/2-2\pi$	45	$3.4 \times 10^{-2}/2$

Cuadro 4.1: Número de puntos de control de fase por cada cuadrante

A estos errores debidos a la granularidad en el control de la fase hemos de añadir los errores asociados a la utilización de una sola curva de calibración. Tendremos una respuesta ligeramente diferente en cada una de las longitudes de onda manipuladas. Por tanto, el error que introducimos va a depender tanto del pixel (frecuencia) en el que estamos trabajando como de la fase introducida. Por ejemplo, al introducir la fase mínima aplicable (fig.3.12), el valor de offset introducido puede hacer variar la fase hasta 0.7rad (40°) dependiendo de la longitud de onda. En la zona cercana a 2π , debido a la elevada pendiente de la curva fase-tensión, este error es considerablemente mayor.

Se ha determinado asumir que estos errores, tanto los derivados de la dependencia de la longitud de onda, como los de la cuantificación de las fases, formen parte del problema. En consecuencia hemos optado por trabajar con una sola de las curvas de

⁴⁰Una variación experimental que contribuiría a mejorar esta limitación sería la utilización de una configuración de pulse shaper en doble paso, de esta forma la sección de fases sobre la curva estaría limitada a $[0-\pi]$, disponiendo de una mejora sustancial en el control con tres veces mas resolución en el cuarto cuadrante que es el que mas problemas presenta en este aspecto.

fase-tensión, utilizando la curva correspondiente a la λ central de nuestro espectro, 799nm.

4.2.2. Espacio de manipulación de parámetros

Los algoritmos trabajan con abstracción de los datos y pueden realizar la exploración tanto en el espacio de tensiones como en el de fase espectral. Hemos optado por trabajar con valores de fase, realizando una traslación a tensiones mediante la curva de calibración. De esta forma manipulamos directamente sobre el espacio de control (espacio de fases) y las operaciones necesarias, como el enrollado de la fase, se simplifican notablemente. Una ventaja añadida de trabajar con la fase es la posibilidad de incorporar con facilidad diferentes dispositivos de control⁴¹ o incluir las curvas de *fase-tensión* adecuadas para cada longitud de onda.

4.2.3. Elección del espacio de búsqueda

Una última decisión que ha de tomarse es en qué espacio que va a realizar la búsqueda. Disponemos de dos espacios recíprocos, frecuencia y tiempo. Ya que estamos optimizando una interacción no-lineal dependiente de $E(t)$, puede parecer interesante trabajar directamente sobre la forma temporal del pulso. Dos han sido las principales razones que nos han hecho descartar esta aproximación:

- cómo se ha visto los problemas de granularidad en el control de la fase y la dependencia de la longitud de onda generan limitaciones en la precisión de ajuste de fase y errores a la hora de imprimir la fase requerida. Para poder explorar adecuadamente en el tiempo sería necesaria una caracterización exhaustiva del sistema.
- Resulta conveniente trabajar directamente en el espacio de control , y no de forma indirecta, cómo sería hacerlo a través del tiempo. La posible acumulación errores en el proceso de conversión y aplicación supondría una dificultad extra en la localización del óptimo en el espacio de búsqueda.

Por lo tanto, se decidió realizar la búsqueda directamente sobre el espacio de fases.

4.2.4. Codificación de la fase

La dimensionalidad del espacio de control es un elemento que condiciona la velocidad y, por lo tanto, la eficiencia de la optimización. Hemos de intentar evitar que

⁴¹La abstracción de cómo se implementa esa fase dependerá de cada dispositivo y será independiente de la implementación del algoritmo de búsqueda

los tiempos de optimización se conviertan en inabordables en el mundo experimental, así que el primer paso a realizar es una reducción de la dimensionalidad del problema en la forma $S^{nPixels} \rightarrow S^D$. Mediante una relación de transformación podemos representar los 320 píxeles con D variables de control, siendo $D < 320$. Por supuesto, esta reducción no es gratuita, al realizar una transformación entre los dos espacios estamos introduciendo una segmentación artificial sobre el espacio original de búsqueda, que va a limitar nuestra capacidad de control temporal. Es conveniente utilizar una segmentación versátil y no agresiva.

La solución mas ampliamente adoptada para reducir la dimensionalidad del problema es la utilización de una modelización donde la fase es representada mediante un número reducido de términos de una serie (*Taylor, Legendre, Chebyshev,....*) [22], pero este tipo de representación tiene varios problemas asociados que nos han hecho descartarla, entre los que destacamos:

- Determinadas series presentan problemas. Por citar un ejemplo las series polinómicas sufren del fenómeno de Runge [58], que surge cuando usamos interpolación polinómica de alto grado para aproximar funciones de cierta complejidad. El resultado es que al incrementar el grado del polinomio para conseguir un mejor ajuste nos podemos encontrar con que aumentamos el error de la aproximación.
- La elección de la cantidad de términos de la serie y de la serie en sí, limita seriamente las soluciones que son accesibles en el problema [22]. Esta segmentación del espacio de soluciones, que no es exclusiva del uso de series, se traduce en una limitación de las conformaciones de fase expresables y, por lo tanto, de las formas temporales que puede generar el sistema.
- Ese tipo de implementación nos obliga a trabajar con la fase desenrollada y posteriormente enrollarla para imprimirla en el sistema. Ello obligaría a una caracterización exhaustiva de los problemas los derivados de las limitaciones intrínsecas del sistema experimental que se han mostrado en el apartado 3.3.3.

Es por ello por lo que se ha optado por trabajar directamente mediante una codificación **pixel a pixel**. Cada una de las nuevas D dimensiones actúan como un nodo de control sobre la fase, compuesta por nPixels⁴², aplicando un procedimiento de interpolación entre ellos. De esta forma podemos tener el máximo control posible de la fase, $D = nPixels$, o utilizar $D < nPixels$. El segundo motivo para la elección de esta codificación es el algoritmo desarrollado, *MODS*. Dicho algoritmo tiene entre sus fundamentos la hipótesis de que estos puntos de control están fuertemente acoplados en el tiempo y que pueden ser sometidos a optimización marginal. Veremos el funcionamiento de *MODS* en detalle en el apartado 4.5.

⁴²En nuestro caso los 320 píxeles de que dispone el *SLM*

Se utilizará una distribución equiespaciada de D nodos a lo largo del espacio de control. La utilización de una densidad variable en el posicionamiento de los nodos de control podría presentar ventajas, por ejemplo, la estructura de fase en la zona espectralmente mas energética suele tener mas riqueza y podría requerir un mayor número de nodos para poder definirla. Este punto no se ha explorado en el desarrollo de esta tesis, constituyendo una linea futura a explorar.

La fase Φ_w esta representada, por lo tanto, por un conjunto de D puntos de control que constituyen los parámetros sujetos a optimización

$$\Phi_w = (\phi_i) \quad i = 1, \dots, D \quad (4.1)$$

Cuando $D = nPixels$ se obtiene el máximo control posible disponible y la aplicación sobre el SLM es directa. Si $D < nPixelSLM$, hemos de realizar una relación de transformación

$$\Phi_{SLM} = TR(\Phi_w) \quad (4.2)$$

$$\Phi_{SLM} = (\Phi_p) \quad p = 1, \dots, nPixels; \quad (4.3)$$

Esta transformación será realizada mediante una interpolación de los valores de fase de los D puntos de control sobre el plano polar.

4.2.5. Interpolación de puntos de control de la fase

La fase Φ_w , es representada por D parámetros que constituyen los nodos de control de ajuste de la fase a imprimir sobre el espectro ϕ_{SLM} . Esta reducción de dimensionalidad, $D < nPixels$, implica que los valores de los píxeles intermedios entre nodos han de ser interpolados, existiendo principalmente dos posibles opciones:

1. Extensión del un nodo. Los nodos intermedios toman el mismo valor que el nodo mas cercano, de esta forma la fase toma valores discretos.
2. Interpolación de valores. Los nodos intermedios toman valores interpolados de forma continua entre nodos.

La primera opción discretiza los valores de fase generando saltos bruscos. Tal y como hemos visto en el Capítulo 3.3.3, los saltos bruscos de fase entre pixeles adyacentes introducen una modulación de amplitud en el pulso. En la práctica se traduce en modificaciones de la señal medida no relacionadas con la estructura temporal del pulso. Si bien este ruido de modulación puede ser admisible para las optimización mediante algoritmos evolutivos, *MODS*, el algoritmo desarrollado, utiliza información de las características topológicas del espacio de soluciones y esta modulación de amplitud

introduciría distorsiones topológicas que podrían dificultar su evolución satisfactoria. Por lo tanto hemos adoptado la interpolación continua entre los D nodos de control.

La interpolación se realiza en el plano polar. Cada uno de los D parámetros puede adoptar un valor que oscila entre $\pm\pi$ respecto a sus nodos adyacentes. Si bien se contempló la posibilidad de usar una interpolación suave, vía *spline* por ejemplo, el hecho de trabajar directamente con la fase enrollada implica aplicar saltos bruscos de fase, como veremos enseguida, por lo que es mejor opción trabajar con interpolación lineal. Los valores adoptados por los puntos intermedios de interpolación se muestran en la Figura 4.1. Supongamos que queremos interpolar los valores de fase entre un nodo con fase ϕ_{ini} y otro con fase ϕ_{fin} , con n_{int} puntos de interpolación entre ellas,

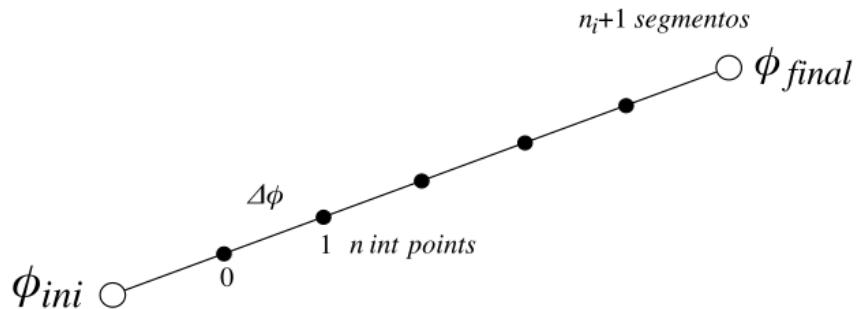


Figura 4.1: Puntos de interpolación entre dos nodos adyacentes. Al ser $D < nPixels$ hemos de estimar el valor de fase que deben adoptar los píxeles entre los D parámetros

El incremento de fase, Δ_ϕ en cada uno de los puntos de interpolación tomara el valor

$$\Delta_\phi = \left[e^{j \frac{\phi_{ini}}{\phi_{fin}}} \right]^{\frac{1}{n_{ptosInterp} + 1}} \quad (4.4)$$

y cada uno de los puntos interpolados será

$$\phi_n = e^{j\phi_{ini}(\Delta_\phi)^{n-1}}, n = 1, \dots, n_{ptosInterpolados} \quad (4.5)$$

Por supuesto, esta opción no está carente de problemas. El principal es que el enrollado de fase puede producir una discontinuidad en la forma temporal del pulso al explorar los valores de fase de un nodo. Para ilustrar este fenómeno en la Figura 4.2 se ha representado una fase, compuesta por 25 nodos sobre una envolvente espectral arbitraria (izquierda), en la que se varia la posición relativa de los nodos centrales. Las diferentes posiciones de los nodos dan lugar a una conformación temporal determinada (derecha). En la figura los nodos están representados por puntos rojos con la interpolación lineal entre ellos mostrada por una línea amarilla. La fase impuesta

