



UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA
DE MADRID

CASO DE ESTUDIO 3

DESARROLLO Y MEJORA DE LOS SENsoRES DE MEDIDA DISTRIBUIDA BASADAS EN
REFLECTOMETRÍA ÓPTICA DE RETRODISPERSIÓN (OFDR-OBR).

MÁSTER UNIVERSITARIO EN SISTEMAS ESPACIALES

Autor: Andrés Pedraza Rodríguez

Profesor: Antonio Fernández López

MADRID, 1 DE JUNIO, 2022

 <https://github.com/temisAP/SHM>

Resumen

Este trabajo se plantea como una continuación del trabajo realizado en el Caso de Estudio 2 (véase [1]), donde se abordarán los siguientes conceptos:

- Análisis detallado de los datos mediante transformaciones y operaciones empleadas actualmente para el análisis de señales como la transformada de wavelet, la de chriplet, creación de espectrogramas, etc.
- Análisis más detallado del modelo actual para determinar los aspectos más relevantes y reducir así el volumen de datos empleados.
- Obtención de más datos de entrenamiento mediante la automatización del propio proceso de adquisición.



Índice

Índice de figuras	I
Índice de tablas	V
Nomenclaturas	VI
1. Introducción	1
1.1. Estructura de la fibra óptica	2
1.2. La rejilla de Bragg (FBG)	2
1.3. Refractometría óptica de retrodispersión (OBR)	4
2. Estado del arte	11
3. Metodología	12
3.1. Creación de sensores de fibra óptica	12
3.2. Optical Backscatter Reflectometry	13
3.3. Códigos y programación	13
4. Análisis de señal	14
4.1. Señales de ejemplo	15
4.2. Espectrograma	17
4.3. Extracción de características	27
4.3.1. Armónicos y percusivos	27
4.3.2. Características espectrales	30
4.4. Tempograma	37
4.5. Transformación Z-Chirp	39
5. Análisis del modelo de Inteligencia Artificial actual	41



6. Automatización del proceso de adquisición de muestras	45
6.1. Esquema eléctrico	46
6.2. Calibración del módulo de temperatura	47
6.3. Control PID	49
7. Conclusiones	53
8. Futuros trabajos	54
 A. Algunos códigos empleados	 55
A.1. STFT	55
 B. Imágenes adicionales	 56
B.1. Transformada Z-Chirp	56
B.1.1. Señal completa transformada	56
B.1.2. Extracción de características de la señal transformada	63
B.1.3. Espectrograma Z-Chirp	69
 Bibliografía	 75

Índice de figuras

1.	Sección típica de una fibra mono-modo (izda.) y recubrimientos protectores típicamente empleados (dcha.).	2
2.	Esquema de una rejilla de Bragg o FBG.	3
3.	Principio de funcionamiento de una rejilla de Bragg.	3
4.	Representación esquemática del principio de funcionamiento de la medida distribuida por reflectometría óptica.	5
5.	Esquema básico de los dos tipos básicos de interferómetros. En (a) interferómetro Mach-Zehner y en (b) interferómetro Michelson.	5
6.	Esquema de la red óptica OBR donde TLS denota la fuente de luz tuneable y DUT es el dispositivo que se testea.	6
7.	Función de transferencia en el dominio de dos estados de una fibra óptica. Nótese la caída brusca precedida de un pico en la zona en la que no hay más fibra óptica.	7
8.	Funciones de transferencia comparadas en el dominio del tiempo.	8
9.	Funciones de transferencia comparadas en el dominio de la frecuencia.	9
10.	Resultado de la correlación cruzada entre dos estados de la función de transferencia de una fibra óptica.	9
11.	Distribución del desplazamientopectral relativo a lo largo de una fibra óptica sometida a deformación y temperatura. Nótese, en este caso, que existen fuertes anomalías en las regiones en las que se ha soldado la fibra (en torno a $z=1.5$ m) y en el final de la misma (en torno a $z=2.3$ m).	10
12.	Varios tipos de pigtail empleados para la conexión de sensores de fibra óptica.	12
13.	Herramientas empleadas en la soldadura de fibra óptica.	12
14.	Interrogador óptico OBR 4600 de LUNA Innovations ([2]).	13
15.	Representación del campo electromagnético (E-B) al propagarse por la fibra (izquierda) y esquema gráfico del significado de los estados de polarización s-p (derecha).	15
16.	Representación de las señales de ejemplo escogidas. A la izquierda, cada fila está etiquetada con la temperatura (uniforme en toda la fibra) y la flecha en el extremo.	16
17.	Desplazamiento spectral relativo de las señales de ejemplo (respecto la de referencia).	16
18.	Esquema básico del algoritmo STFT.	17

19.	Espectrogramas de las señales de ejemplo computados por medio de la función <i>stft</i> de <i>librosa</i>	18
20.	Algoritmo de correlación cruzada entre espectrogramas.	18
21.	Correlación cruzada de las ventanas espaciales con las señales de ejemplo, a partir de los espectrogramas creados mediante la función <i>stft</i> de <i>librosa</i>	19
22.	Comparación de correlaciones cruzadas de las ventanas espaciales con las señales de ejemplo, a partir de los espectrogramas creados mediante la función <i>stft</i> de <i>librosa</i>	19
23.	Espectrogramas de las señales de ejemplo computados por medio de la función <i>stft</i> de <i>scipy</i> (arriba) y comparación de correlaciones cruzadas (abajo).	20
24.	Espectrogramas de las señales de ejemplo computados por medio de la función <i>stft</i> creada (arriba) y comparación de correlaciones cruzadas (abajo).	21
25.	Espectrogramas de Mel de las señales de ejemplo computados por medio de la función <i>stft</i> creada (arriba) y comparación de correlaciones cruzadas (abajo).	22
26.	Cromogramas de las señales de ejemplo computados por medio de la función <i>stft</i> creada (arriba) y comparación de correlaciones cruzadas (abajo).	23
27.	Autocorrelación (arriba) y comparación con dos niveles de zoom (centro y abajo).	24
28.	Espectrogramas de la fase (arriba) y comparación de correlaciones cruzadas (abajo).	25
29.	Correlación cruzada de los dos estados de polarización y comparación de correlaciones cruzadas con dos diferentes niveles de zoom.	26
30.	Parte armónica de las señales (arriba) y diferencia con la señal de referencia (abajo).	28
31.	Parte percusiva de las señales (arriba) y diferencia con la señal de referencia (abajo).	29
32.	Centroides espectrales de los distintos espectrogramas (arriba) y diferencias con el espectrograma de referencia (abajo).	31
33.	Atenuación espectral de las señales (arriba) y diferencia con la señal de referencia (abajo).	32
34.	Ancho de banda espectral de las señales (arriba) y diferencia con la señal de referencia (abajo).	33
35.	Contraste espectral de las señales (arriba) y diferencia con la señal de referencia (abajo).	34
36.	Planicidad espectral de las señales (arriba) y diferencia con la señal de referencia (abajo).	35
37.	Energía media cuadrática de las señales (arriba) y diferencia con la señal de referencia en dos niveles de zoom (centro y abajo).	36
38.	Tempogramas de las señales de ejemplo.	37

39.	Características del tempograma (arriba) y diferencia entre ellas y la de referencia (abajo).	38
40.	Comparación de autocorrelaciones.	39
41.	Comparación de energía media cuadrática con dos niveles de zoom.	40
42.	Señal de ejemplo (sin normalizar).	41
43.	Peso en la decisión final de cada uno de los segmentos en orden de importancia, a la izquierda para la decisión de temperatura y a la derecha para la de deformación.	42
44.	Regiones más relevantes de la señal para cada una de las predicciones del modelo, arriba para la predicción de temperatura y abajo para la de deformación.	43
45.	Estufa modificada para la adquisición automática de señales.	45
46.	Esquema eléctrico de la estufa.	46
47.	Lecturas del módulo de temperatura sin calibrar y las del termómetro calibrado.	47
48.	Lecturas del módulo de temperatura una vez calibrado y las del termómetro calibrado.	48
49.	Sistema a controlar.	49
50.	Datos de entrada (izquierda) y salida (derecha).	49
51.	Modelo ajustado frente a los datos experimentales.	50
52.	Comportamiento del sistema una vez incluido el control PID, arriba señal de entrada (porcentaje de tiempo que se enciende el relé) y abajo de salida (incremento de temperatura).	51
53.	Comportamiento de la estufa una vez incluido el control PID.	52
54.	Señales de ejemplo tras la transformación Z-Chirp..	56
55.	Espectrogramas tras la transformación Z-Chirp..	57
56.	Correlación de espectrogramas tras la transformación Z-Chirp con dos niveles de zoom.	58
57.	Comparación de las correlaciones entre espectrogramas tras la transformación Z-Chirp con dos niveles de zoom.	59
58.	Auto-correlación de espectrogramas tras la transformación Z-Chirp con dos niveles de zoom.	60
59.	Comparación de las auto-correlaciones entre espectrogramas tras la transformación Z-Chirp con dos niveles de zoom.	61
60.	Correlación entre los dos estados de polarización (izquierda) y su comparación (derecha) tras la transformación Z-Chirp con dos niveles de zoom.	62

61.	Centroide espectral (arriba) y su diferencia con las señales de referencia (abajo)	63
62.	Atenuación espectral (arriba) y su diferencia con las señales de referencia (abajo)	64
63.	Ancho de banda espectral (arriba) y su diferencia con las señales de referencia (abajo)	65
64.	Contraste espectral (arriba) y su diferencia con las señales de referencia (abajo)	66
65.	Planicidad espectral (arriba) y su diferencia con las señales de referencia (abajo)	67
66.	Energía media cuadrática (arriba) y su diferencia con las señales de referencia (abajo)	68
67.	Espectrogramas tras la transformación Z-Chirp..	69
68.	Correlación de espectrogramas tras la transformación Z-Chirp con dos niveles de zoom.	70
69.	Comparación de las correlaciones entre espectrogramas tras la transformación Z-Chirp con dos niveles de zoom.	71
70.	Auto-correlación de espectrogramas tras la transformación Z-Chirp con dos niveles de zoom.	72
71.	Comparación de las auto-correlaciones entre espectrogramas tras la transformación Z-Chirp con dos niveles de zoom.	73
72.	Correlación entre los dos estados de polarización (izquierda) y su comparación (derecha) tras la transformación Z-Chirp con dos niveles de zoom.	74



POLITÉCNICA

UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA
DE MADRID

Índice de tablas

1.	Parámetros del sistema de primer orden.	50
2.	Coeficientes del sistema de control PID.	51

Nomenclaturas

Fibra óptica

η	Coeficiente termo-óptico (FBG)
Λ	Periodo de la rejilla de Bragg
ρ_e	Coeficiente foto-elástico (FBG)
K_ε	Coeficiente foto-elástico (OBR)
K_T	Coeficiente termo-óptico (OBR)
n_{eff}	Índice de refracción efectivo del núcleo

Propiedades físicas

α	Coeficiente de expansión térmico
τ	Desfase temporal
ε	Deformación mecánica
T	Temperatura
t	Tiempo
ν	Frecuencia

Señales ópticas

$\omega(t)$	Frecuencia instantánea
ϕ	Fase
ρ	Amplitud
E	Campo electromagnético
H	Función de transferencia
P	Función de transferencia del estado de polarización p
S	Función de transferencia del estado de polarización s



1. Introducción

El actual desarrollo de lanzadores reutilizables implica una demanda creciente de métodos de inspección no destructivos que puedan asegurar la fiabilidad de los componentes del vehículo una vez ha efectuado su aterrizaje. El empleo de sensores de fibra óptica en estas estructuras resulta especialmente interesante ya que son capaces de medir deformaciones, temperatura y presencia de hidrógeno de forma continua o discreta a tiempo real. Los sensores de fibra óptica además, son de pequeño tamaño y resultan fáciles de integrar entre las capas de laminado del material compuesto sin penalizar prácticamente sus propiedades mecánicas.