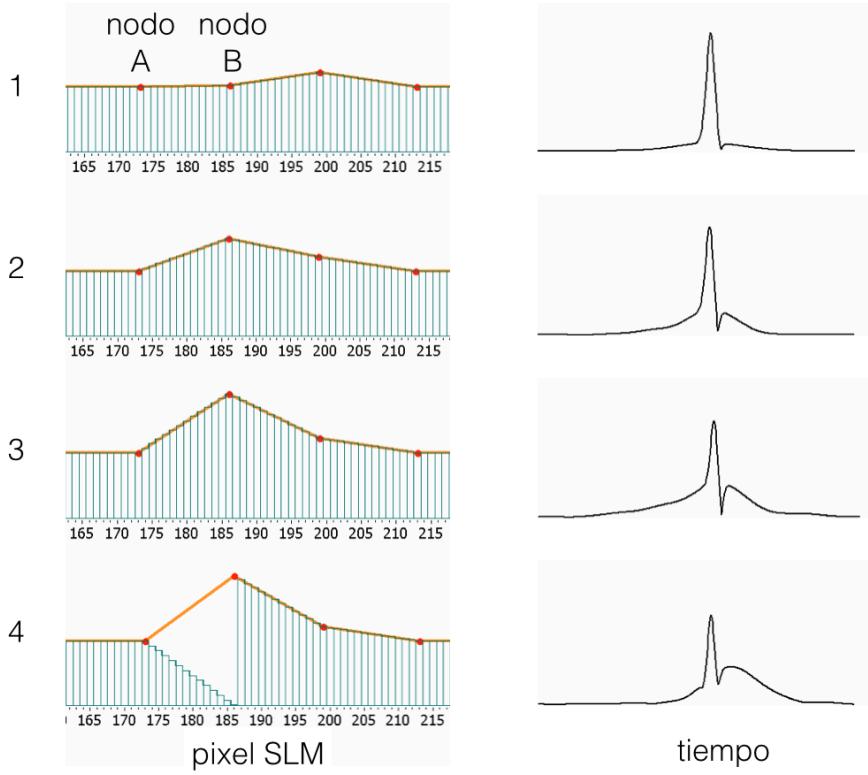


Figura 4.2: Exploración de la posición de un nodo. La forma temporal resultante presenta una transición continua con la exploración de la fase (1,2,3). Cuando la diferencia de fase entre dos nodos consecutivos es $> 2\pi$ (4) se genera el enrollado de fases, provocando una discontinuidad de la transición de formas temporales.

sobre el *SLM*, correspondiente a la interpolación en el plano complejo, se muestra como barras verdes. En fig4.2.1 a 3 la distancia existente entre el *nodo a* y el *nodo b* es $< 2\pi$, bajo estas circunstancias (y para esta configuración de fase) la fase sobre el *SLM* coincide con la interpolación lineal. Se puede apreciar como la forma temporal asociada tiene continuidad con la distancia entre nodos. En la fig4.2.4 la distancia entre los nodos es $> 2\pi$, esto provoca el enrollado de fase, y se puede apreciar como hay un cambio brusco en la forma temporal. Este cambio temporal será mas o menos acusado dependiendo de la configuración de fases total, y tendrá como consecuencia una variación brusca entre los valores de evaluación experimental entre valores de fase próximos entre si, generando una discontinuidad en el espacio de soluciones.

4.2.6. Limitaciones por el número de nodos utilizados

El hecho de utilizar una reducción de dimensionalidad mediante la modelización por nodos, si bien consideramos que es la representación que introduce menos segmentación artificial sobre el espacio de soluciones, no está carente de limitaciones.

El número de puntos utilizados va a limitar la complejidad estructural que pueda adoptar la fase. Si D es demasiado bajo puede que no podamos representar fielmente la fase necesaria. Por otro lado, el teorema de Parseval establece dado un $E(t)$ cuya transformada de Fourier es $\tilde{E}(w)$, la integral de $|\tilde{E}(t)|^2$ es igual a la integral de $|\tilde{E}(w)|^2$. Esto es, la cantidad de energía en ambos dominios es la misma. En nuestro problema esto implica que el número de nodos de control utilizados determina cuales son los paquetes de energía temporal que podrá manejar cada nodo, la precisión que pueden alcanzar los ajustes temporales. Excepto en el caso del primer y último nodo cada uno de ellos va a manejar la energía asociada a $n\text{Pixels}/D - 1$ pixeles, ya que cada nodo maneja las fases comprendidas entre el y los nodos adyacentes, tal y como vemos en la Figura 4.8, página 75. La energía asociada a cada nodo dependerá de la proyección espectral sobre el modulador de fase.

Un número bajo de nodos nos presenta un posible submuestreo de la fase, pero por otro lado nos brinda mayor manejo de energía por nodo. O lo que es lo mismo, a mayor número de nodos utilizados, mejor sensibilidad y menor ruido debe tener nuestro sistema experimental, para poder detectar las contribuciones temporales de cada nodo. Esto es especialmente relevante en el caso de *MODS* ya que realiza optimización marginal sobre los nodos, en la que habrá que detectar la contribución individual de cada nodo sobre la interacción no-lineal a observación.

4.2.7. Multimodalidad intrínseca

Mas allá de otras consideraciones y problemas experimentales, el hecho de trabajar con modulación de fase implica multimodalidad. Diversas configuraciones de fase nos ofrecen la misma respuesta temporal y ,por lo tanto, el mismo resultado experimental. Podemos constatar de entrada que sobre la forma temporal del pulso existen dos fuentes de multimodalidad:

- Orden 0: Cualquier constante añadida a la fase mantiene la forma temporal del pulso.
- Orden 1: Cualquier cambio lineal en la fase mantiene la forma temporal del pulso, pero lo desplaza en el tiempo.

En principio esto no debe suponer un inconveniente en el proceso de optimización. La multiplicidad de existencia de buenas soluciones, de hecho, facilita la búsqueda,

pero puede dificultar la interpretación física de los resultados. Por su naturaleza, los algoritmos con base estocástica pueden acabar en cualquier punto del espacio de control con equivalencia temporal. El algoritmo desarrollado, *MODS*, es de naturaleza determinista, por lo que presenta la ventaja de ofrecer siempre la misma respuesta ante las mismas condiciones, sujeta a variaciones externas a el funcionamiento del mismo, cómo puede ser la presencia de ruido. En la práctica veremos cómo, por restricciones experimentales, esta multimodalidad no se cumple necesariamente, tal y como se muestra en el capítulo 5.1.2, donde se vera que ante la multimodalidad de orden 0 la conformación temporal se conserva, pero no lo hace la energía del pulso.

4.3. Algoritmo Genético

Los Algoritmos Genéticos (*AG*) fueron los primeros algoritmos de optimización aplicados en la optimización de la interacción láser-materia mediante conformación temporal de pulsos, demostrando la viabilidad de utilizar un sistema adaptativo para controlar la excitación de moléculas [10]. Junto con las estrategias evolutivas son los algoritmos mas utilizados en este tipo de problemas, pudiendo encontrar aplicaciones en propagación de pulsos en fibras ópticas [24], compresión de pulsos [25], alineación molecular [59] o control coherente [60] entre otros. Dada la amplia bibliografía y el extendido uso de este tipo de algoritmos evolutivos, mostraremos la base de su funcionamiento, remitiendo al lector a la literatura existente para mas detallada [61] [62].

Los (*AG*) fueron desarrollados en la década de los 70 por John Holland [63] y fueron resultado de sus investigaciones orientadas a explicar el proceso adaptativo de los sistemas naturales y el diseño de un sistema artificial que contuviera el mecanismo de la selección natural. Se desarrollo un algoritmo que tiene como modelo de funcionamiento la selección natural Darwiniana, es decir, la recombinación de genes a través de la reproducción sexual y la supervivencia de los individuos mejor adaptados. Se han demostrado adecuados para la resolución de un amplio espectro de problemas, siendo especialmente adecuados en la resoluciones de problemas no-lineales donde el espacio de soluciones es lo suficientemente extenso para que otros algoritmos de búsqueda exhaustiva resulten, en la práctica, inviables.

Entre sus características podemos destacar:

1. Los *AG* trabajan con una codificación de los parámetros de búsqueda, no con los parámetros en si mismos. Este punto ha sido eliminado en algunas versiones mas modernas, donde se trabaja con los parámetros en coordenadas naturales.
2. No suelen presentar una velocidad de convergencia elevada. Su evolución depende exclusivamente de los mecanismos de mutación y recombinación de soluciones.

3. Presentan un buen comportamiento en un amplio espectro de problemas.
4. Son complejos de ajustar ya que hay que ajustar en cada problema un número elevado de parámetros en el algoritmo.

La implementación de este algoritmo es una adaptación del software proporcionado por *Jenoptik*, fabricante del *SLM*

4.3.1. Funcionamiento general

La estructura de funcionamiento de un *AG* se muestra en la Figura 4.3. Una vez inicializada la población se realiza su evaluación, en la que se estima la salud de los individuos (soluciones) que la componen. Si se ha alcanzado el criterio de convergencia la optimización ha terminado. Si no es así, se realizan las operaciones de mutación, cruce y reproducción de los individuos para conformar la siguiente población, que ha de volver a ser evaluada. El proceso se repite hasta cumplir el criterio de convergencia.

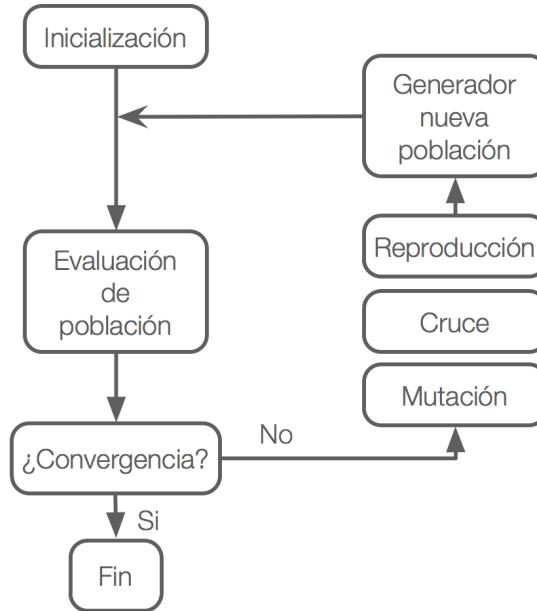


Figura 4.3: Esquema general de funcionamiento de un algoritmos genético.

La población de soluciones en la generación $g, P_{\Phi,g}$ está compuesta por Np individuos

$$P_{\Phi,g} = (\Phi_i, g), i = 1, \dots, Np \quad (4.6)$$

donde cada uno de los individuos es una posible solución y estará compuesto por los D parámetros que representan la fase

$$\Phi_{i,g} = (\phi_{j,i,g}), j = 1, \dots, D_{\text{nodos}} \quad (4.7)$$

Es posible trabajar directamente con estos parámetros, y aplicar sobre ellos los mecanismos de mutación y recombinación. En esta tesis se ha utilizado la implementación clásica, en la que cada uno de los parámetros estará codificado mediante k bits.

$$\phi_{j,i,g} = \phi_{p,j,i,g} \quad p = 1, \dots, k \quad (4.8)$$

Cada uno de los individuos $\Phi_{i,g}$ que componen la población estará, por tanto, compuesto por una cadena de bits, 1's y 0's, de longitud $D*k$ denominada genotipo. La expresión cómo parámetros en coordenadas del sistema de esta cadena es su fenotipo. Durante la evolución de la población no se trabaja directamente con los parámetros, sino con la representación de la misma mediante esta cadena binaria. Aunque en la práctica muchos de los mecanismos de mutación utilizados y el procedimiento de cruce se efectúa a nivel de parámetro

En primer lugar se realiza una medición de la salud de los individuos, $S(\Phi_i)$, mediante su evaluación sobre el problema. Para la evolución entre una generación, $P_{\Phi,g}$, y la siguiente, $P_{\Phi,g+1}$, se utilizan los procesos de **selección, cruce y mutación**. La evolución de la población exclusivamente mediante los mecanismos de mutación aleatoria y cruce aleatorio, junto con la codificación mediante bits de la solución, son las características que distinguen a los *AGs* de las Estrategias evolutivas.

Selección

En primer lugar, la población es sometida al proceso de **selección**, en el que los individuos que van a combinarse (reproducirse) para dar lugar a la generación $g + 1$ son elegidos. Existen múltiples variantes a la hora de realizar la selección, en nuestro caso los criterios utilizados son:

- *Elitismo*: Un número determinado de los individuos con mejor *salud* formaran parte de la siguiente generación sin someterse a la reproducción. Este es el único esquema que garantiza la convergencia del algoritmo [64].
- *Selección proporcional a la salud de los individuos*: Para el resto de soluciones ($N_p - \text{elite}$) que formaran la generación $g + 1$ hay que seleccionar a sus padres, se utilizan dos individuos de la generación g para generar un individuo en la generación $g + 1$. Los individuos con mejor salud tienen mayor probabilidad de ser seleccionados para la reproducción, pero no la certeza de ser elegidos. La probabilidad de selección de un individuo, $p(\Phi_i)$, será

$$p(\Phi_i) = \frac{S(\Phi_i)}{\sum_{j=1}^{N_p} S(\Phi_j)} \quad (4.9)$$

Cruce

Una vez determinados los individuos que va a reproducirse, el operador de **cruce** es el encargado de combinar sus genes. En este proceso se intercambian segmentos de genes entre los *padres*, de forma análoga a cómo se realiza en la naturaleza. Se utilizan dos puntos de cruce escogidos al azar con probabilidad uniforme. El cruce se realiza a nivel de parámetro, combinando los segmentos entre los individuos mediante una máscara de combinación creada con una cierta probabilidad de cruce pc .

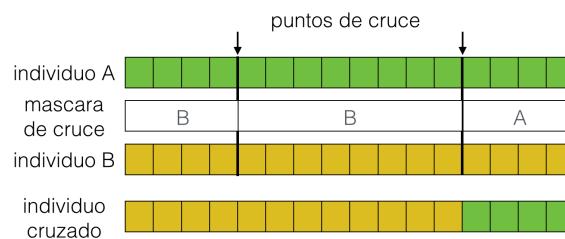


Figura 4.4: Operación de cruce a nivel de parámetro entre dos individuos A y B. Utilizando dos puntos de cruce y una máscara de cruce se selecciona de qué parente va a heredar el hijo los parámetros

Mutación

Si sólo utilizásemos el cruce entre individuos, el espacio de exploración estaría determinado exclusivamente por la combinatoria en base a la población inicial. Una vez obtenidos los miembros constituyentes de la generación $g+1$, la **mutación** proporciona a los individuos generados la variabilidad necesaria para una correcta exploración del espacio de soluciones, siendo aplicada a los individuos que no provienen de la selección de élite.

Cada uno de los individuos generados será mutado con una determinada probabilidad de mutación, pm . En este caso se utilizan 7 operadores de mutación diferentes que se selecciona con probabilidad uniforme sobre los individuos que conforman una generación:

1. Variación gausiana a nivel de parámetro: Cada uno de los parámetros sufre una variación en torno a si mismos con una distribución gausiana de desviación standard aleatoria
2. Se realiza un suavizado del individuo mediante un promediado con una copia de si mismo que ha sufrido una rotación con longitud de un parámetro.
3. Adición o sustracción de un *offset* con valor 1, se aplica con probabilidad uniforme a nivel de parámetro.
4. Copia de parámetros a sus vecinos, aplicada con probabilidad uniforme.

5. *Bit-flip.* Cambio de 1 por 0 y viceversa se aplica a nivel de bit con probabilidad uniforme.
6. Rotación de longitud aleatoria. Se aplica a nivel de parámetro.
7. Espejo. Se generan individuos simétricos con elección aleatoria del segmento que da lugar a la simetría (se divide en dos y se reflejan los valores de una de los segmentos).

4.4. Differential Evolution

Las estrategias evolutivas (*EES*) presentan un buen desarrollo en este tipo de problemas. Podemos encontrarlas aplicadas a problemas como la optimización de generación de segundo armónico [3], alineación molecular [27] o la compresión de pulsos [65], ejemplos en los que se utilizan las estrategias *Covariance Matrix Adaptation* (*CMA-ES*) y *Derandomized Adaptation* (*DR2*). El número de evaluaciones necesarias para la convergencia en los ejemplos citados se cifran en miles. Nuestro objetivo último es poder aplicar la conformación adaptativa de pulsos sobre experimentos con recursos limitados (p.e. superficie de muestra), por lo que estos tiempos de convergencia son inviables.

En la búsqueda de un algoritmo que ofreciera mejores tiempos de convergencia optamos por la aplicación de una estrategia alternativa, Differential Evolution (*DE*) [66]. Se ha mostrado mas eficiente que otros tipos de algoritmos evolutivos [67] [31] y se decidió evaluarlo como algoritmo alternativo de optimización.

Differential Evolution es un método de optimización global sobre espacios continuos diseñado para cumplir los requerimientos:

1. Habilidad para manejar funciones de costo no diferenciable, no-lineales y multimodales. *DE* es un método estocástico de búsqueda directo, así que puede ser aplicado en entornos donde la búsqueda se hace en un experimento real y no sólo en una simulación
2. *DE* es paralelizable, lo cual le permite trabajar con funciones de coste de alto requerimiento computacional. como hemos visto en nuestro caso esto no supone una ventaja añadida, dado que nuestro sistema experimental no es paralelizable.
3. Facilidad de sintonización, al disponer de pocos parámetro de control, robustos y de fácil elección. *DE* utiliza la información de su propia población para explorar el espacio de búsqueda. Este esquema de auto-organización se realiza tomando el vector diferencia de dos vectores escogidos al azar en su población para perturbar a otro vector existente. Todos los elementos de la población son perturbados.

Esta es una diferencia importante frente a las *EES* donde las perturbaciones están predeterminadas por una probabilidad de perturbación

4. Posee buenas propiedades de convergencia. Presenta una velocidad de convergencia consistente al mínimo global en diferentes lanzamientos.

4.4.1. Funcionamiento general

*DE*⁴³ utiliza dos poblaciones de individuos-vectores (soluciones), ambas con un tamaño de N_p individuos (soluciones), que permanece constante durante toda la optimización de los D parámetros.

Nuestra población generacional será

$$P_{\mathbf{x},g} = (\mathbf{X}_{i,g}), i = 1, \dots, N_p, g = 1, \dots, g_{max} \quad (4.10)$$

compuesta de individuos :

$$\mathbf{X}_{i,g} = (x_{j,i,g}) = (\phi_{j,i,g}), j = 1, \dots, D_{nodos} \quad (4.11)$$

siendo g el índice de la generación a la que pertenece la población, i el índice del individuo dentro de la población y j el parámetro dentro de la población.

En la primera población, $P_{\mathbf{x},1}$ la inicialización de los individuos es abordada mediante un muestreo aleatorio en el espacio sujeto a optimización. La población debe cubrir todo el espacio de soluciones con una probabilidad uniforme. En nuestro caso cada $(\phi_{j,i,g})$ adoptará valores $\in [0, 2\pi]$, aunque en caso de tener soluciones preliminares se podría generar una población como desviaciones sobre esa solución aproximada inicial.

Mutación

En cada generación se obtiene una población $P_{\mathbf{v},x}$ de prueba intermedia de N_p vectores mutados $\mathbf{v}_{i,g}$

$$P_{\mathbf{v},g} = (\mathbf{V}_{i,g}), i = 1, \dots, N_p, g = 0, 1, \dots, g_{max} \quad (4.12)$$

Siendo cada individuo:

$$\mathbf{V}_{i,g} = (v_{j,i,g}) = (\phi_{j,i,g}), j = 1, \dots, D_{nodos} \quad (4.13)$$

Estos vectores mutados $\mathbf{v}_{i,g}$ se generan mediante las operaciones de mutación y cruce de individuos y son los encargados de explorar el espacio.

⁴³Descripción basada en *Differential Evolution, A Practical Approach to Global Optimization* [68]

En la operación de **Mutación** cada uno de los individuos se genera mediante la mutación diferencial que añade un vector diferencia de dos vectores escalados por un factor F a un tercer vector para formar el vector mutado $\mathbf{v}_{i,g}$

$$\mathbf{v}_{i,g} = \mathbf{x}_{r0,g} + F(\mathbf{x}_{r1,g} - \mathbf{x}_{r2,g}) \quad (4.14)$$

El factor de escala $F \in (0, 1)$ es un entero real positivo. Si bien no existe un límite superior, su valor óptimo no suele ser mayor a 1. Los índices de los vectores involucrados en la mutación $r_1, r_2, r_3 \in [0..N_p]$ son escogidos aleatoriamente con probabilidad uniforme para cada una de las mutaciones, con la única condición de $r_n \neq i, r_1 \neq r_2 \neq r_3$. Al vector $\mathbf{x}_{r0,g}$ se le denomina donor o vector base y a $F(\mathbf{x}_{r1,g} - \mathbf{x}_{r2,g})$ perturbación. El factor de ponderación F nos proporciona el tamaño del paso de búsqueda σ , que gracias a los vectores diferencia será dinámico. En la Figura 4.5 tenemos una descripción visual de este proceso, en el que vemos los vectores diferencia posibles sobre una población de 9 individuos. Estos vectores diferencia poseen una distribución que se escala por el factor F . Una de estas diferencias escaladas se añade al donor para formar el individuo mutado.

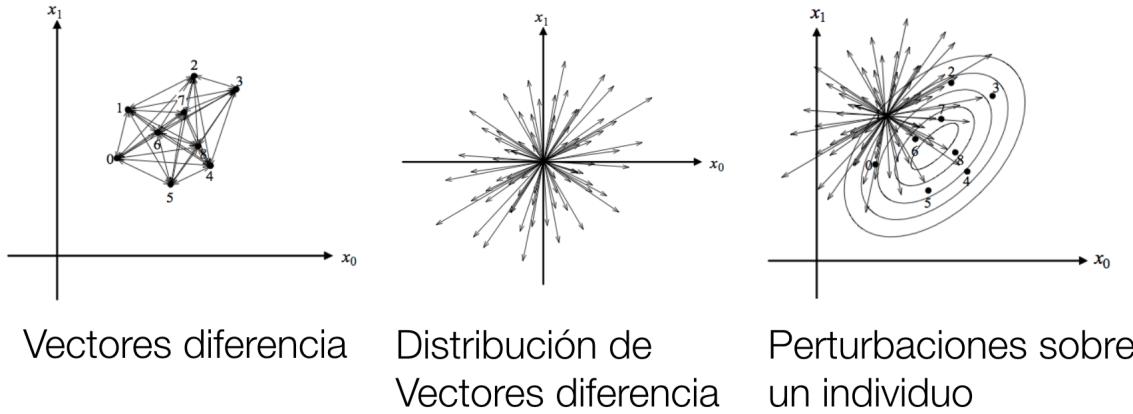


Figura 4.5: Vectores diferencia posibles sobre una población de 9 individuos. Estos conforman las perturbaciones posibles aplicables a cada individuo, ponderadas por el factor F

Cruce

La estrategia de mutación diferencial se complementa con la aplicación de un operador de **cruce** uniforme, comúnmente denominado recombinación discreta, en la que se genera la población de prueba, $P_{u,g}$ utilizando las poblaciones mutada $P_{v,g}$ y original $P_{x,g}$,

$$P_{\mathbf{u},g} = (\mathbf{U}_{i,g}), i = 1, \dots, Np, g = 0, 1, \dots, g_{max} \quad (4.15)$$

donde cada individuo de prueba tiene la forma:

$$\mathbf{U}_{i,g} = (u_{j,i,g}) , j = 1, \dots, D_{nodos} \quad (4.16)$$

y es formado siguiendo la regla

$$\mathbf{U}_{i,g} = u_{j,i,g} = \begin{cases} v_{j,i,g} & \text{si } (\text{rand}_j(0, 1) \leq C \text{ o } j = j_{rand}) \\ x_{j,i,g} & \text{en cualquier otro caso} \end{cases} \quad (4.17)$$

siendo $C \in [0, 1]$ la probabilidad de cruce, que controla qué fracción de los vectores es copiado del elemento mutado, y que es constante a lo largo de todo el proceso. $j_{rand} \in [1, D]$ nos asegura que al menos uno de los componentes del vector es alterado y asegura una diversidad mínima en la población de prueba $P_{u,g}$.