En anteriores trabajos, véase Caso de Estudio 2 ([1]), se caracterizaron varios de estos sensores de fibra óptica y se estudió su respuesta a fenómenos térmicos y mecánicos. Se estudió especialmente el comportamiento y la aplicación al curado de materiales compuestos de sensores de medida distribuida. Estos sensores están basados en reflectometría óptica de retrodispersión (OBR) y la información se obtiene mediante el uso de interferómetros tipo OFDR (*Optical Frequency-Domain Reflectometer*). Sin embargo, estos sensores son sensibles tanto a incrementos de temperatura como de deformación y en situaciones en las que ambos fenómenos coexisten se produce cierta confusión. Normalmente se suelen incluir otros sensores para desacoplar ambas medidas, pero en el Caso de Estudio 2, se desarrolló un modelo de inteligencia artificial capaz de discernir entre ambas medidas con una confianza razonable.

Este Caso de Estudio se centrará especialmente en el análisis de la señal obtenida por el interferómetro. Así, se pretende caracterizar la señal de una forma más eficiente y obtener parámetros que puedan aportar información adicional sobre el estado de la fibra óptica. Además, se estudiará con técnicas de Inteligencia Artificial Explicable (XAI) el modelo desarrollado anteriormente con el fin de recabar información sobre cómo realiza la toma de decisiones. Por último, se desarrollará una herramienta que permitirá la obtención de muestras de forma automática lo cual permitirá que los análisis llevados a cabo se basen en un volumen mayor de información.

1.1. Estructura de la fibra óptica

La fibra óptica empleada consiste en un hilo de vidrio de sílice extruido. Alrededor de la guía de luz se añaden una serie de recubrimientos con el fin de proteger la fibra y la señal que por ella se transmite. Cuando se emplea como sensor es necesario retirar estos recubrimientos pues el material actuará como protector y puesto que se necesita que el elemento sea lo menos disruptivo posible dentro de la estructura. En la Figura 1 se ilustra en detalle la estructura de la guía y los revestimientos.

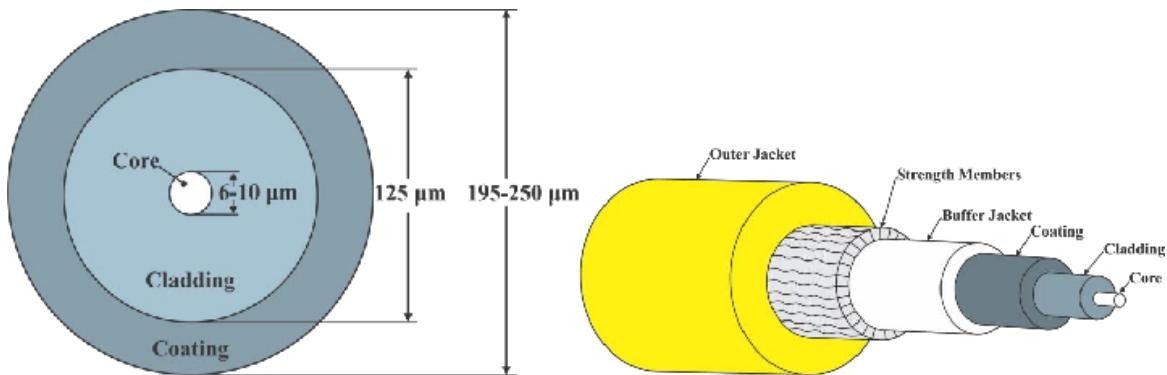


Figura 1: Sección típica de una fibra mono-modo (izda.) y recubrimientos protectores típicamente empleados (dcha.).

La guía está formada por un núcleo (core) de unas 6-10 micras con un revestimiento (cladding) de unas 125 micras. Por debajo de las 10 micras la luz está restringida en el núcleo a un único modo de propagación (mono-modo) y todas las señales enviadas son recibidas al mismo tiempo. Núcleo y revestimiento tienen distintos órdenes de refracción, así la luz emitida por el núcleo, al llegar a una de las paredes con un ángulo de incidencia muy grande, experimenta una refracción absoluta y continúa propagándose sin pérdidas. Si el radio de doblado de la fibra es muy pequeño el ángulo de incidencia disminuirá y parte de la luz atravesará el revestimiento de vidrio. Los revestimientos protectores (*coating*) y las camisas (*jacket*) sirven para aislar y proteger la guía. Estos elementos soportan además los esfuerzos axiales y confieren rigidez. Como se mencionó anteriormente, en telecomunicaciones estos componentes resultan de gran utilidad puesto que confieren robustez al sistema pero en la monitorización de estructuras es necesario que sean retirados.

1.2. La rejilla de Bragg (FBG)

Debido a la alta relación señal a ruido de la fibra óptica el método más sencillo y empleado se basa en la modificación del índice de refracción de la fibra con el fin de restringir el paso de ciertas longitudes de onda emitidas. Así en una región pequeña se graba una rejilla de Bragg o FBG por sus siglas en inglés (Fiber Bragg Grating). Para inscribir la FBG se emplea un láser capaz de modificar la estructura de

la fibra y una rejilla para que las marcas del láser queden de forma equiespaciada y localizada (véase Figura 2) de manera que el índice de refracción queda modulado periódicamente.

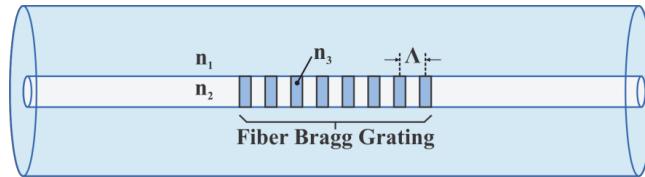


Figura 2: Esquema de una rejilla de Bragg o FBG.

Así cierta longitud de onda, proporcional a la separación entre las marcas, es incapaz de propagarse por la fibra. En la Figura 3 se ilustra este fenómeno.

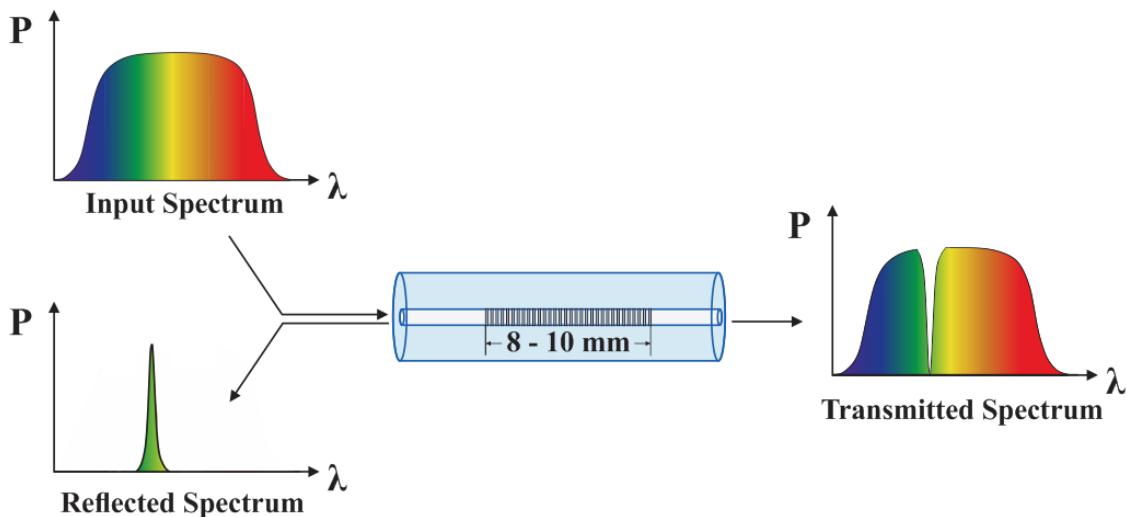


Figura 3: Principio de funcionamiento de una rejilla de Bragg.

Un cambio en la longitud de la fibra supondrá un cambio entre la separación de las marcas y la frecuencia de la señal reflejada cambiará. Los cambios en el índice de refracción también modificarán la señal reflejada. Para considerar ambos efectos se recurre a la fórmula de la longitud de onda de Bragg:

$$\lambda_b = 2n_{eff}\Lambda , \quad (1)$$

donde $n_{eff}(\varepsilon, T)$ es el índice de refracción efectivo del núcleo y $\Lambda(\varepsilon, T)$ es el periodo de separación de las marcas y ambas dependen de la deformación mecánica ε y de la temperatura T .

A partir de esta expresión se puede obtener la dependencia con la deformación:



$$\begin{aligned}\frac{d\lambda_B}{dL} &= 2n_{eff} \left(\frac{d\Lambda}{dL} \right) + 2\Lambda \left(\frac{dn_{eff}}{dL} \right) \\ \frac{\Delta\lambda_B}{\Delta L} &= \frac{1}{\Lambda} \frac{d\Lambda}{dL} \lambda_B + \frac{1}{n_{eff}} \frac{dn_{eff}}{dL} \lambda_B \\ \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} &= \Delta L \left(\frac{1}{\Lambda} \frac{d\Lambda}{dL} + \frac{1}{n_{eff}} \frac{dn_{eff}}{dL} \right) \\ \Rightarrow \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} &= (1 - \rho_e) \epsilon,\end{aligned}\tag{2}$$

donde ρ_e es el coeficiente foto-elástico que caracteriza el cambio del índice refractivo a medida que el material se elonga.

y con la temperatura:

$$\begin{aligned}\frac{d\lambda_B}{dT} &= 2n_{eff} \left(\frac{d\Lambda}{dT} \right) + 2\Lambda \left(\frac{dn_{eff}}{dT} \right) \\ \frac{\Delta\lambda_B}{\Delta T} &= \frac{1}{\Lambda} \frac{d\Lambda}{dT} \lambda_B + \frac{1}{n_{eff}} \frac{dn_{eff}}{dT} \lambda_B \\ \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} &= \Delta T \left(\frac{1}{\Lambda} \frac{d\Lambda}{dT} + \frac{1}{n_{eff}} \frac{dn_{eff}}{dT} \right) \\ \Rightarrow \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} &= \Delta T(\alpha + \eta),\end{aligned}\tag{3}$$

donde α es el coeficiente de expansión térmica del sílice y η es el coeficiente termo-óptico

Combinando ambas expresiones se obtiene la dependencia mecánico-térmica de la longitud de onda de Bragg:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - \rho_e) \epsilon + \Delta T(\alpha + \eta).\tag{4}$$

1.3. Refrectometría óptica de retrodispersión (OBR)

Durante el proceso de extrusión del vidrio que conforma la fibra óptica se producen ciertas modificaciones en el índice de refracción del núcleo de forma aleatoria. Estas variaciones son de muy pequeño orden pero, dado que se mantienen fijas a menos que la fibra se estire o se caliente, permiten usar la totalidad de la fibra óptica como sensor. Dado que estas variaciones son de un orden mucho menor que el ruido ambiente es necesario contar con un equipo capaz de eliminar el ruido y que cuente con una alta sensibilidad para poder apreciar el fenómeno. Existen muchas técnicas para medir dónde y con cuanta

intensidad se produce el desplazamiento de esas variaciones respecto a un estado de referencia y cada una de ellas se asocia con un fenómeno de dispersión de luz. En este caso se estudiará la refrectometría óptica de dispersión u *optical backscatter reflectometry* (en adelante OBR).

Mediante el tiempo que tarda una señal de pulso corto y banda ancha en ser emitida, reflejada y recibida es posible situar las perturbaciones de la fibra. Por otro lado, debido a la dispersión de Rayleigh se experimenta una pérdida de intensidad que se usa para terminar de mapear todas las imperfecciones. Esto se conoce como OFDR (*Optical Frequency Domain Reflectometry*). En el caso de la OBR se realiza un barrido en longitud de onda lo que permite determinar una medida de la dispersión de Rayleigh con una resolución superior a $10 \mu\text{m}$. En la Figura 4 se muestra una representación gráfica del concepto.

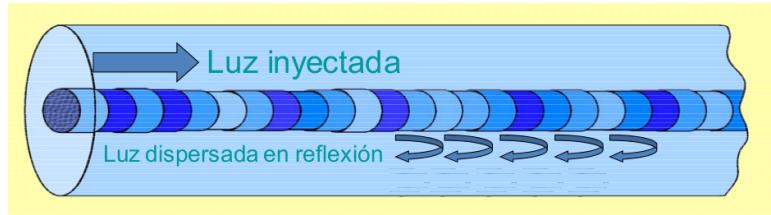


Figura 4: Representación esquemática del principio de funcionamiento de la medida distribuida por reflectometría óptica.

Para realizar la medida, existen dos tipos básicos de interferómetros: Mach-Zehnder y Michelson (véase Figura 5) y ambos pueden ser tratados mediante las mismas ecuaciones.

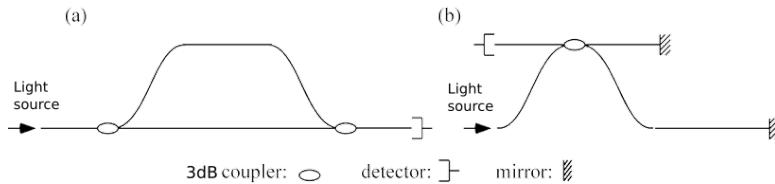


Figura 5: Esquema básico de los dos tipos básicos de interferómetros. En (a) interferómetro Mach-Zehnder y en (b) interferómetro Michelson.

Considérese una fuente que produce un campo electromagnético con la forma:

$$E_{in} = E_0(t)e^{-i\omega(t)t}, \quad (5)$$

donde $\omega(t)$ representa la frecuencia instantánea del láser tuneable para un tiempo t . Nótese que, como la luz se detecta en un único punto, se ha ignorado la dependencia espacial del campo.

En el primer *coupler* la fuente se divide en dos: E_1 y E_2 y tras propagarse a través de fibras de diferente longitud y ser recombinaadas se tiene un campo sobre el detector de la forma:

$$E_{\text{out}} = E_0(t + \tau_1) e^{-i\omega(t+\tau_1)t} + E_0(t + \tau_2) e^{-i\omega(t+\tau_2)t}, \quad (6)$$

donde τ_i es el desfase temporal correspondiente a cada uno de los recorridos.

El detector proporciona una salida en función de la intensidad la cual puede ser expresada como:

$$I(\omega) = |E_0(t)|^2 + |E_0(t - \tau)|^2 + 2E_0(t)E_0(t - \tau) \cos[\omega(t)\tau], \quad (7)$$

donde $\tau = \tau_1 - \tau_2$ la diferencia entre desfases temporales.

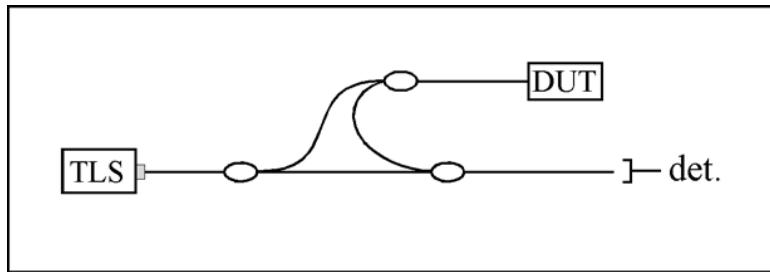


Figura 6: Esquema de la red óptica OBR donde TLS denota la fuente de luz tuneable y DUT es el dispositivo que se prueba.

Estas ecuaciones básicas son empleadas para construir un ORB. Modificando una de las ramas del interferómetro Mach-Zehner (como se muestra en la Figura 6) se puede caracterizar la fibra empleada como sensor mediante su función de transferencia $H(\omega)$ que contiene información respecto a la amplitud $\rho(\omega)$ y la fase $\phi(\omega)$:

$$H(\omega) = \rho(\omega)e^{i\phi(\omega)}. \quad (8)$$

Además, el equipo empleado incluye un divisor de haz (*beam splitter*) que permite separar la función de transferencia total en las funciones de transferencia de cada uno de los modos de polarización *p-s*.

Así, el detector recibirá una señal con intensidad:

$$\begin{aligned} I = & |E_0(t)|^2 + |E_0(t - \tau)|^2 \rho(\omega)^2 \\ & + 2\rho(\omega)E_0(t)E_0(t - \tau) \cos[\omega(t)\tau - \phi(\omega)]. \end{aligned} \quad (9)$$

Después se realiza la transformada de Fourier para separar espectralmente los tres sumandos del segundo término de la ecuación. El tercero normalmente se denomina término de interferencia y es el que más información ofrece ya que este término oscila con frecuencia $\omega(t)\tau$ mientras que el resto se mantienen estáticos y además si se conoce el *delay* se puede ubicar la interferencia si se conoce la velocidad de propagación de la luz en el dispositivo que se interroga.

Si se tienen las dos funciones de transferencia de una fibra en dos estados diferentes éstas se pueden comparar entre sí para obtener una medida conjunta de variación de temperatura y deformación de una forma similar a como se hace con las rejillas de Bragg:

- En primer lugar, se selecciona una región donde efectuar los cálculos. La distancia entre las regiones de evaluación, así como el número de puntos para el cómputo condicionará directamente la resolución de las medidas obtenidas y tendrá también un impacto directo en el tiempo de cálculo. En la Figura 7 se muestran la función de transferencia, en el dominio del tiempo, de una misma fibra en dos estados diferentes de deformación-temperatura.

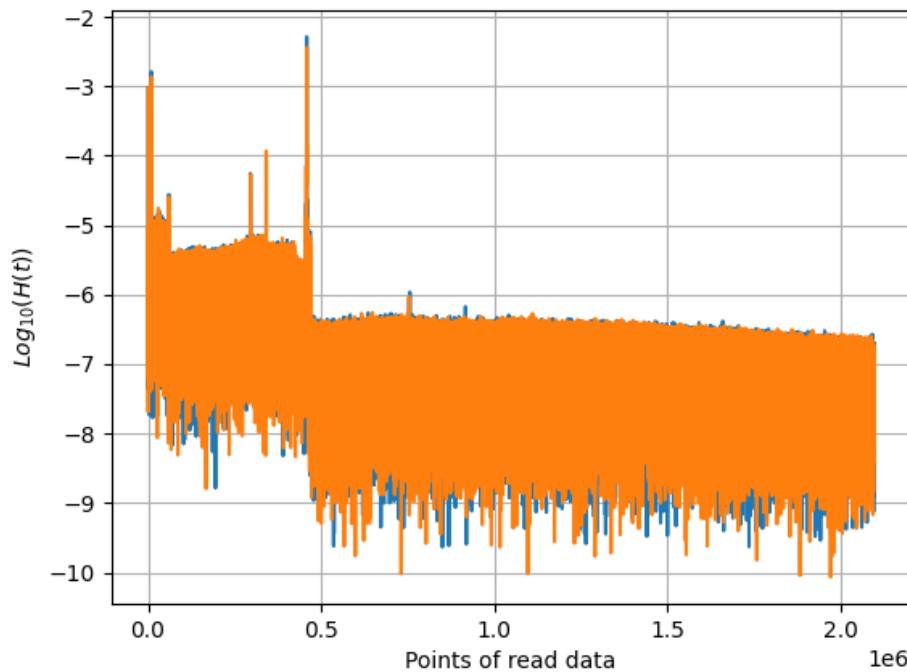


Figura 7: Función de transferencia en el dominio de dos estados de una fibra óptica. Nótese la caída brusca precedida de un pico en la zona en la que no hay más fibra óptica.

- Después, se calcula el desplazamiento espectral de la región por medio de la correlación cruzada de las señales. Para ello, lo primero es llevar las medidas de función de transferencia al dominio de la frecuencia mediante la transformada rápida de Fourier (FFT), luego se computa la correlación cruzada entre ambas señales. Luego, la localización del máximo de la correlación cruzada se relaciona con el desplazamiento espectral mediante el ratio de escaneo. En las Figuras 8 a 10 se puede apreciar cómo se realiza este paso.

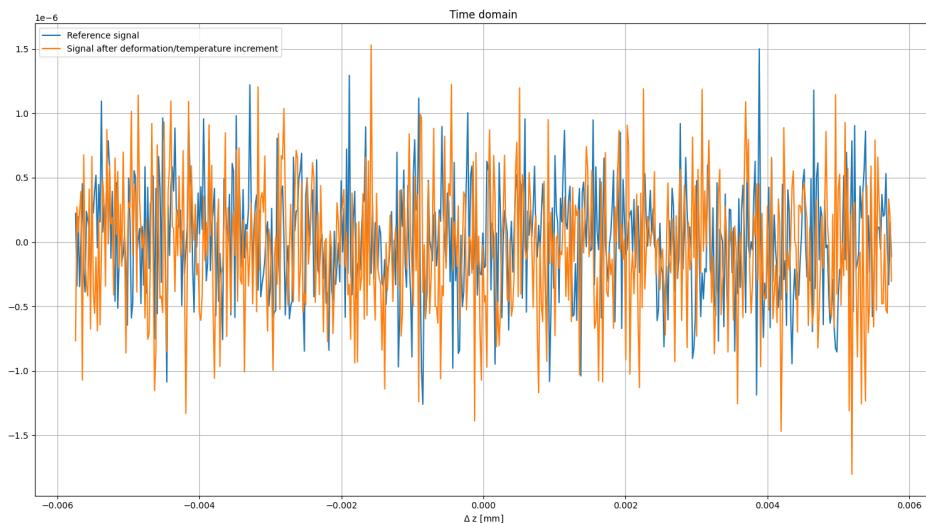


Figura 8: Funciones de transferencia comparadas en el dominio del tiempo.

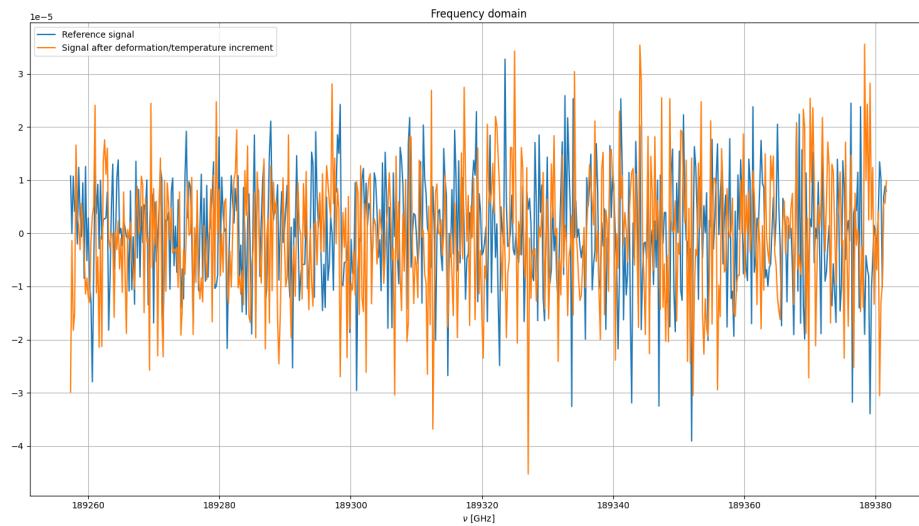


Figura 9: Funciones de transferencia comparadas en el dominio de la frecuencia.