Cruce

Finalmente se produce el proceso de selección, en el que cada uno de los vectores de prueba que componen $P_{u,g}$ se enfrentan a los de la generación actual, $P_{x,g}$, para conformar la siguiente generación, $P_{x,g+1}$, siguiendo el siguiente esquema

$$\mathbf{x}_{i,g+1} = \begin{cases} \mathbf{u}_{i,g} & \text{si } f(\mathbf{u}_{i,g}) \leq f(\mathbf{x}_{i,g}) \\ \mathbf{x}_{i,g} & \text{en cualquier otro caso} \end{cases} \quad (4.18)$$

siendo $f(\mathbf{u}_{i,g})$ y $f(\mathbf{x}_{i,g})$ las evaluaciones de función de costo de los individuos.

El proceso de mutación, cruce y selección se repite indefinidamente hasta que la condición de detención se cumple.

4.4.2. Variantes usadas

Con el fin de acelerar el proceso de optimización hemos empleado dos variantes que mejoran el rendimiento de *DE* sobre nuestro problema. La primera de ellas realiza una mejora sobre la población inicial, la segunda acelera la convergencia en búsquedas locales.

4.4.2.a. Opposite Based Learning

Opposite Based Learning es un método de inicialización de población que mejora la selección de individuos en la generación 0 y que se ha mostrado eficaz en la aplicación de *DE* sobre compresión de pulsos, en láseres amplificados basados en fibra [26], con un sintetizador de pulsos previo a la etapa de amplificación. Su funcionamiento consiste en generar una población inicial aleatoria y su opuesta, o complementaria, dentro de nuestros límites de búsqueda. A partir de estas dos poblaciones se realiza una evaluación seleccionando a los mejores individuos para conformar la población

inicial. De esta forma se trata de mejorar el punto de partida en la búsqueda. Dada una población inicial

$$P_{\mathbf{x},0} = (\mathbf{X}_{i,0}), i = 0, 1, \dots, Np - 1, g = 0, 1, \dots, g_{max} \quad (4.19)$$

compuesta de individuos :

$$\mathbf{X}_{i,0} = (x_{j,i,0}), j = 0, 1, \dots, D_{nodos} - 1 \quad (4.20)$$

con parámetros j seleccionados en el intervalo $I \in [0, 2\pi]$ generamos

$$Pop_{\mathbf{x},0} = (\mathbf{Xopp}_{i,0}), i = 0, 1, \dots, Np - 1, g = 0, 1, \dots, g_{max} \quad (4.21)$$

compuesta de individuos :

$$\mathbf{Xopp}_{i,0} = (xopp_{j,i,0}) = 0 + 2\pi - x_{j,i,0}, j = 0, 1, \dots, D_{nodos} - 1 \quad (4.22)$$

Generamos la población inicial escogiendo los mejores individuos de ambas poblaciones

$$\mathbf{x}_{i,0} = \begin{cases} \mathbf{Xopp}_{i,0} & \text{si } f(\mathbf{Xopp}_{i,0}) \leq f(\mathbf{x}_{i,0}) \\ \mathbf{x}_{i,0} & \text{en cualquier otro caso} \end{cases} \quad (4.23)$$

4.4.2.b. Operador de mutación trigonométrico

Hemos implementado un operador de mutación trigonométrico [69] que mejora la velocidad de convergencia del algoritmo en problemas de optimización local. Lo hemos usado ya que las características del espacio de soluciones, que se verán en la descripción del algoritmo propuesto, apartado 4.5, indican que estamos ante un problema optimización local. En simulaciones (no mostradas) se incrementa la velocidad de convergencia en al menos un factor 3. En este tipo de mutación, al igual que en la implementación estándar, se hace uso de tres vectores, $\mathbf{x}_{r0,g}$, $\mathbf{x}_{r1,g}$, $\mathbf{x}_{r2,g}$.

El donor es el centro del hipertriángulo formado por los tres vectores seleccionados para formar parte de la mutación, la perturbación final es la suma ponderada de los tres vectores diferenciales.

$$\mathbf{v}_{i,g} = \frac{\mathbf{x}_{r1,g} + \mathbf{x}_{r2,g} + \mathbf{x}_{r3,g}}{3} + (p2 - p1)(\mathbf{x}_{r1,g} - \mathbf{x}_{r2,g}) + (p3 - p2)(\mathbf{x}_{r2,g} - \mathbf{x}_{r3,g}) + (p1 + p3)(\mathbf{x}_{r3,g} - \mathbf{x}_{r1,g}) \quad (4.24)$$

donde

$$p1 = \frac{|f(\mathbf{x}_{r1,g})|}{p'} \quad (4.25)$$

$$p2 = \frac{|f(\mathbf{x}_{r2,g})|}{p'} \quad (4.26)$$

$$p3 = \frac{|f(\mathbf{x}_{r3,g})|}{p'} \quad (4.27)$$

$$p' = |f(\mathbf{x}_{r1,g})| + |f(\mathbf{x}_{r2,g})| + |f(\mathbf{x}_{r3,g})| \quad (4.28)$$

$$r_n \neq i, r_1 \neq r_2 \neq r_3 \quad (4.29)$$

Aplicamos esta mutación con una probabilidad trigonométrica $pt = 0,05$ frente a la mutación normal para evitar la hiperconvergencia⁴⁴ mejorando la velocidad frente al esquema normal.

4.5. Algoritmo propuesto: *MODS*

Uno de los objetivos que nos planteamos al iniciar esta tesis era la exploración de los Algoritmos Evolutivos para poder realizar el ajuste de fase necesario para alcanzar ciertos efectos físicos. Si bien los Algoritmos Evolutivos muestran un buen comportamiento sobre este tipo de problemas [70] [20] [27], alcanzando soluciones de una gran calidad, adolecen de un problema fundamental: son relativamente lentos, necesitando miles de evaluaciones para lograr la convergencia. En los casos en los que el recurso a optimizar es costoso, en algún sentido del término, disminuir nuestra ventana de consumo de recursos es imperativo. Teniendo en cuenta esta restricción, hemos buscado una alternativa que nos permita realizar una rápida optimización de la fase. El resultado de esta búsqueda es un algoritmo de optimización, al que hemos denominado *Multiple One-Dimensional Search (MODS)*, que presenta un excelente balance entre tiempo de optimización requerido y resultado obtenido.

4.5.0.c. Comprensión intuitiva de *MODS*

Con el objetivo de facilitar la comprensión del funcionamiento del algoritmo, nos permitimos dar una breve explicación sobre cómo llegamos a desarrollar *MODS*. Su origen se basa esencialmente en dos ideas.

La primera proviene del análisis hecho por Ofer Shir de unos de los considerados problemas estándar en este tipo de optimización, la generación de segundo armónico (*SHG*). En su artículo *The second Harmonic Generation Case-Study as a Gateway*

⁴⁴Convergencia prematura a un mínimo, esto hace que la probabilidad estar situados en un mínimo local sea alta.

for ES to Quantum Control Problems [3] se analiza en profundidad el problema de la optimización de SHG.

En esta explicación basta decir que la señal de SHG es un proceso no-lineal de segundo orden en el cual la señal medible está definida por

$$shg \propto \int_0^{\infty} |E(t))|^4 dt \quad (4.30)$$

La señal medida constituye una medida fiable de la compresión temporal de pulso⁴⁵. Cuanto menor es su duración temporal, mayor será el valor de la integral. Si trabajamos con pulsos gausianos, el valor de duración mas corto posible alcanzable es el asociado al denominado pulso por transformada *FTL*⁴⁶, pulso que podemos obtener con una fase plana ($\phi_n = 0$). En este caso todas las componentes espectrales están en fase y su extensión temporal es, por lo tanto, mínima.

Para hacer una estimación de la complejidad del problema de maximizar la SHG en sistemas de conformación de pulsos mediante control de fase, Shir y coautores realizan una serie de simulaciones con el objetivo de evaluar la complejidad matemática de problema. El resultado se muestra en la gráfica 4.6.

En la misma se muestra la curva de mérito obtenida partiendo de un pulso gauiano y una fase controlada por 100 puntos inicializada en valores aleatorios $[0., 2\pi)$, donde los valores de los puntos de control de fase se van colocando, individualmente, a 0 rad , hasta conformar un pulso por transformada. Esto se realiza de tres formas diferentes, indexando de izquierda a derecha, de derecha a izquierda y aleatoriamente sin repetición. Cada una de ellas se realiza 100 veces y el resultado promedio es el mostrado en la Figura 4.6. Sus conclusiones les llevan a abordar el problema utilizando dos estrategias evolutivas, *Derandomized Evolution Strategies* (DES), en concreto **DR2** y **CMA-ES**⁴⁷. Las DES combinan la eficiencia de búsqueda de las estrategias evolutivas con el análisis estadístico para estimar la distribución espacial de la población y la posible evolución de la misma.

Podemos observar un hecho interesante en la evolución de estas curvas: *al ir situar cada uno de los valores de fase en el valor óptimo, el incremento de la señal es positivo, independientemente del orden que escogamos para poner dichos valores a cero*. Cada uno de los valores de fase tiene su propia contribución, separable y evaluable, sobre el valor óptimo: su contribución marginal. Este comportamiento, en si mismo, resulta interesante, pero no aporta demasiado a la resolución del problema. Nuestra incógnita es, precisamente, cual es ese valor óptimo en el que se debe situar las fases.

⁴⁵Veremos nuestros experimentos sobre compresión de pulsos en el capítulo 5.3.3, página 122

⁴⁶Fourier Transform Limited

⁴⁷DR2: utiliza información de primer orden $\mathcal{O}(n)$ CMA (Covarianze Matrix Adaptation), utiliza información de segundo orden $\mathcal{O}(n^2)$ en sus parámetros de optimización, siendo n la dimensión del espacio de búsqueda

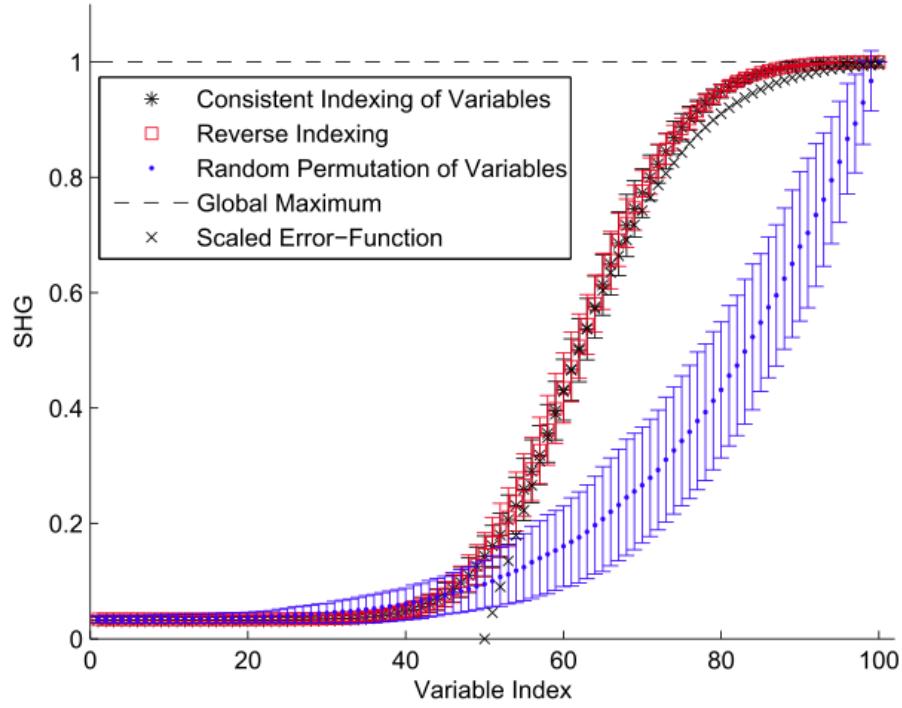


Figura 4.6: Efecto del ajuste marginal de las fases a 0 rad para conseguir un pulso por transformada y su efecto en la generación de segundo armónico [3]

El segundo pilar de nuestro algoritmo llegó más adelante y proviene del mundo de la femtoquímica. En *Why do effective quantum controls appear easy to find?* [71], Herschel Rabitz⁴⁸ y Tak-San Ho se preguntan porque es aparentemente *tan sencillo* encontrar soluciones a los problemas de control cuántico de procesos y hacen un análisis del espacio de control cuántico (QCL⁴⁹) en términos del campo de control $E(t)$.