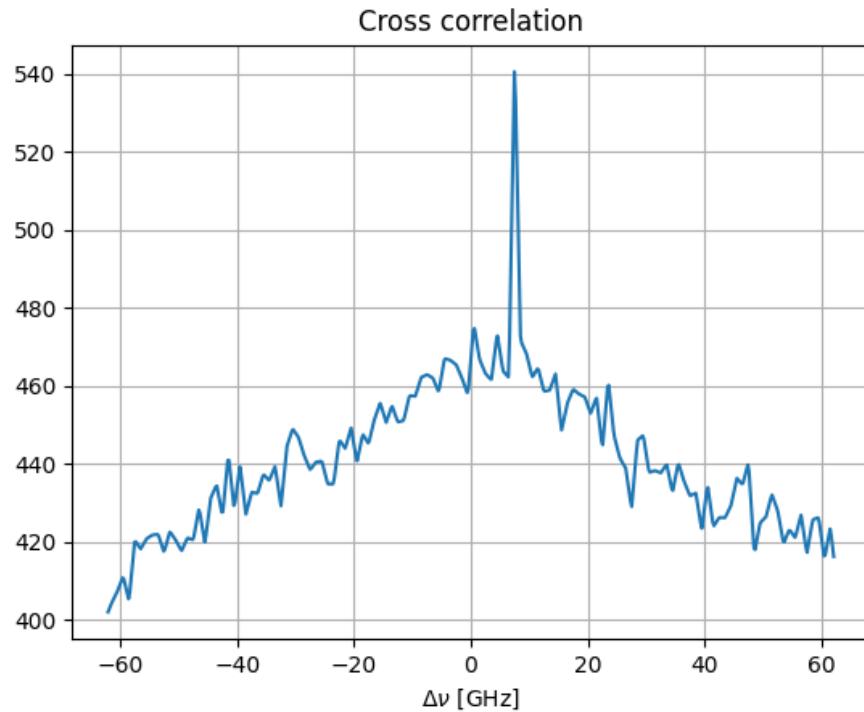


Figura 10: Resultado de la correlación cruzada entre dos estados de la función de transferencia de una fibra óptica.



- Por último, el desplazamiento espectral se divide entre la frecuencia central de manera que puede relacionarse con la medida conjunta de deformación y temperatura mediante:

$$-\frac{\Delta\nu}{\bar{\nu}} = K_T \Delta T + K_\varepsilon \Delta \varepsilon , \quad (10)$$

donde $\Delta\nu$ es el desplazamiento espectral de la frecuencia y $\bar{\nu}$ es la frecuencia media del intervalo que se analiza. Los coeficientes K_T y K_ε son equivalentes a $(1 - \rho_e)$ y $(\alpha + \eta)$, respectivamente, solo que tienen valores diferentes.

Este procedimiento, llevado a cabo a lo largo de la fibra permite obtener un perfil de deformación-temperatura como el de la Figura 11

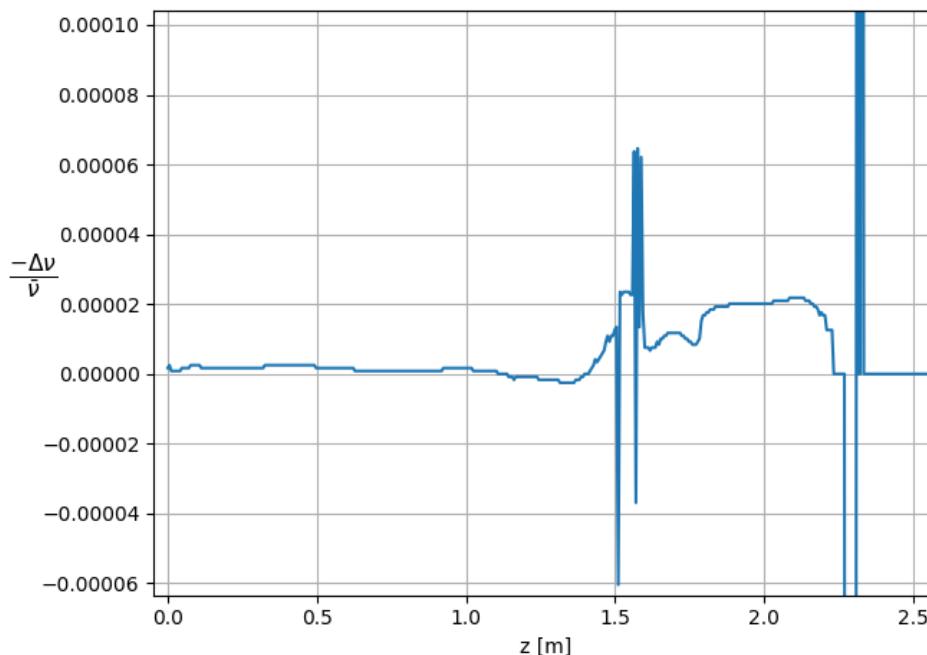


Figura 11: Distribución del desplazamiento espectral relativo a lo largo de una fibra óptica sometida a deformación y temperatura. Nótese, en este caso, que existen fuertes anomalías en las regiones en las que se ha soldado la fibra (en torno a $z=1.5$ m) y en el final de la misma (en torno a $z=2.3$ m).

Información referente a esta Introducción ha sido extraída de [3] y del manual del interrogador óptico OBR 4600 de LUNA innovations [2], así como algunas de las imágenes empleadas.

2. Estado del arte

Los sensores basados en medida distribuida tienen, por lo general, una menor aceptación ya que se trata de una tecnología menos desarrollada y más costosa. Además, una de sus mayores limitaciones es que, dependiendo del método, es imposible distinguir entre medidas de temperatura y deformación. Sin embargo, sí se ha aplicado a los siguientes casos:

- **Ensayo de palas de aerogenerador:** ya que se trata de una estructura de grandes dimensiones sometida a un incremento de temperatura nula; en comparación con la instalación de un sinfín de galgas extensiométricas la adhesión de un segmento de fibra óptica de hasta 70 metros para obtener la distribución de deformaciones resulta interesante; por otra parte, no se pueden obtener datos de forma dinámica lo cual limita el tipo de ensayos.
- **Estructuras civiles:** de nuevo, la capacidad de obtener medidas continuas a lo largo de varias decenas de metros supone un gran atractivo; en este caso, además, al tratarse de materiales cerámicos, el disponer de datos continuos a lo largo de la estructura permite la detección temprana de grietas; por contrapartida, estructuras de este tipo sí se ven sometidas a cambios de temperatura, los cuales pueden distorsionar las medidas obtenidas por este tipo de sensores.
- **Curado de material compuesto:** en este caso la fácil integración de sensores permite determinar la evolución de la temperatura a lo largo de las capas sin distorsionar; por otro lado, se trata de un proceso que lleva asociado un incremento de deformaciones y separar ambos fenómenos es complejo y normalmente lleva asociado el uso de equipos complejos o de otros métodos de monitorización.
- **Detección de daños en materiales compuestos:** en el caso de detección de daños, de nuevo se tiene una aplicación en la cual no existe un incremento de temperatura y por tanto se puede obtener una distribución de esfuerzos sin problema.

Más información respecto a este punto puede ser encontrada en [4]

3. Metodología

3.1. Creación de sensores de fibra óptica

Una de las ventajas de los sensores de fibra óptica basados en la medida distribuida es que no es necesario modificar la fibra para convertirla en sensor. En algunas ocasiones se trabaja con fibras que mantienen la polarización (PMF) pero en este caso se ha trabajado con fibra óptica convencional monomodo (SMF) la cual, tiene una mayor disponibilidad y un precio más reducido.

Sin embargo, para poder conectar la fibra al equipo, se le ha de soldar un conector cerámico en uno de sus extremos con el fin de que el interrogador óptico pueda propagar correctamente un pulso de luz y así determinar la longitud de onda reflejada. El conector suele incluir un segmento de fibra óptica y este montaje se conoce comúnmente como pigtail (véase Figura 12).



Figura 12: Varios tipos de pigtails empleados para la conexión de sensores de fibra óptica.

El segmento de fibra óptica que incluye el pigtail está revestido por lo que ha de pelarse y soldarse a la fibra. Para realizar esta soldadura se emplean los útiles que se muestran en la Figura 13.



(a) Soldadora de arco Fujikura-
FSM-18S (b) Cable cleaver Fujikura CT-30 (c) Pelador de fibra.

Figura 13: Herramientas empleadas en la soldadura de fibra óptica.

3.2. Optical Backscatter Reflectometry

En el caso de la medida distribuida se emplea un interferómetro basado en el interferómetro Mach-Zehnder ya que este ha de ser capaz de distinguir entre el ruido externo y las variaciones en el índice reflexivo de la fibra consecuencia de su propia fabricación. En este caso se ha empleado el interrogador óptico de LUNA innovations que se muestra en la Figura 14.



Figura 14: Interrogador óptico OBR 4600 de LUNA Innovations ([2]).

3.3. Códigos y programación

Además, una vez obtenidos los archivos binarios con información sobre la función de transferencia de la fibra, se han tenido que procesar estos para obtener la distribución de esfuerzos y deformaciones. Para ello se han creado códigos y librerías en PYTHON valiéndose de librerías como *Numpy* y *Scipy* de código libre para procesar las señales.



4. Análisis de señal

Como se relató en la Sección 1, una de las grandes limitaciones de los sensores de fibra óptica es el acoplamiento que existe entre fenómenos térmicos y mecánicos ya que resulta imposible aplicar esta tecnología cuando existen simultáneamente variaciones de temperatura y de deformación si no se cuenta con varios equipos o varios sensores.

En el trabajo anterior (véase [1]) se consiguió separar razonablemente estos fenómenos por medio de una red neuronal alimentada directamente con las correlaciones cruzadas de las distintas lecturas que proporciona el OBR-4600 ([2]). Sin embargo, esta red fue puesta a prueba en la monitorización del curado de unas láminas de material compuesto sin dar buenos resultados. Es por ello que se ha tratado de abordar el problema desde un punto de vista algo más teórico.

Uno de los aspectos más atractivos del interrogador óptico es el formato de datos proporcionados, ya que se dispone de una muestra de señal digital con una resolución de hasta 10 micras. Esto, permite aplicar técnicas de análisis de señal digital convencionales a los datos para extraer más información. De hecho, a día de hoy, se computa la correlación cruzada para una región de la fibra entre las señales de dos estados distintos para obtener el incremento de temperatura o de deformación (véase Sección 1 para más información). Es por ello que en esta sección se tratará de aplicar otros métodos de análisis para extraer otras características que se puedan relacionar con los distintos fenómenos que puedan tener impacto sobre las medidas obtenidas con el interrogador.

Los métodos empleados para el análisis de señal han sido extraídos de [5] y están basados en la librería de Python *librosa* [6] y *scipy*, más en concreto, el módulo de procesado de señal [7].

La transmisión de luz a lo largo de una fibra óptica monomodo convencional (SMF) es un fenómeno harto complejo ya que supone la propagación de un campo eléctrico y un campo magnético (siempre perpendiculares entre sí), que además rotan a lo largo de la distancia. Proyectando el campo electromagnético en el plano de una sección de la fibra óptica se tiene por tanto una magnitud compleja (campo eléctrico y magnético) que además ha de ubicarse en un espacio bidimensional. Muchas son las formas de representar esta magnitud pero en este caso se ha empleado la designación s-p ya que el interferómetro usado cuenta con un *beam splitter* y por tanto proporciona la información de ambos estados de polarización directamente. En la Figura 15 se muestra, de una forma simplificada, en qué consisten estas proyecciones.

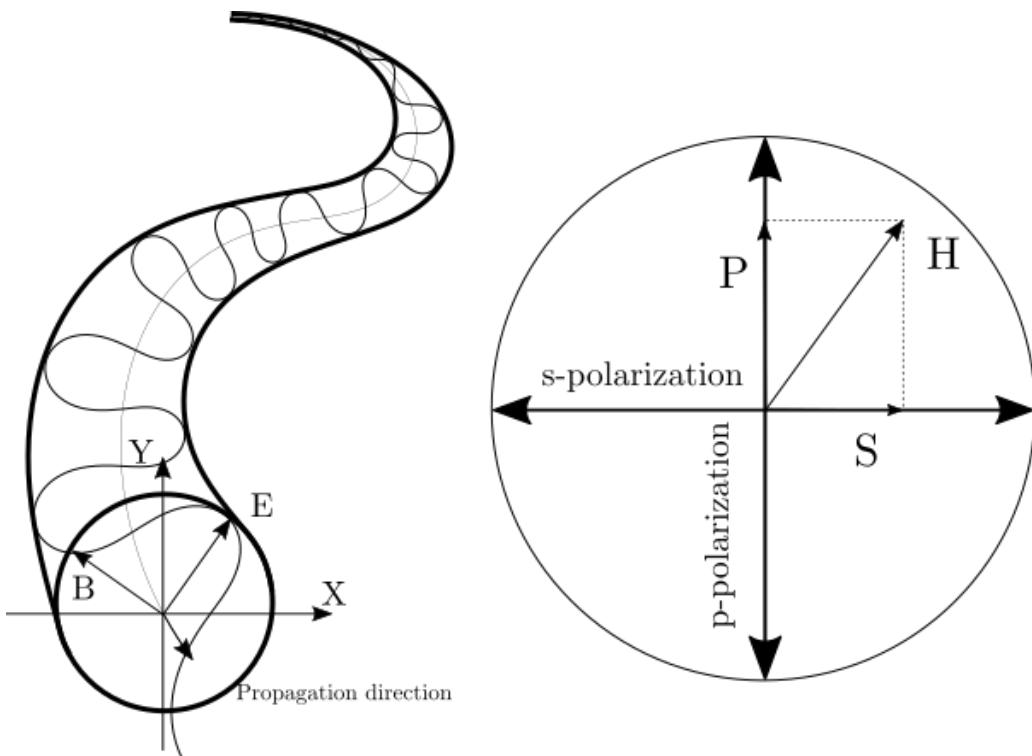


Figura 15: Representación del campo electromagnético (E-B) al propagarse por la fibra (izquierda) y esquema gráfico del significado de los estados de polarización s-p (derecha).

4.1. Señales de ejemplo

Como se puede observar, se tratan de, al menos cuatro variables que tener en cuenta, dos por los estados de polarización y otras dos por sus componentes real e imaginaria.

Para aplicar los distintos métodos de análisis de señal se han escogido seis señales de ejemplo con la siguiente estructura: una de referencia; dos con diferentes temperaturas; dos con diferentes estados de deformación; y una con diferente temperatura y estado de deformación. De esta forma se puede observar si un fenómeno es fruto de la casualidad o está realmente relacionado con algún aspecto físico. Para poder someter la fibra a distintos estados de deformación, se ha adherido esta a una pletina de aluminio empotrada en uno de sus extremos, al final de la cual, se ha colgado un peso. Los estados de deformación se pueden caracterizar así por la flecha en el extremo del voladizo. En la Figura 16 se muestran las señales consideradas y en la Figura 17 se muestra el desplazamiento espectral relativo, de cada una de las señales de ejemplo, respecto al primero de cada columna que han sido (y serán) tomados como referencia para el resto de sus columnas. El ratio de muestreo de estas señales es de 51101 1/m, lo que equivale a una resolución espacial de $19.569 \mu\text{m}$.

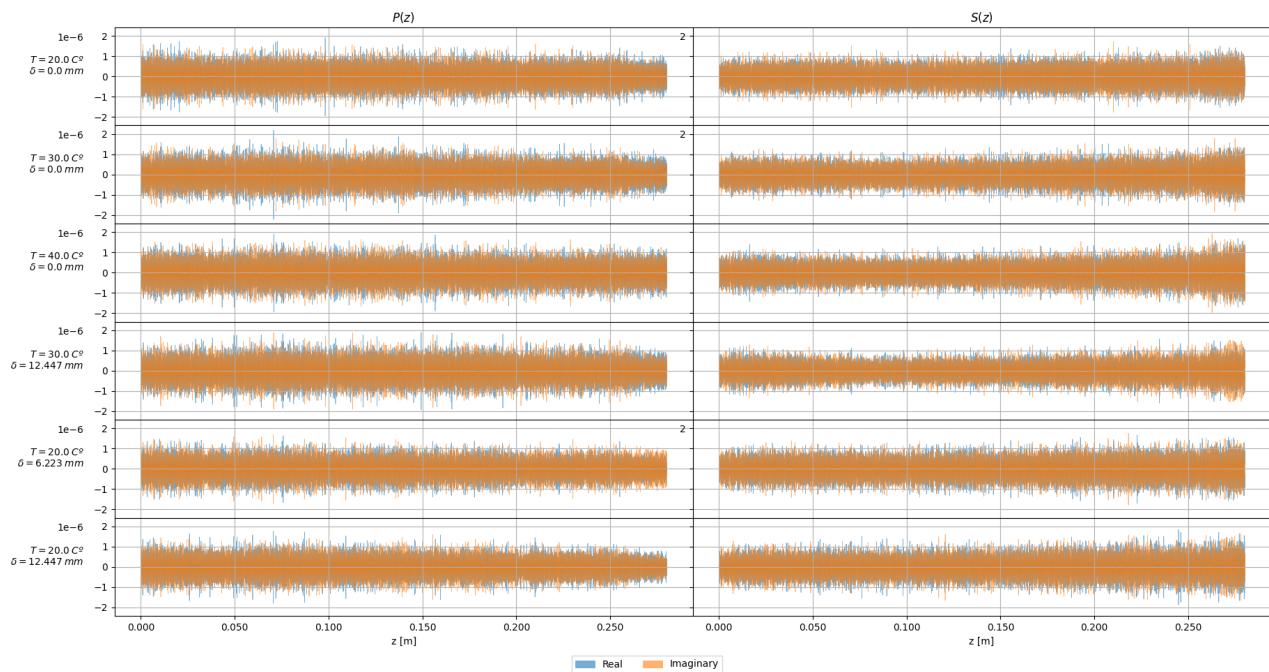


Figura 16: Representación de las señales de ejemplo escogidas. A la izquierda, cada fila está etiquetada con la temperatura (uniforme en toda la fibra) y la flecha en el extremo.

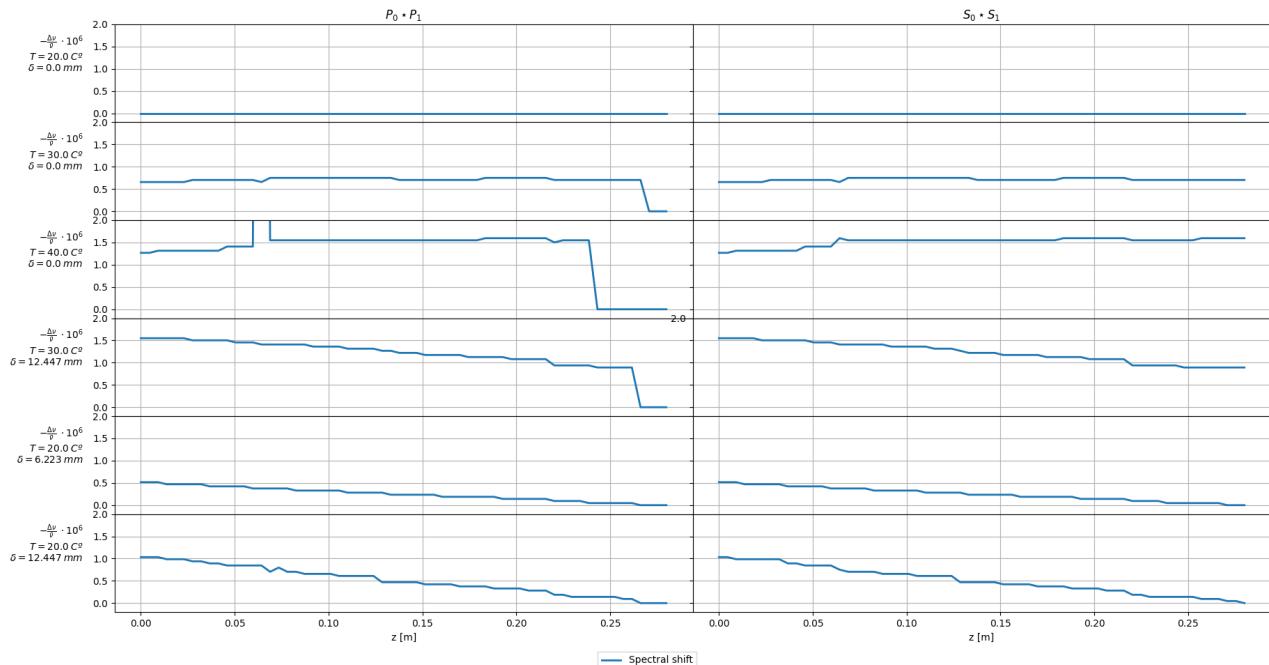


Figura 17: Desplazamiento espectral relativo de las señales de ejemplo (respecto la de referencia).

4.2. Espectrograma

Una de las técnicas más comunes para caracterizar una señal es mediante un espectrograma. Generalmente se aplica la Transformada de Fourier de Tiempo Corto (STFT) para obtener una distribución temporal y espectral de la señal, y luego se pasa este valor a decibelios. La transformación STFT está principalmente sujeta a dos parámetros, el ancho de la ventana y la distancia entre estas. En la Figura 18 se ilustra el algoritmo y el significado de estos parámetros.

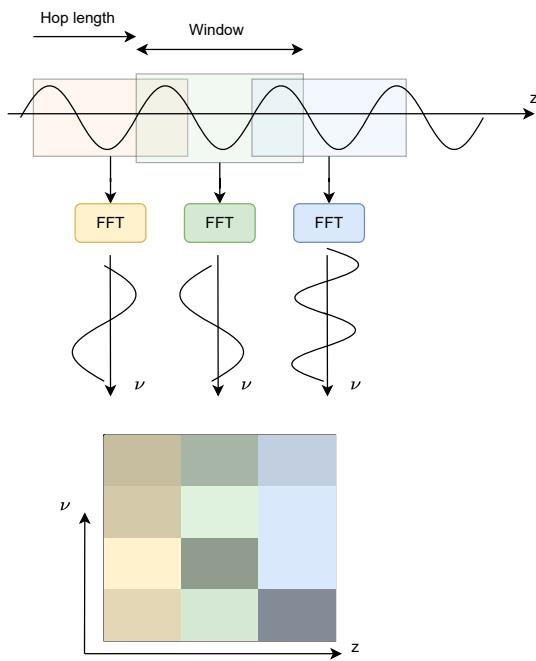


Figura 18: Esquema básico del algoritmo STFT.

En principio se usó la STFT de *librosa* para obtener el espectrograma que se muestra en la Figura 19. Para comprobar que la transformación era correcta se computó también la correlación cruzada. Para este cómputo, cada ventana fue comparada con su correspondiente del espectrograma de referencia siguiendo el esquema representado en la Figura 20. Para todos los espectrogramas que se muestran se ha tomado un *hop length* de 200 puntos y una ventana de 1000.

Estos cómputos se dispusieron también de la misma forma que el espectrograma para dibujar un mapa, tal y como se puede observar en la Figura 21. Como las señales de referencia computadas consigo mismas no crearon un mapa plano se tomaron estos mapas como estado base y se sustrajeron al resto para crear los mapas de la Figura 22. El objetivo de estas transformaciones es poder recuperar del espectrograma una traza parecida al desplazamiento espectral anteriormente obtenido.