Se pregunta por qué se encuentran, con relativa facilidad, buenas soluciones utilizando conformación de pulsos con control adaptativo en bucle cerrado en la optimización de compresión temporal de pulsos, generación de armónicos o manipulación de excitación electrónica. A priori un problema con alta dimensionalidad en el espacio de control sobre efectos que presentan nolinealidades deberían ofrecer extrema complejidad, máxime dadas las características restrictivas que posee el campo de control,

⁴⁸uno de los padres de la femtoquímica, ha trabajado en el control de dinámicas cuánticas mediante pulsos ultracortos conformados, introduce el concepto de Quantum Control Landscapes en el que nos basamos

⁴⁹*Quantum Control Landscape*

cómo estar situado en una frecuencia central determinada con un ancho de banda limitado. Sus conclusiones son sorprendentes a la hora de entender nuestro problema. En resumen, y bajo la premisa de disponer de suficiente control sobre $E(t)$, concluyen que en el *QCL*:

- No hay falsos sub-óptimos en el espacio de soluciones⁵⁰, todos sus mínimos son mínimos globales.
- Los puntos críticos del espacio de soluciones son puntos de silla
- Los espacios de soluciones son de pendientes suaves y su extremo (óptimo) es plano.
- Debería haber cierto grado de robustez frente al ruido.

Estas conclusiones topológicas son establecidas sobre probabilidades de transición entre estados cuánticos, lo que implica sistemas realmente *pequeños*, conjuntos de átomos o moléculas principalmente. De ser aplicables a la escala en la que se realizan nuestros experimentos nos ofrecen un escenario ideal. Nos encontraríamos ante un gradiente perfecto, en el que todos los mínimos son mínimos globales y que son accesibles desde cualquier punto del espacio de soluciones. Siempre y cuando el control del que disponemos sobre $E(t)$ sea suficiente.

El pulso $E(t)$ en si mismo posee ciertas restricciones, como su ancho de banda que lo restringe a una duración mínima de ≈ 100 fs, y nuestra capacidad de control espectral también posee limitaciones, como que cada píxel controla un paquete de longitudes de onda, o la carencia de modulación de amplitud. Asimismo nuestra capacidad de control se ve mermada por el uso de la parametrización por nodos. A pesar de ello veremos cómo tenemos control suficiente, y que podemos utilizar esas premisas topológicas en la búsqueda, tal y como se mostrará en la sección de resultados experimentales.

En cualquier caso, el armazón sobre el que construimos nuestro algoritmo es:

- Cada uno de los parámetros de control tiene una contribución marginal evaluable en la solución.
- La topología del espacio de soluciones nos predice que dentro de esa contribución marginal existirán múltiples óptimos que son globales.
- Existe un gradiente monotónico en el espacio de soluciones

⁵⁰Landscape

Basandonos en estos puntos aplicamos el paradigma de *divide y vencerás*: Optimizamos de forma marginal cada una de los nodos que conforman la fase, buscando su óptimo, sabiendo que cualquiera que encontremos será válido y, ademas, la función evaluada⁵¹ es monotóna.

Veamos ahora una descripción un poco mas formal.

4.5.1. Bases formales de *MODS*

MODS está basado en tres asunciones fundamentales sobre las condiciones de contorno del problema:

1. Cada uno de los parámetros de nuestro espacio de control puede ser ajustado de forma marginal.(*condición suave*)
2. No existen mínimos locales en el landscape.(*condición dura*)
3. Existen infinitos mínimos globales en el landscape.(*condición dura*)

La primera condición se deriva la relación tiempo-frecuencia que nos ofrece la transformada de Fourier, que, expresada en su forma discreta nos dice

$$\mathbf{X}_\omega = \sum_{t=0}^{N-1} x_t e^{-i2\pi\omega t/N} \quad (4.31)$$

$$x_t = \frac{1}{N} \sum_{\omega=0}^{N-1} \mathbf{X}_\omega e^{-i2\pi\omega t/N} \quad (4.32)$$

en la que se verifica cómo cada una de las componentes temporales de nuestro pulso es una suma lineal de sus componentes espectrales. Las condiciones 2 y 3 las consideramos *duras* ya que suponen una asunción muy fuerte sobre la topología del espacio de soluciones. Se derivan de los estudios relativos al *QCL* realizados principalmente por Herschel Rabitz en sus estudios sobre *Quantum Control Theory* (*QCT*) y su aplicación a *Quantum Control Experiments* (*QCE*) [72][71] [73]. Para sintetizar las características topológicas esperadas, estos dos corolarios extraídos de la Tesis de Ofer M. Shir, *Niching in Derandomized Evolution Strategies and its Applications in Quantum Control* [74], consideramos que contienen la información relevante:

- **Corolario 6.1.2** *Quantum Control landscapes have extrema that correspond to perfect control or to no-control. Furthermore, given a controllable quantum system, there is always a trap-free pathway up to the top of the control landscape from any location, allowing the location of the global maximum with first-order (gradient) information.*

⁵¹La evaluación del fenómeno no-lineal a optimizar

- **Corolario 6.1.3** *A general controllable Quantum Control problem has a rich landscape with an infinite number of optimal solutions, corresponding to perfect control. Climbing-up to the top of the landscape reveals control level-sets at every yield value, with manifolds which can be explored with continuous trajectories.*

La posibilidad de realizar el ajuste marginal de los D parámetros supone una reducción mas en la dimensionalidad sobre el espacio de búsqueda. La presunción teórica de existencia de un sólo óptimo local accesible mediante un camino continuo y sin cambios de signo en el gradiente es una característica topológica extremadamente útil. Ademas el espacio de búsqueda es circular, los valores que puede adoptar cada una de los nodos de control, están acotados en el rango $[0, 2\pi)$. Ahora el espacio de soluciones en el que realizamos la búsqueda se transforma en la forma $S^{nPixels} \rightarrow S^D \rightarrow DS$. De D parámetros a optimizar pasamos a D búsquedas individuales en las que el espacio de soluciones unidimensional es circular presentando un sólo óptimo. *MODS* esta diseñado para desenvolverse en ese espacio.

Existen elementos experimentales que nos alejan de este ideal, nuestro control sobre $E(t)$ es limitado, introducimos discontinuidades por la forma de tratar la fase, se producen modulaciones de amplitud que distorsionan el espacio de soluciones y tenemos un ruido en forma de variaciones aleatorias de energía y duración en nuestro pulso.

El funcionamiento general es similar al método de Hooke-Jeeves (*Pattern Search*), pero se diferencian en que *MODS* incorpora las contribuciones de cada parámetro.

4.5.2. Descripción del algoritmo

MODS utiliza una única solución en la que la fase, Φ_w compuesta por D parámetros, es utilizada como medio de exploración y como elemento de memoria

$$\Phi_w = (\phi_i) i = 1, \dots, D \quad (4.33)$$

En la optimización cada uno de los D nodos que conforman la fase es optimizado de forma marginal y su valor óptimo es retenido en el vector Φ_w , realizando el proceso para cada uno de los D nodos sin repetición. Al proceso de optimización de todos los nodos lo denominamos *Barrido*, B . La expresión algorítmica básica de *MODS* se presenta en el Algoritmo 1

Hablamos de optimización marginal y no de optimización independiente de los D nodos porque todos los elementos que conforman la fase se encuentran acoplados en la solución temporal. El efecto de la variación de un nodo es dependiente del valor del resto de la fase, encontrándose acoplados en el tiempo tal y como nos muestra la expresión 4.32.

Para completar la descripción del algoritmo 1 hay tres aspectos por definir:

Algoritmo 1 Secuencia básica de *MODS*

```

for  $b = 1$  to  $B$  do
    for cada D nodo do
        Obtener el valor de fase del nodo que optimice el observable
        Incorporar el valor de fase obtenida en  $\Phi_w$ 
    end for
end for

```

- ¿Cómo se realizan las búsquedas individuales?
- ¿Cómo se inicializa la fase?
- ¿Cómo se realiza el barrido de los nodos?

Se responderá a estas preguntas en los siguientes apartados.

4.5.2.a. Búsquedas individuales

Se ha logrado reducir el problema a su mínima expresión, una búsqueda unidimensional en la que usar un método de gradiente parece la opción natural. No obstante la estimación de gradiente en señales ruidosas no es trivial, las diferencias finitas no son fiables. En nuestro caso las oscilaciones de potencia y temporales del pulso laser son una barrera infranqueable desde el punto de vista experimental. Mediante una modificación interna del amplificador sería posible mejorar este ruido [42], pero está fuera de nuestro alcance. El mismo grupo de investigación⁵² nos muestra un ejemplo de aplicación de un seguidor de gradiente [23] sobre generación de segundo armónico, que consiguen mediante una novedosa determinación estadística de gradiente. En nuestro caso la estimación de gradiente queda descartada.

En nuestro sistema experimental las fuentes de fluctuación de la señal mas importantes son:

- El láser posee una fluctuación de energía pulso a pulso de $\approx 5\%$ ver Figura 5.2 , página 88. Al ser el objeto de la optimización efectos no-lineales, esta banda se incrementa notablemente.
- Como se puede observar en la Figura 5.2, el láser presenta también una fluctuación de energía a medio plazo de un 10-15 %.
- Determinados efectos a optimizar, como la absorción a dos fotones⁵³, presentan una respuesta probabilística.

⁵²Y me inclino a pensar que gracias a estas reducciones del ruido experiemtal

⁵³Capítulo 5.3

Ademas existen fuentes de distorsión de la topología del espacio de soluciones, esto es, variaciones del efecto no directamente relacionadas con la conformación temporal que impone la fase, que son especialmente críticas para *MODS*:

- Existen diversas fuentes de modulación de amplitud no deseadas, fenómenos difractivos en el *SLM* o la existencia de filtros de polarización no controlados en el camino del pulso. El espectro de salida del sintetizador de pulsos posee componentes verticales de polarización dependientes de la fase introducida, que se verán mas o menos atenuadas en estos filtros.
- El uso de una parametrización con nodos, unido al uso del enrollado de fases, genera discontinuidades en la transición de las formas temporales obtenidas.

Estas fluctuaciones en la señal y los efectos de la perturbación sobre el espacio se verán con detalle en el capítulo 5.1.3.

Dadas estas limitaciones se ha basado el procedimiento de optimización individual en el muestreo selectivo de valores de costo⁵⁴ para puntos de fase discretos con una comparación ordinal [75] de las muestras. Dada la asunción topológica, a partir del resultado del muestreo , se realiza una segmentación recurrente del espacio de búsqueda, para obtener una acotación del área de fase donde reside la mejor función de coste accesible.

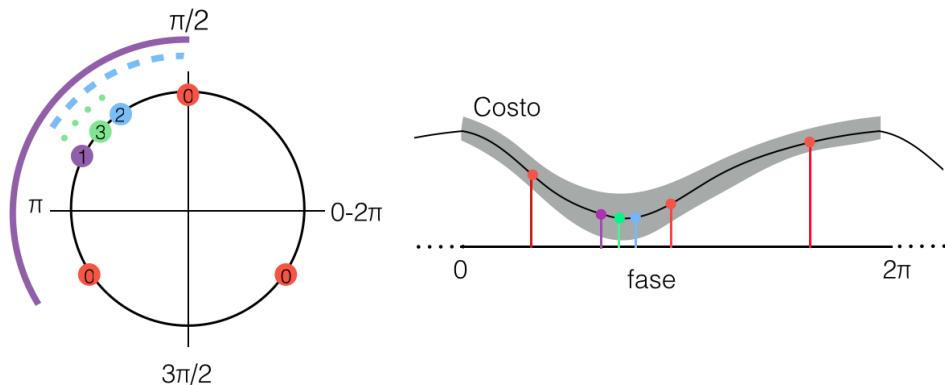


Figura 4.7: Secuencia de pasos en la optimización de un nodo. Representación en el plano de polar (izquierda) y cartesiana (derecha). En la representación cartesiana se muestra una posible curva de valores de costo, señalando en gris la zona de incertidumbre debida al ruido.