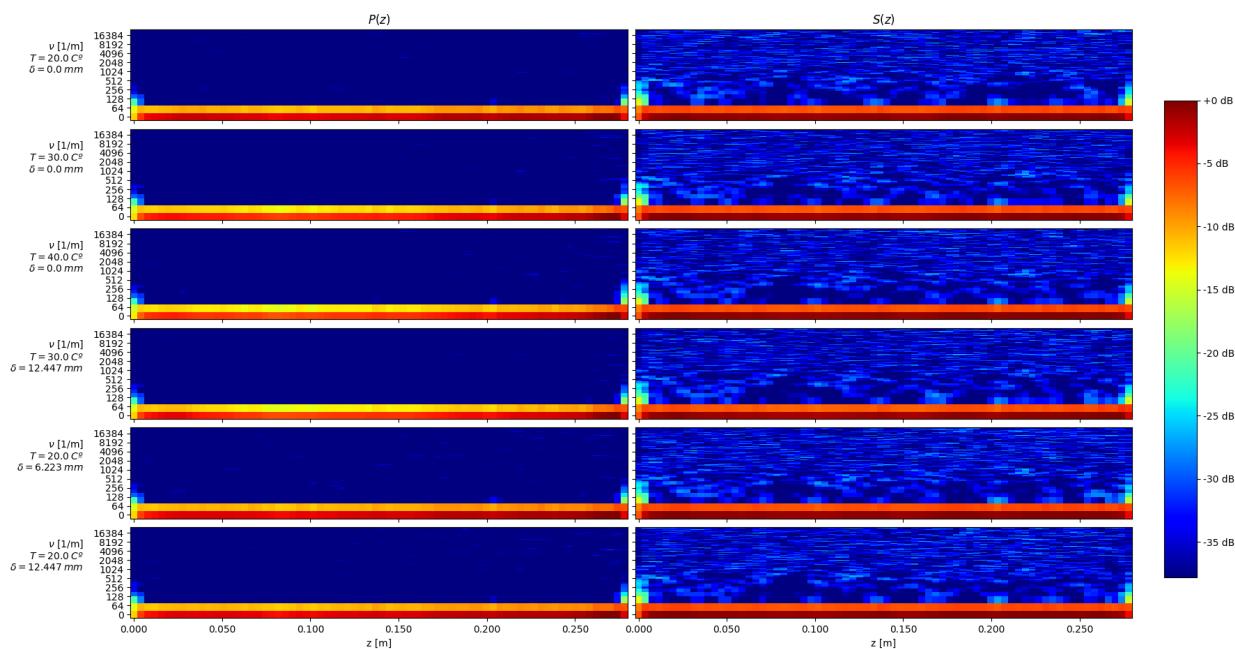


Figura 19: Espectrogramas de las señales de ejemplo computados por medio de la función `stft` de *librosa*.

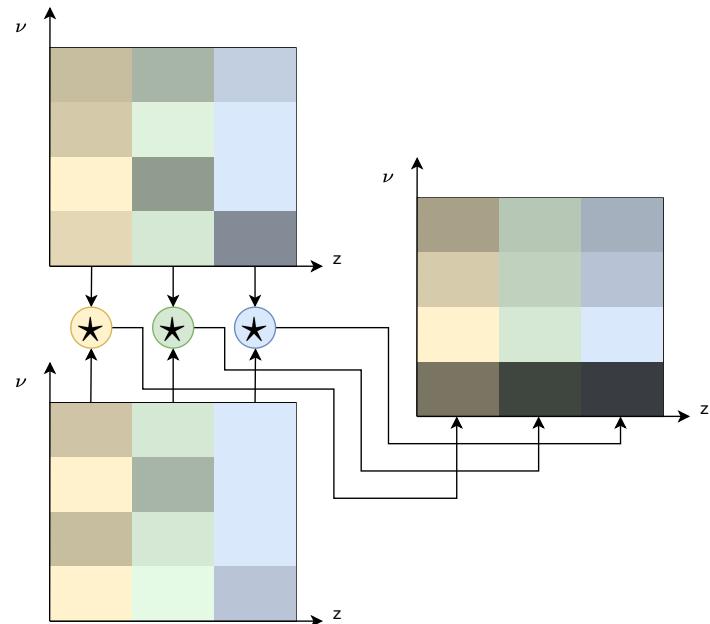


Figura 20: Algoritmo de correlación cruzada entre espectrogramas.

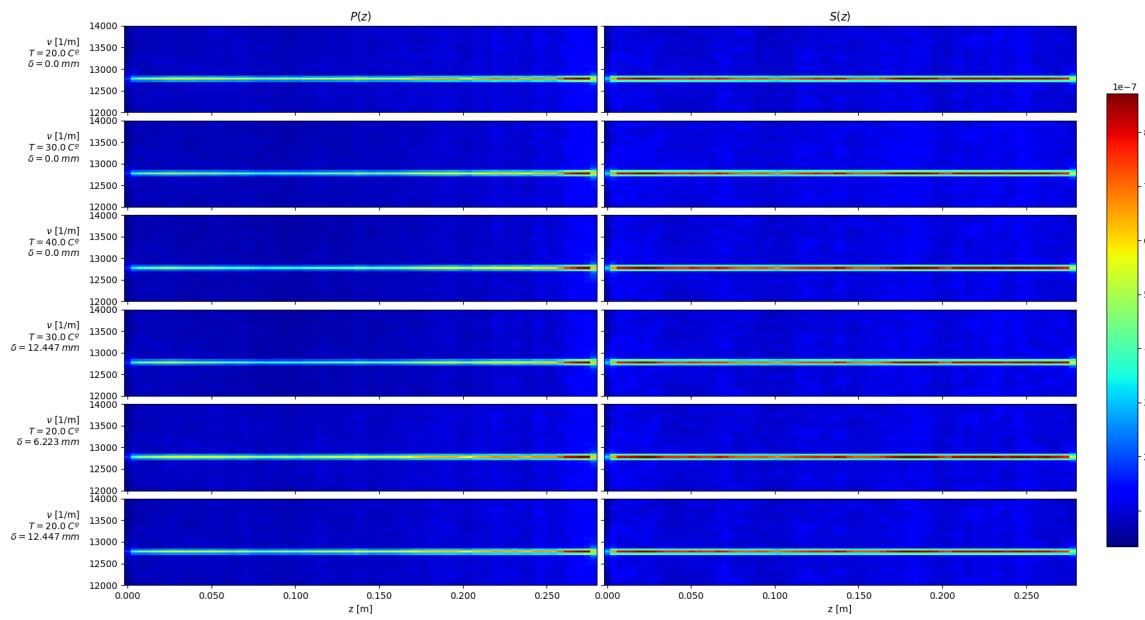


Figura 21: Correlación cruzada de las ventanas espaciales con las señales de ejemplo, a partir de los espectrogramas creados mediante la función `stft` de *librosa*.

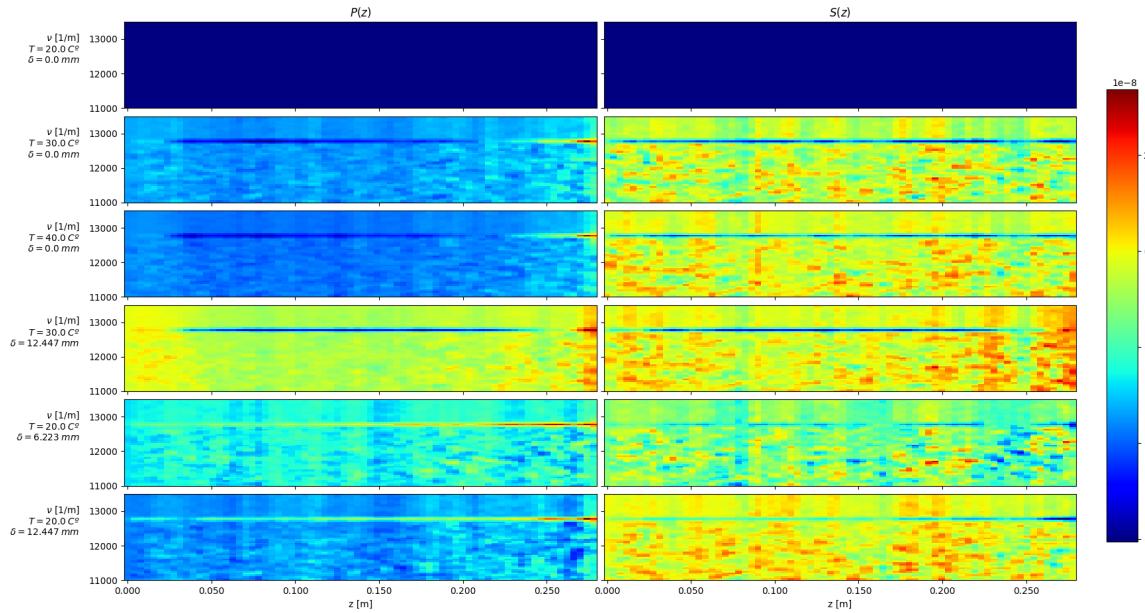


Figura 22: Comparación de correlaciones cruzadas de las ventanas espaciales con las señales de ejemplo, a partir de los espectrogramas creados mediante la función `stft` de *librosa*.

Observando la Figura 22 no se encuentra la traza anteriormente mencionada, es por ello que se trató de seguir el mismo procedimiento pero a través de la función *stft* de *scipy*, cuyos resultados se muestran en la Figura 23.

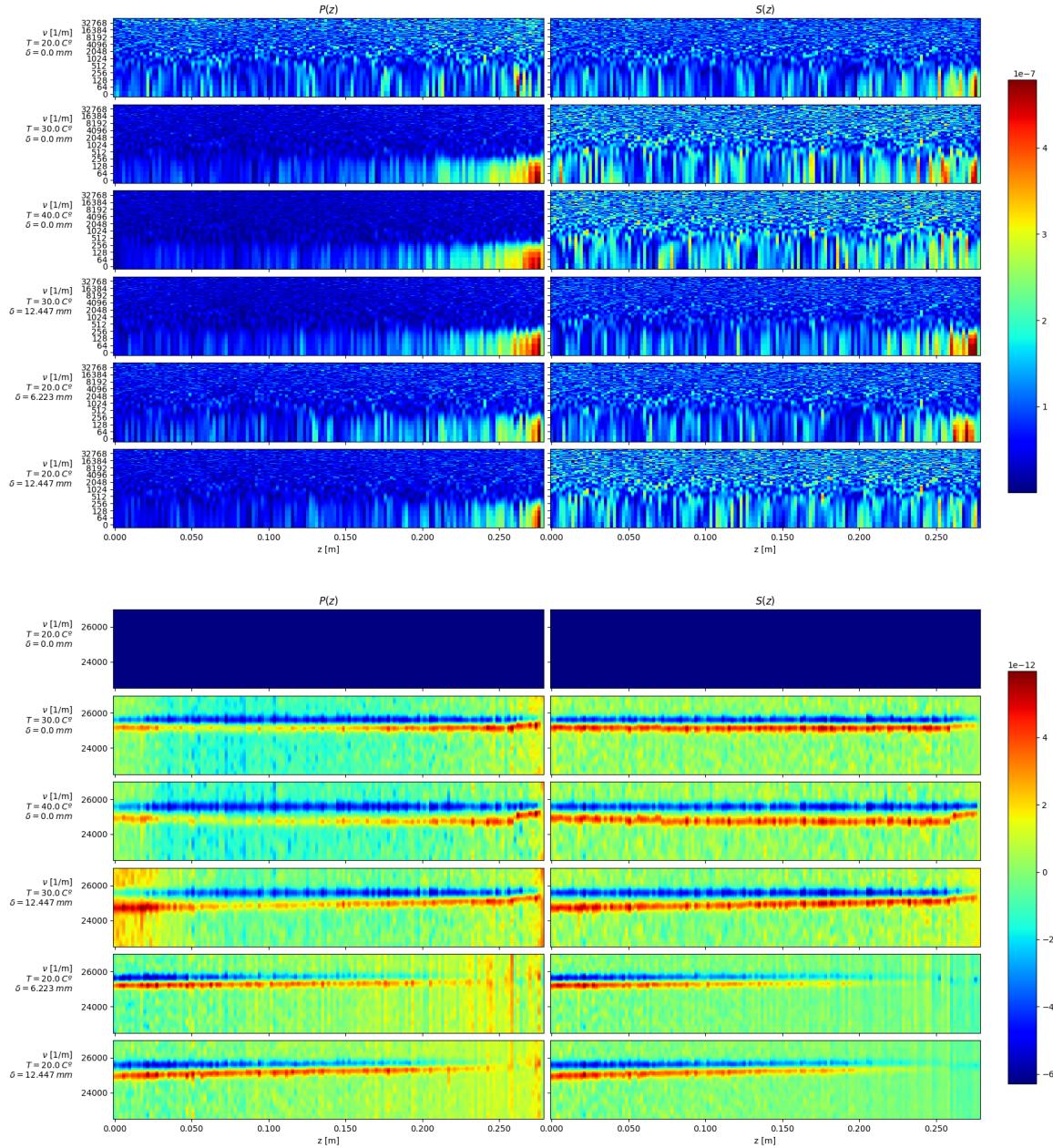


Figura 23: Espectrogramas de las señales de ejemplo computados por medio de la función *stft* de *scipy* (arriba) y comparación de correlaciones cruzadas (abajo).

En este caso sí se aprecia una traza que de alguna manera reproduce el comportamiento observado mediante el desplazamiento espectral. La apreciable diferencia de resultados motivó la elaboración de un código sencillo (véase A.1) para computar la STFT y los resultados se muestran en la Figura 24. En esta Figura se puede apreciar un clara traza que reproduce el comportamiento del desplazamiento espectral e incluso proporciona información adicional y permitirá un interpolación más precisa de cara a futuro.

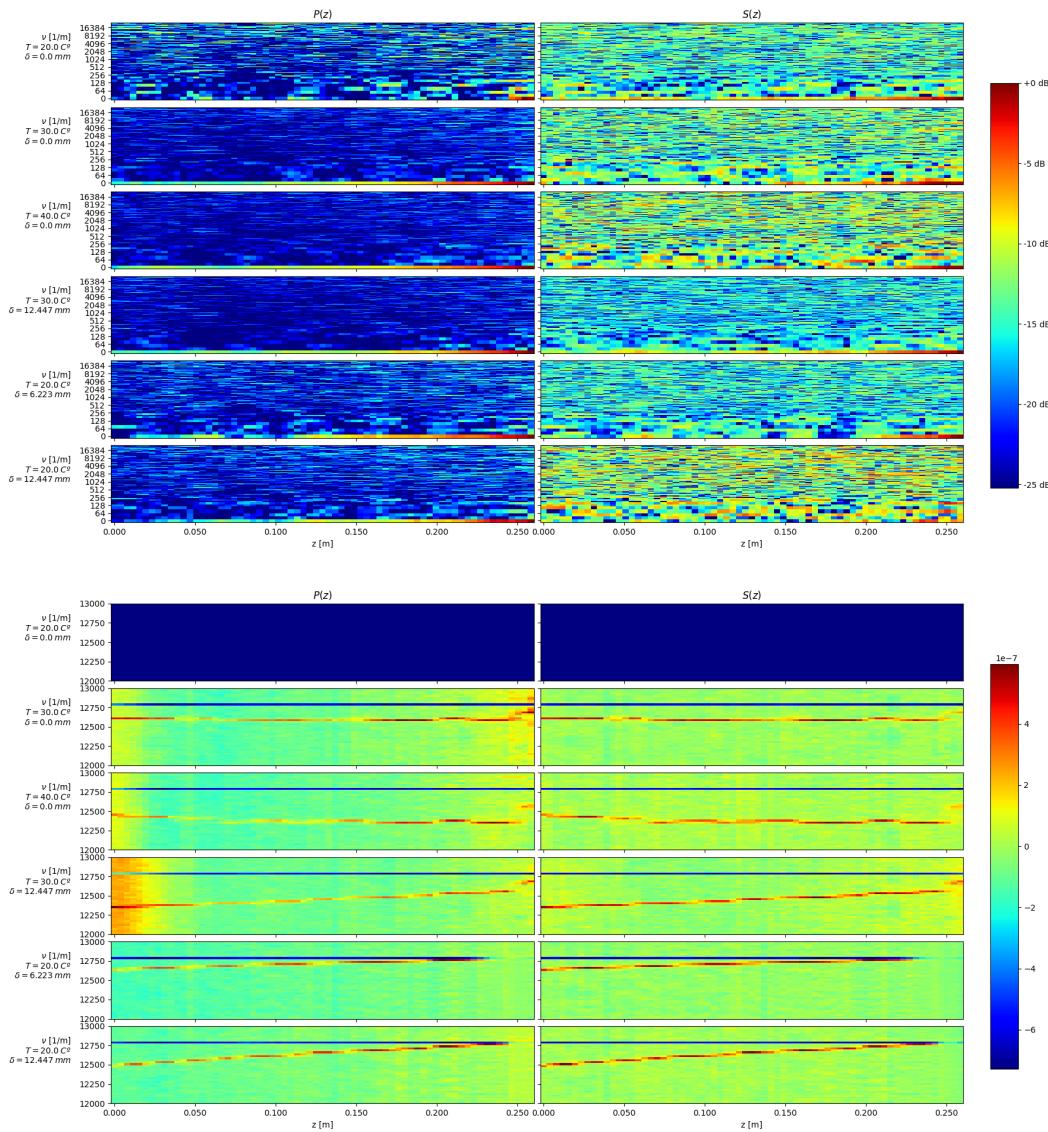


Figura 24: Espectrogramas de las señales de ejemplo computados por medio de la función `stft` creada (arriba) y comparación de correlaciones cruzadas (abajo).

También se han investigado algunas modificaciones típicas del espacio espectral tales como el espectrograma de Mel (Figura 25) y el cromograma (Figura 26). Como se puede apreciar en las Figuras mencionadas, el uso de bancos de filtros como el de Mel o el Croma eliminan la información necesaria para obtener algún resultado sin aportar nada nuevo.

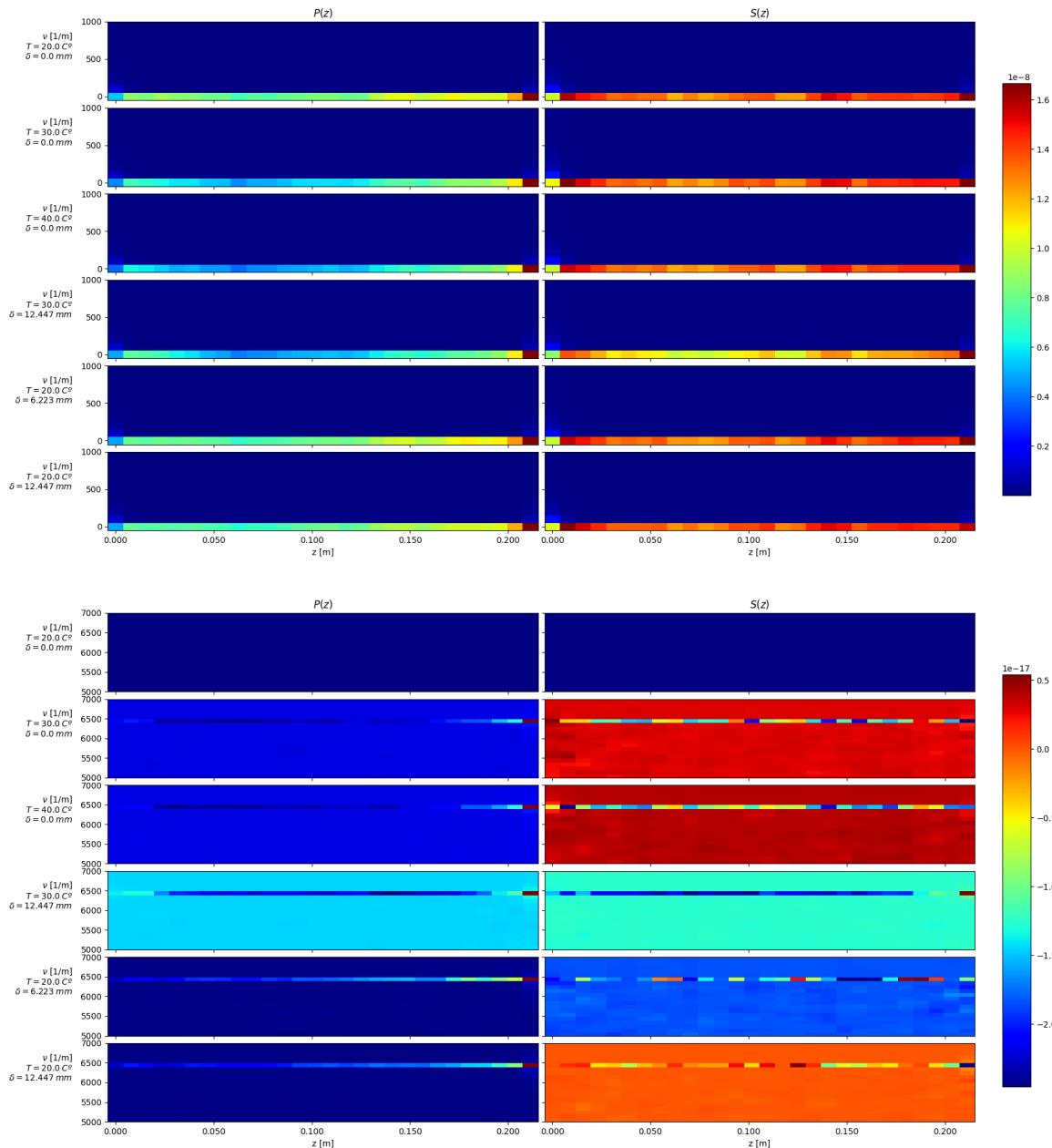


Figura 25: Espectrogramas de Mel de las señales de ejemplo computados por medio de la función `stft` creada (arriba) y comparación de correlaciones cruzadas (abajo).