Se puede ver gráficamente el proceso de búsqueda en la Figura 4.7, en la que se muestra la misma búsqueda representada en el plano polar y en un plano cartesiano,

⁵⁴En la explicación se utilizará costo para referirnos al observable

en este último se dibuja una posible curva de costo que cumple con las características esperadas: es suave, continua, posee un solo mínimo y es circular. El área gris representa una posible incertidumbre en debida al ruido. La búsqueda comienza con un muestreo inicial uniforme a lo largo de todo el espacio, puntos rojos. Este primer muestreo trisecciona el espacio y nos permite elegir uno de los segmentos. Muestreos sucesivos nos permiten realizar bisecciones dentro de este segmento acotando el área de residencia del óptimo. De esta forma conseguimos la máxima separación posible entre los puntos de muestreo a lo largo de todo el espacio. Esto nos asegura el máximo contraste posible entre los valores adquiridos de costo y, por lo tanto, mejora nuestra detección frente a la banda de ruido.

Su expresión en pseudocódigo la vemos en el Algoritmo 2

Algoritmo 2 Estimación del valor del nodo ϕ_i

```

 $\sigma \leftarrow \frac{2\pi}{32^s}$ 
Las variables  $trial_{A,B,C}$  almacenan el valor de costo así como la fase asociada.
 $trial_A \leftarrow C[\Phi_w | \phi_i = \phi_i]$ 
 $trial_B \leftarrow C[\Phi_w | \phi_i = \phi_i + \sigma]$ 
 $trial_C \leftarrow C[\Phi_w | \phi_i = \phi_i - \sigma]$ 
for  $s = 1$  to  $S$  do
     $trial_A, trial_B \leftarrow dosMejoresResultados[A, B, C]$ 
     $\gamma = f[A, B]$                                  $\triangleright$  Obtenemos el ángulo de prueba siguiente
     $trial_C \leftarrow C[\Phi_w | \phi_i = \gamma]$ 
end for
 $\phi_i = mejor[trial_A, trial_B, trial_C]$ 

```

La realización de un muestreo selectivo con descarte de áreas nos permite acotar el área de búsqueda, sin la necesidad de una estimación de gradiente. De forma sistemática la búsqueda puede expresarse mediante los siguientes pasos

Paso 0: Muestreo inicial y determinación de segmento objetivo El proceso comienza tomando tres medidas equiespaciadas en los valores de fase posibles, siendo una de ellas la correspondiente al valor inicial del nodo, definiendo tres segmentos en el área de búsqueda. A partir del segundo nodo evaluado solo es necesario realizar dos medidas, la correspondiente a la posición inicial se hereda de la evaluación del nodo anterior. La distancia de salto, σ , estará determinada por el número de Barrido que estemos realizando, modificando el área de muestreo inicial que se utiliza en cada pasada, en nuestro caso hemos utilizado:

$$\sigma = \frac{2\pi}{3 \cdot 2^{B-1}} ; B = 1..nBarridos \quad (4.34)$$

que ajusta σ en el barrido $B + 1$ al tamaño del segmento en B .

Paso 1: Determinación del segmento objetivo A partir de los tres valores del muestreo inicial elegimos el segmento de fases donde se estima que reside el óptimo, seleccionando el contenido entre los dos mejores puntos de costo obtenidos. Este criterio puede parecer burdo. De hecho, lo es, pero la presunción de existencia de una función suave y, sobre todo, la baja fiabilidad del valor obtenido debido al ruido, no permiten aplicar estimadores más avanzados. Si bien este criterio no es universal, en simulaciones con ausencia de ruido se muestra efectivo.

Paso 2: Refinamiento de búsqueda Una vez seleccionado el segmento de búsqueda, tomamos una nueva muestra en su interior. Para determinar la fase de muestreo γ consideramos cada punto de prueba como un vector cuyo módulo es la medida adquirida, y su ángulo la fase utilizada. Estimamos γ a partir de la suma vectorial⁵⁵ de las dos medidas que lo acotan. De esta forma, el punto de búsqueda es estimado dinámicamente a partir de las ponderación de las muestras anteriores. Cada una de estas nuevas adquisiciones de costo las denominamos *Salto*, S . Una vez adquirido el valor de costo de este nuevo punto volvemos al paso uno, disponiendo nuevamente de tres puntos de decisión para la segmentación del espacio, reduciendo el área de búsqueda en cada S . Una vez realizados todos los S determinados el mejor valor de fase del nodo en evaluación se incorpora a Φ_w y se continua con siguiente nodo en el barrido de optimización.

Cada evaluación de nodos hereda un valor de la evaluación anterior que formará parte de la evaluación inicial (paso 0), por lo que en cada uno de los barridos se realizarán $(D(S+2) + 1)$ evaluaciones, pudiendo llegar a acotar el área de residencia de la fase óptima del nodo en un entorno de $2\pi/(3 \cdot 2^{B-1} \cdot 2^{S-1})$ radianes (suponiendo que *gamma* bisecte el segmento en el que se evalúa).

La heurística de selección de rango de existencia del óptimo puede hacer que el ajuste de fase sea erróneo en alguna ocasión. Incluso sin la presencia de ruido es un modelo de predicción que tiene fallos. Este error cometido en realidad no es demasiado perjudicial. Una de nuestras hipótesis de partida nos dice que la topología del espacio sigue comportándose igual sea cual sea el punto en el que nos encontramos. El error producido en el ajuste de un nodo puede afectar al valor final de la convergencia alcanzable, pero al utilizar búsqueda marginal, no compromete el proceso de optimización. De esta forma conseguimos mantener bajo el número de evaluaciones necesarias y tener un tiempo de optimización reducido.

Finalmente, el ajuste y posterior retención en Φ_w de cada uno de los ajustes individuales nos proporciona cierta ventaja frente al ruido debido a las fluctuaciones de energía del laser a medio plazo, ya que las referencias de comparación son temporalmente locales en el entorno de $S + 2$ evaluaciones.

⁵⁵Al efectuar esta operación debemos tener en cuenta si estamos trabajando con costo o mérito

4.5.2.b. Elección del punto de partida. Fase inicial

La elección del punto inicial de búsqueda es fundamental puesto que, en general, marca el entorno en el que se va a realizar la exploración. Esto puede ser especialmente crítico en el caso de *MODS*, en el que la búsqueda se realiza mediante variaciones sobre una única solución. Una de las características esperadas del espacio de soluciones que describen los estudios sobre el *QCL*[72] es que desde cualquier punto del espacio podemos acceder al óptimo, es decir, nuestro punto de partida no es tan relevante. Si bien en los experimentos computacionales realizados este hecho es aparentemente cierto, no ocurre exactamente así en la práctica. Creemos que el motivo es principalmente debido a la modulación de amplitud no deseada que se produce al manipular la fase, como veremos en el capítulo 5.1.3, página 96, sobre las restricciones experimentales. Hemos probado el comportamiento de *MODS* con dos tipos de inicialización de fase:

- **Plana** Todos los nodos poseen el mismo valor, $\Phi_w = cte$
- **Aleatoria** Inicializamos de forma aleatoria la fase, con acotación en la amplitud que pueden adoptar, es decir, generamos fases aleatorias restringidas entre a y b radianes, $\Phi_w = rnd[a, b]$

4.5.2.c. Tipo de Barrido

Una de las implicaciones de la posibilidad de aplicar optimización marginal es que el orden de optimización de las variables es permutable. La integración temporal de cada componente espectral asociada a un nodo no está sometida a jerarquías de orden, estando su contribución principalmente asociada a la energía espectral que maneja cada nodo. La Figura 4.8 nos muestra la relación espacial que existe entre nodos, pixeles en el SLM y energía espectral asociada. Se ha señalado en gris el área de influencia de uno de los nodos, como se puede apreciar cada nodo solapa su control de la fase con los adyacentes.

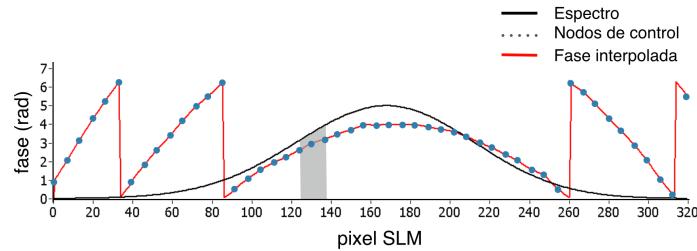


Figura 4.8: Relación espacial entre la amplitud espectral y los nodos de control de la fase. Se muestra una fase cuadrática enrollada.

Hemos explorado tres tipos de recorridos de ajuste de nodos:

- Secuencial: Optimizamos cada uno de los nodos de forma secuencial, de izquierda a derecha (azules a rojos).
- Aleatorio: La selección de los nodos a optimizar es aleatoria sin repetición
- En función de la energía espectral. Optimizamos los nodos desde el de mayor al de menor energía, es decir, desde el centro espectral hacia las colas, alternativamente a izquierda y derecha del nodo central.

En la Figura 4.9 podemos ver la evolución de la función de coste con los diferentes tipos de recorridos. Es un extracto de los datos que veremos en detalle en el capítulo 5.2, en el que el objeto de optimización es una forma de onda arbitraria. En la figura se muestra el resultado promedio (10 lanzamientos), de la evolución de coste durante un barrido (fig.4.9.a), partiendo desde una fase aleatoria, y utilizando los tres tipos de recorrido mencionados. Se ha añadido una representación esquemática del orden de evaluación de los nodos (fig.4.9.b).

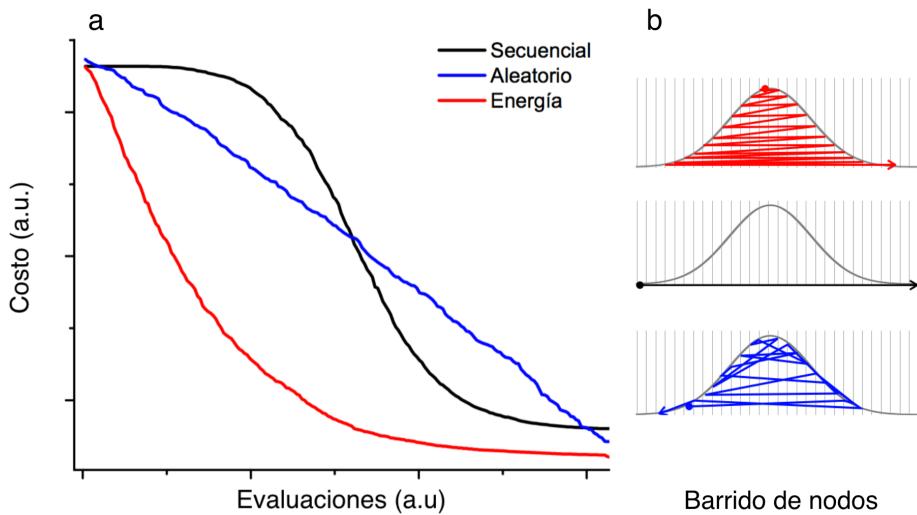


Figura 4.9: Curvas de convergencia típicas según el tipo de Barrido utilizado (a) y representación del recorrido de los nodos (b). El comportamiento depende de la energía asociada a cada nodo. En secuencial (negro) conforma una sigmoid, random (azul) se linealiza y por energía se maximiza la pendiente inicial (rojo).

La mejora de coste por nodo estará asociada a dos factores: Su posición sobre el espacio de soluciones y la energía espectral asociada a cada nodo. El primero determinará la pendiente por la que se puede mover la solución, el segundo cual será la excursión que podrá alcanzar. La contribución de la energía espectral con envolvente gaussiana se ve claramente reflejada en las curvas de los diferentes barridos. El recorrido

secuencial (negro) nos muestra una evolución sigmoidal, con una pendiente máxima en la zona central del recorrido, correspondiente al máximo espectral y pendiente cero al inicio y final de la optimización, correspondiente a las colas espectrales donde no hay energía espectral asociada. En el caso de optimización en función de la energía (curva roja) la curva reproduce el decaimiento exponencial asociado a la energía del espectro gausiano. Cuando el barrido se hace de forma aleatoria (curva azul) estas contribuciones energéticas se distribuyen uniformemente, de forma que se linealiza la curva de optimización.

Asimismo vemos cómo el resultado de la optimización no es el mismo según el recorrido utilizado. Nuestra hipótesis para explicarlo es que, a medida que nos acercamos al óptimo, el gradiente disminuye. Al mismo tiempo en las colas espectrales la energía disponible es mínima, por lo que resulta más efectivo empezar la optimización en la zona más energética del espectro, que nos ofrece mayor gradiente y disponemos de más energía para recorrerlo. Además, el problema del que provienen las curvas, generación de una forma arbitraria, posee mínimos locales ya que la conformación exacta mediante manipulación de fase no existe por regla general. La optimización por energía, en este caso, obtiene mejor resultado.

4.5.3. Algoritmo *MODS* completo

Uniendo las etapas de barrido y búsqueda por nodo obtenemos el pseudocódigo del proceso completo, mostrado en el Algoritmo 3. Por simplicidad se ha expresado utilizando recorrido secuencial de los nodos.

Los elementos que determinan su funcionamiento y el comportamiento asociado son:

- **Número de nodos, D .** Determina la resolución en el ajuste de la fase, y también la sensibilidad y relación señal/ruido (S/N) que necesitamos en nuestro sistema experimental. Un mayor número de nodos implicaría una menor energía asociada a cada nodo y por lo tanto el efecto de la exploración por nodo puede no ser detectado, o quedar por debajo de la banda de ruido.
- **Inicialización de la fase.** Determina el punto de partida de la búsqueda. Utilizaremos dos tipos de inicializaciones, fase plana (p), donde todos los nodos tienen el mismo valor inicial, o fase aleatoria (r) donde los nodos se inicializan con sus valores aleatorios acotados entre los límites $[a,b]$ radianes.
- **B , Barrido.** Determina el número de veces que se optimizan los D parámetros o nodos. La aproximación al óptimo es gradual, en cada barrido se logra un refinamiento de la búsqueda mediante una reevaluación de la posición de fase que determina cada nodo. Por regla general lograr una buena convergencia, o

Algoritmo 3 MODS, barrido secuencial

```

establecer vector de recorrido P
Las variables  $trial_{A,B,C}$  almacenan el valor de costo así como la fase asociada.
for  $b = 1$  to  $B$  do
     $\sigma \leftarrow \frac{2\pi}{3^{2b}}$ 
     $trial_A \leftarrow C[\phi_w]$                                  $\triangleright$  Evaluación inicial de la fase para trisección
    for  $n = 1$  to  $Dnodos$  do                          $\triangleright$  Optimización de cada nodo
         $trial_B \leftarrow C[\Phi_w | \phi_i = \phi_i + \sigma]$ 
         $trial_C \leftarrow C[\Phi_w | \phi_i = \phi_i - \sigma]$ 
        for  $s = 1$  to  $S$  do
             $A, B \leftarrow dosMejoresResultados [trial_A, trial_B, trial_C]$ 
             $\gamma = f[A, B]$                                  $\triangleright$  Obtención del ángulo de prueba siguiente
             $trial_C \leftarrow C[\Phi_w | \phi_i = \gamma]$ 
        end for
         $\phi_i, trial_a = mejor [trial_A, trial_B, trial_C]$ 
    end for
end for

```

un buen posicionamiento de la mayoría de los nodos no es viable en sólo 1 barrido. Esto es debido a que la capacidad de mejora por nodo depende de la conformación global de la fase tanto como de la posible contribución del propio nodo en evaluación.

- **Tipo de Barrido.** Establece el orden en el que se realiza la optimización de los D nodos. Su comportamiento respecto a la capacidad de convergencia en simulaciones es muy parecido. Disponemos de tres tipos diferentes: secuencial (s), por energía (e) y aleatorio (a).
- **S , Salto.** Saltos de fase que se realizan en la búsqueda del óptimo en cada D parámetro. Determina la resolución del ajuste de fase que conseguimos dentro de cada ajuste de nodo. Aún no estando expresado en el algoritmo 3, en la práctica se ha implementado la posibilidad de usar un S diferente para el primer Barrido que el que se usa en el resto.
- **σ , Step Size.** Determina el tamaño del rango inicial de exploración del valor de nodo para cada Barrido. El σ implementado trisecta el espacio uniformemente el el primer Barrido, en los siguientes se reduce el rango de exploración.
- **γ :** Punto de evaluación de refinamiento de búsqueda. Se determina automáticamente a partir de las dos mejores muestras anteriores.

El número de evaluaciones totales requerida en la optimización estará determinado por el número de barridos utilizados, el número de nodos a optimizar y el número de saltos de refinamiento utilizados, siendo (suponiendo un número de saltos igual en cada barrido)

$$\text{Evaluaciones Requeridas} = B(D(S + 2) + 1) \quad (4.35)$$

y el ajuste de fase alcanzado

$$\text{Ajuste de fase} = \frac{2\pi}{3 \cdot 2^{B-1} \cdot 2^{S-1}} \quad (4.36)$$

Por lo que tendremos un incremento lineal de los recursos (evaluaciones) requeridos en la optimización con el número de nodos utilizados, disminuyendo logarítmicamente el error de ajuste con el número de saltos. Este incremento lineal del esfuerzo con el número de variables es una clara ventaja frente al comportamiento típico de los algoritmos evolutivos.

A lo largo de los capítulos experimentales se hará referencia a la configuración utilizada en los lanzamientos de *MODS* utilizando una nomenclatura compacta que tendrá la forma *MODS/Nn/Fi/Tb/Nb-Sp-Ss*, donde:

- *Nn*: Número de nodos utilizados.
- *Fi*: Fase inicial de partida, podrá ser plana (*p*) o aleatoria (*a*), en cuyo caso se indicará la distribución aleatoria utilizada.
- *Tb*: Tipo de barrido, secuencial (*s*), por energía (*e*) y aleatorio (*a*).
- *Nb*: Número de barridos utilizados.
- *Sp*: Número de saltos utilizados durante el primer barrido.
- *Ss*: Número de saltos utilizados en barridos sucesivos.

Por ejemplo, *MODS/50/p/s/2-2-3* representa: *MODS* utilizando 50 nodos, partiendo de fase plana, con recorrido secuencial, dos barridos con dos saltos de búsqueda en el primero y 3 en el segundo.

En determinadas ocasiones no se respetará esta nomenclatura por mejorar la fluidez del texto.

4.5.4. Ilustración de funcionamiento

Para tener una visión de qué ocurre durante el proceso de optimización de la fase resulta revelador observar cómo se comporta la solución ensayada, $|E(t)|$, a lo largo de una optimización. El experimento que se analiza es una simulación de optimización de *SHG*. La señal de *SHG* es máxima para un pulso gausiano por transformada [76]. Se utiliza como valor de *mérito* el observable $\propto \int |E(t)|^4 dt$.

En la Figura 4.10 se muestra el esquema utilizado en la simulación. Las fases generadas por *MODS*, ϕ_{MODS} se añaden a un espectro gausiano con envolvente $A(\omega)$ que posee una fase $\phi_{residual}$. En la Figura 4.11 podemos ver $A(\omega)$ (negro) y $\phi_{residual}$ (gris). Esta fase residual cuadrática da lugar a un pulso temporalmente expandido. El objetivo de *MODS* es encontrar la fase que es necesario añadir⁵⁶ a la fase residual para maximizar el observable.

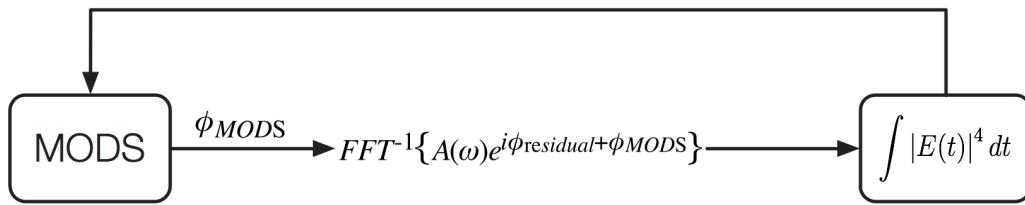


Figura 4.10: Simulación de la optimización de *SHG*. La fase generada por *MODS* se añade a un espectro gausiano que posee cierta fase residual, el objetivo de la optimización es obtener la fase que maximice el valor del observable $\propto \int |e(t)|^4 dt$

Se utiliza *MODS/100/p/s/2-3-2*, optimizando 100 parámetros de control, inicializando desde una fase plana, de forma secuencial, utilizando 2 barridos con tres saltos de ajuste en el primero (501 evaluaciones) y dos en el segundo (400 evaluaciones). El proceso total de optimización invierte 901 evaluaciones.

La solución de fase de conformación alcanzada por *MODS* se puede ver en la Figura 4.11 en rojo, además están representadas $A(\omega)$ (negro), $\phi_{residual}$ (gris) y la fase final resultante, $\phi_{residual} + \phi_{MODS}$ (azul). Si observamos la fase de conformación vemos que es igual a la fase residual del pulso, pero con curvatura contraria. Al trabajar sobre el rango $[0, 2\pi]$ radianes la fase obtenida está enrollada. En la Figura 4.11.b se ha realizado una ampliación para poder apreciar mejor los detalles. Se aprecian ligeros errores de ajuste en ciertos puntos; los contenidos en la zona más energética del espectro son consecuencia de errores cometidos en el modelo de predicción en la segmentación, aunque podrían corregirse al realizar un tercer Barrido de ajuste. En las colas espectrales el error es debido a la velocidad que alcanza la fase nativa: el número de nodos es insuficiente para poder representar los cambios de fase y aparece

⁵⁶Mediante el *SLM* solamente podemos añadir fase sobre el espectro

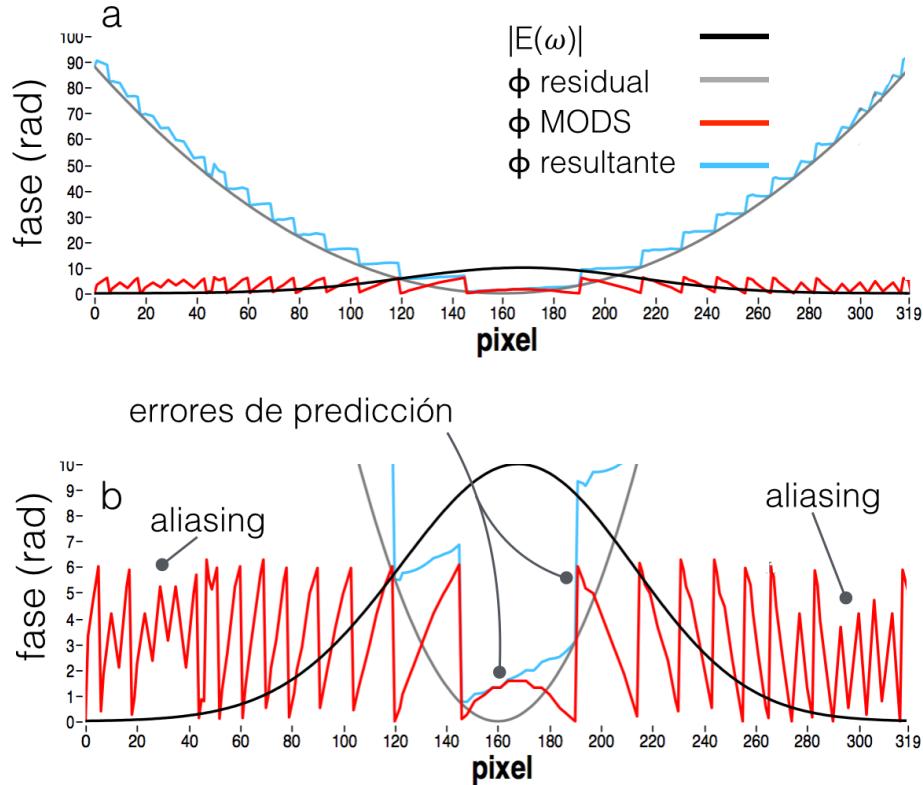


Figura 4.11: Fase obtenida (rojo) para compensar una fase residual cuadrática (gris) sobre un espectro gausiano (negro) y fase resultante (azul) utilizando 100 nodos de control. En los extremos espectrales, primeros y últimos píxeles, se producen errores debido a la poca energía disponible y al incremento de velocidad de la fase residual: se necesita una mayor densidad de nodos para ajustarla correctamente.

aliasing. Al principio del barrido (píxeles 0 al 40) el error es mayor que al final (píxeles 280-320), este comportamiento es debido a la poca energía disponible en ese área que es, precisamente, donde comienza la optimización.

Vemos tambien cómo la fase final está compuesta por segmentos de fase plana, con una cierta pendiente, segmentada en escalones de 2π radianes. Esto es equivalente a tener una fase plana con cierta pendiente. Proporciona un pulso por transformada, pero con un ligero desplazamiento temporal⁵⁷.

En la Figura 4.12.a podemos ver la evolución de $|E(t)|$ a lo largo de todos los ensayos realizados durante la optimización. Cada línea vertical de la imagen corresponde a una solución temporal ensayada. Se muestra tambien la curva de optimización de

⁵⁷Una de las multimodalidades del espacio de soluciones que vimos en el apartado 4.2.7, página 55

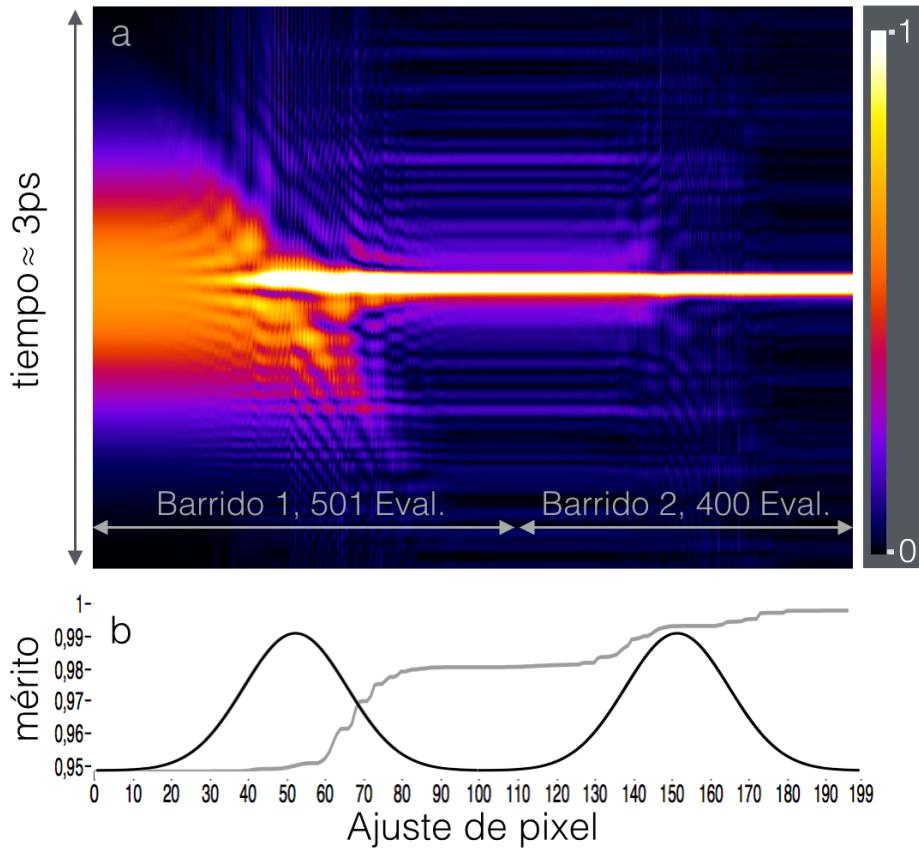


Figura 4.12: Compresión de un pulso expandido mediante la aplicación de una fase cuadrática. Evolución temporal las soluciones ensayadas por *MODS* durante la compresión (a) y evolución de la función de mérito durante dos Barridos de ajuste (b). La escala de color indica la intensidad del campo

mérito (fig.4.12.b) a la que se le ha superpuesto la curva de energía espectral para tener una visión cualitativa de la energía asociada a cada nodo. Vemos la evolución durante el ajuste de los 100 nodos durante los dos barridos realizados. El incremento de la función de mérito está directamente relacionada con la energía que maneja el nodo sujeto a ajuste, conformando una sigmoide. En el primer barrido esta sigmoide no aparece centrada sobre el espectro, ya que al principio del barrido nos encontramos en la cola de la gausiana, hay poca energía disponible, y estamos muy alejados del objetivo. Esto hace que la pendiente la sigmoide sea menos pronunciada. Cuando un número suficiente de valores de nodos se ajusta la convergencia se acelera. En el segundo ciclo este desequilibrio en las contribuciones ya no es tan acusado y parece estar mas relacionado directamente con la energía. Al mismo tiempo podemos ver (fig.4.12.a) cómo evoluciona la forma temporal, pasando de un pulso expandido al

principio del barrido a un pulso concentrado temporalmente. Se puede ver cómo al realizar la exploración de los valores de los nodos se está haciendo un batido de la energía temporal asociada al nodo, depositándola donde es mas adecuado para la compresión. Este efecto es mas notable donde hay mas energía espectral asociada.

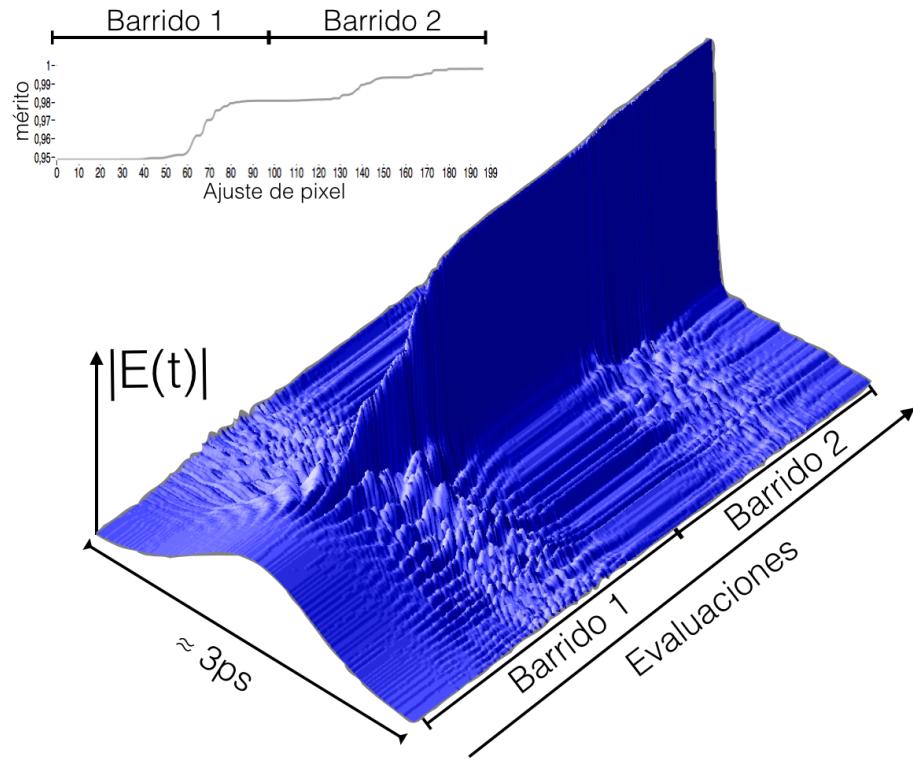


Figura 4.13: Evolución temporal de la solución ensayada por *MODS* en recorrido secuencial con fase inicial plana. Partiendo de un pulso ensanchado por una fase cuadrática, el algoritmo reubica temporalmente la energía espectral disponible. En la zona central del barrido es mas evidente la reubicación temporal de la energía. Se muestra una ventana temporal de $\approx 3ps$.

La evolución de la conformación temporal se aprecia con mas claridad en la Figura 4.13, donde hemos utilizado un mapa en 3D en vez de utilizar una escala de colores. Se muestra una ventana temporal de $\approx 3ps$ en la que vemos cómo se comienza con un pulso temporalmente ensanchado y se puede apreciar el efecto que tiene la exploración de fase: Estamos probando diferentes formas temporales, moviendo la cantidad de energía que puede manejar un nodo y ensayando su contribución, tantas veces como muestras se toman a lo largo de su ajuste. En las zonas espectralmente poco energéticas (principio y final de los Barridos) correspondiente a las colas espectrales,

vemos cómo este *batido de energía* no tiene prácticamente efecto sobre la forma temporal. A medida que nos acercamos a la zona central de la gaussiana espectral se puede ya apreciar cómo las variaciones producidas son mayores. Por lo tanto, el algoritmo puede tomar decisiones de mas peso sobre la posición de fase que cada nodo debe adoptar para depositar temporalmente la energía del pulso.

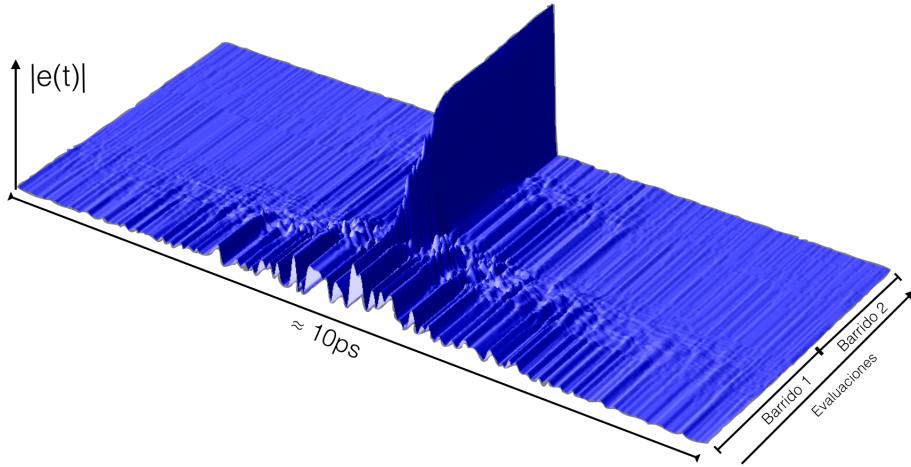


Figura 4.14: Evolución temporal de la solución ensayada por *MODS* en un recorrido secuencial con fase inicial aleatoria.

En la Figura 4.14 se muestra la evolución temporal de la solución ante el mismo problema, con la diferencia de que esta vez la fase de partida del algoritmo, ϕ_{MODS} , es una fase aleatoria uniforme en el rango $[0, 2\pi)$. Se ha ampliado el área de visualización temporal llevándolo hasta los $\approx 10ps$ para mejorar la visualización en la fase inicial. La utilización de una fase aleatoria genera una dispersión no uniforme de la energía del pulso a lo largo del tiempo. La fase cuadrática residual se aprecia ligeramente, como podemos ver al inicio del primer barrido. El proceso de optimización tiene el mismo comportamiento, a medida que se incrementa la energía disponible por nodo (centro de los barridos), la energía disponible es mayor y el ajuste realizado es más efectivo. En definitiva logramos desplazarnos desde el pulso original expandido hasta el pulso final por transformada, explorando la contribución que tiene cada paquete de energía, asociado a un determinado rango de longitudes de onda (que es el que maneja cada pixel del SLM) mediante una exploración discreta y determinista del espacio de soluciones.