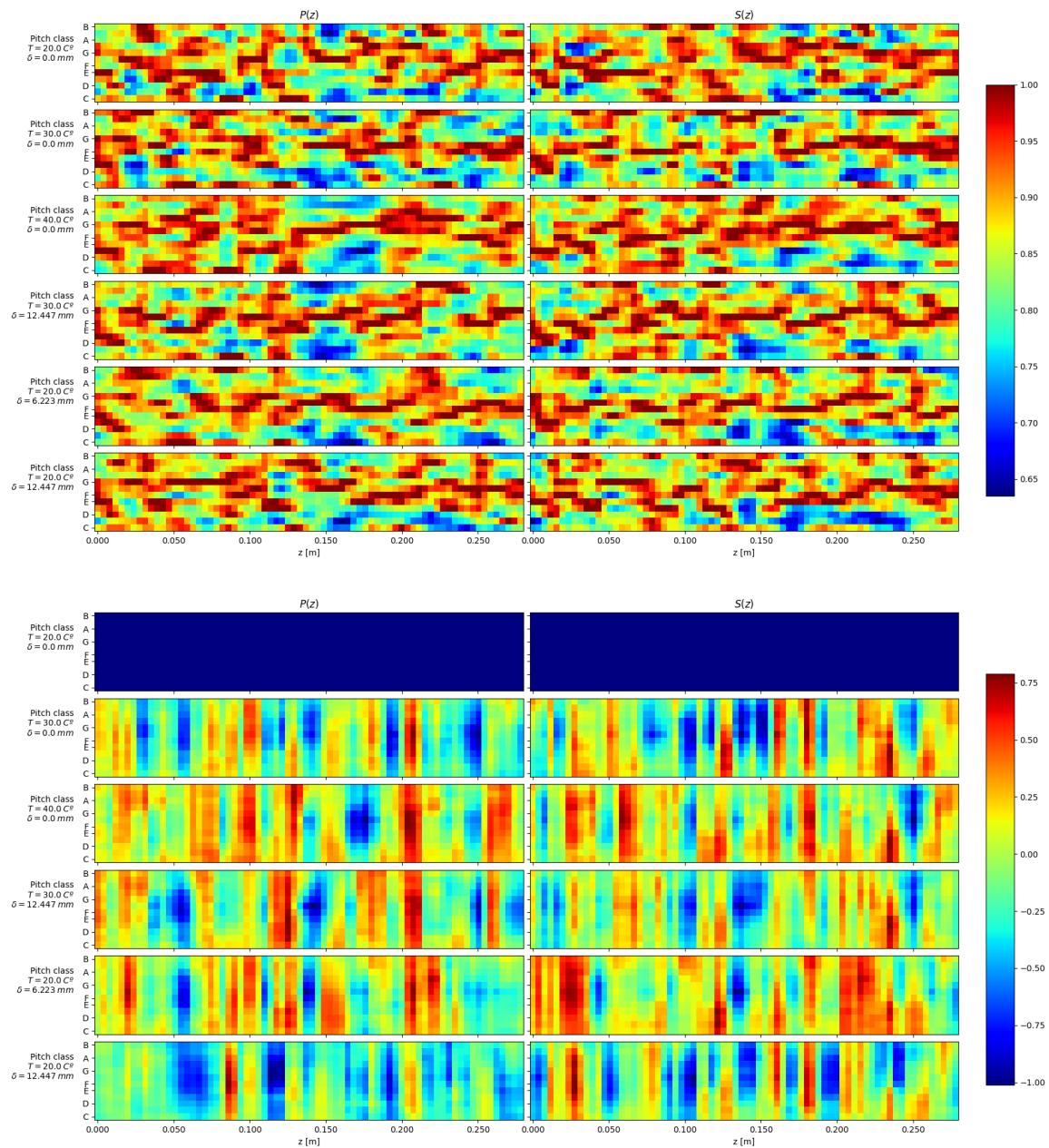


Figura 26: Cromogramas de las señales de ejemplo computados por medio de la función `stft` creada (arriba) y comparación de correlaciones cruzadas (abajo).

Por último, se ha tratado de computar la autocorrelación siguiendo un procedimiento análogo al llevado a cabo en el Caso de Estudio 2 ([1]) pero representándola en un espectrograma. Los resultados se muestran en la Figura 27 y han sido obtenidos con la función STFT desarrollada.

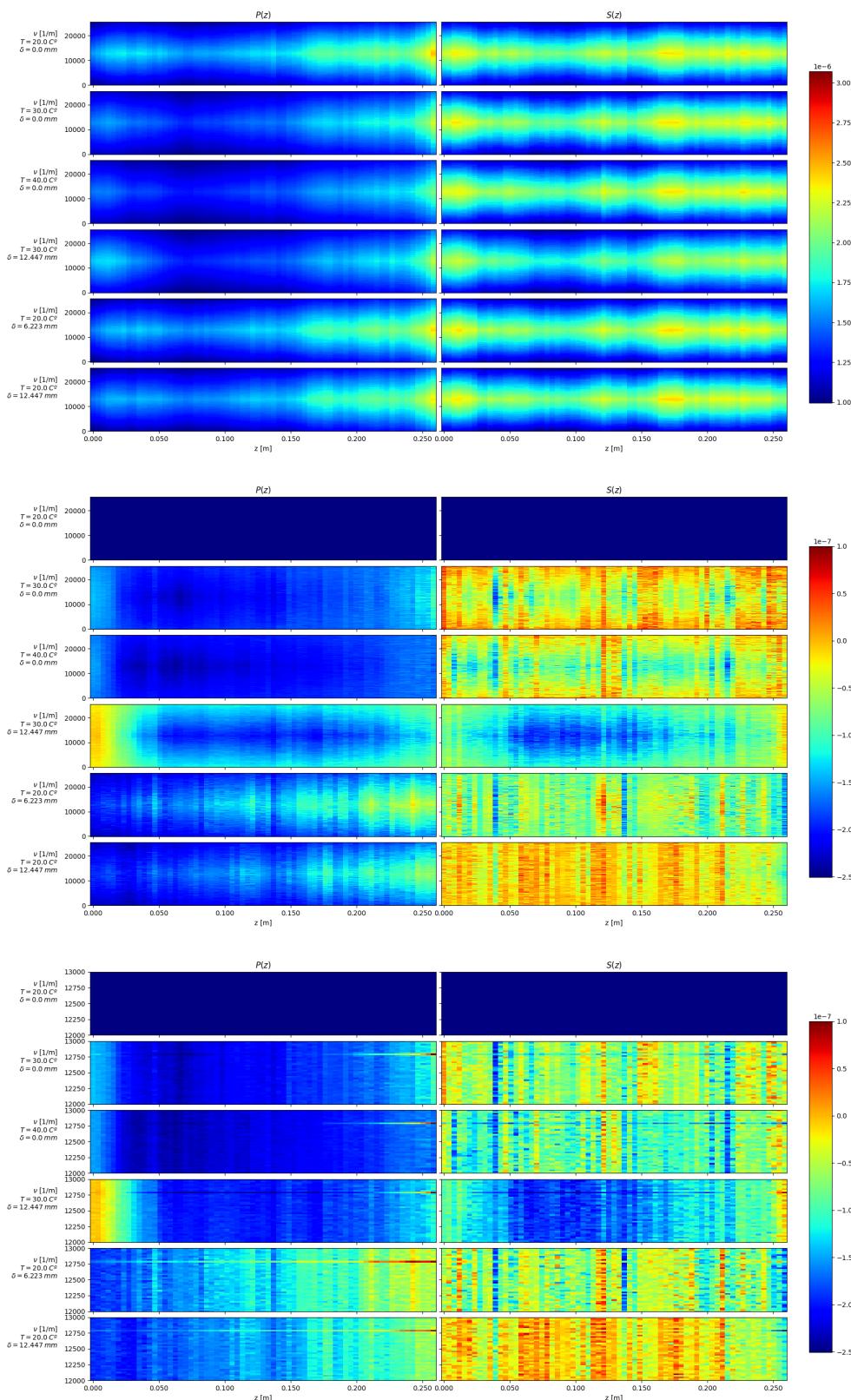


Figura 27: Autocorrelación (arriba) y comparación con dos niveles de zoom (centro y abajo). 24

Otra transformación interesante es crear un espectrograma en lugar de con el módulo de la señal con la fase. En [8] F. Léonard aplicó esta representación al análisis y monitorización de daños en estructuras con algunos resultados prometedores. En este caso se ha creado también un espectrograma de la fase (véase Figura 28) y se puede apreciar, aunque de forma leve, una traza similar a las que aparecen en la Figura 24. Este resultado indica que aunque los fenómenos asociados a la fase pueden resultar en principio algo caóticos sí tienen algo de información relacionada con el estado de la fibra óptica.

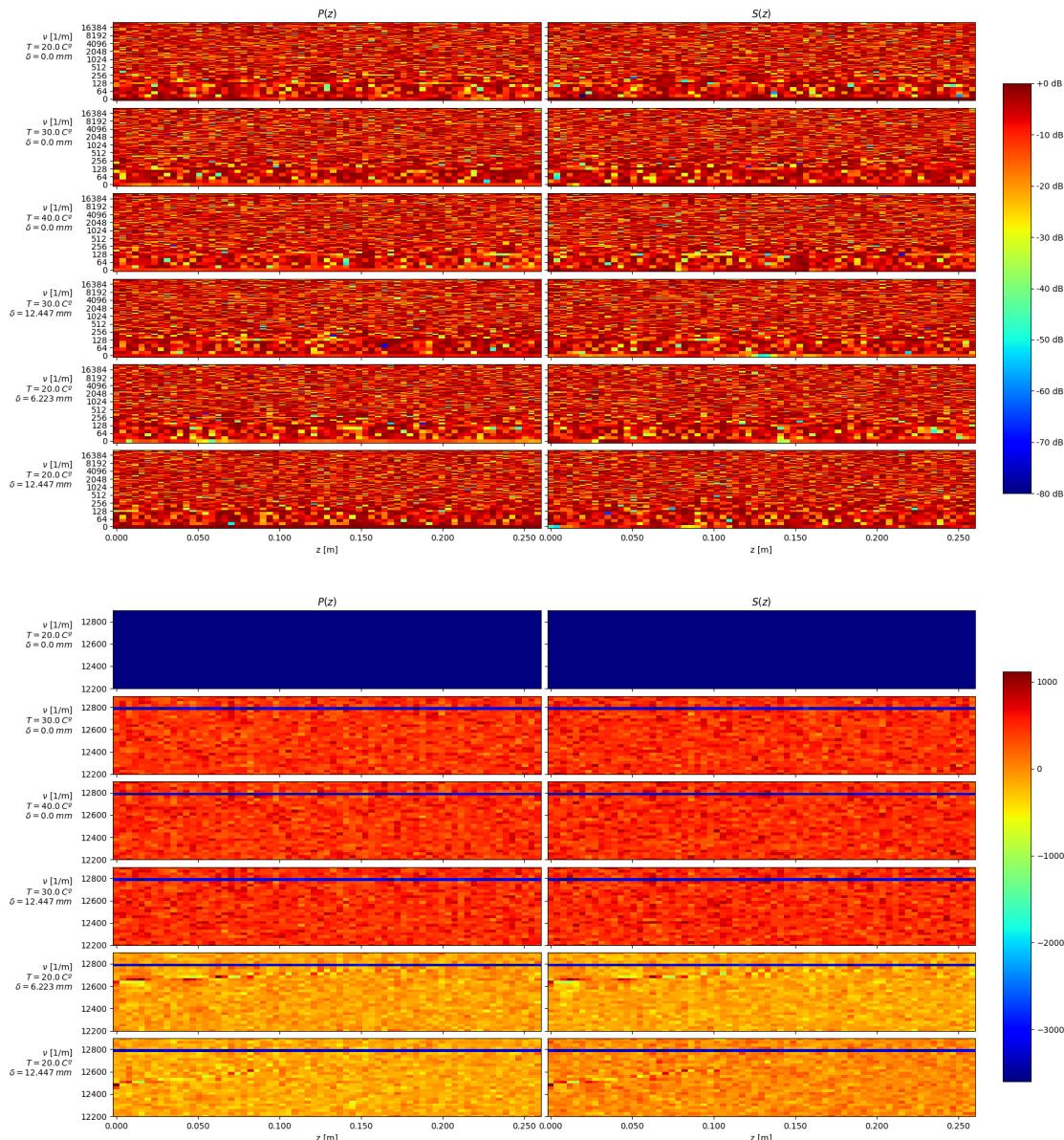


Figura 28: Espectrogramas de la fase (arriba) y comparación de correlaciones cruzadas (abajo).

Por último, se ha computado también la correlación cruzada entre los estados dos estados de la señal, de forma similar a como se realiza en [9]. Sin embargo, como se puede observar en la Figura 29, la correlación en este caso no produce una traza definida que se pueda asociar con la birrefringencia ya que se ha monitorizado una fibra óptica monomodo convencional en lugar de una que mantenga la polarización (PMF).

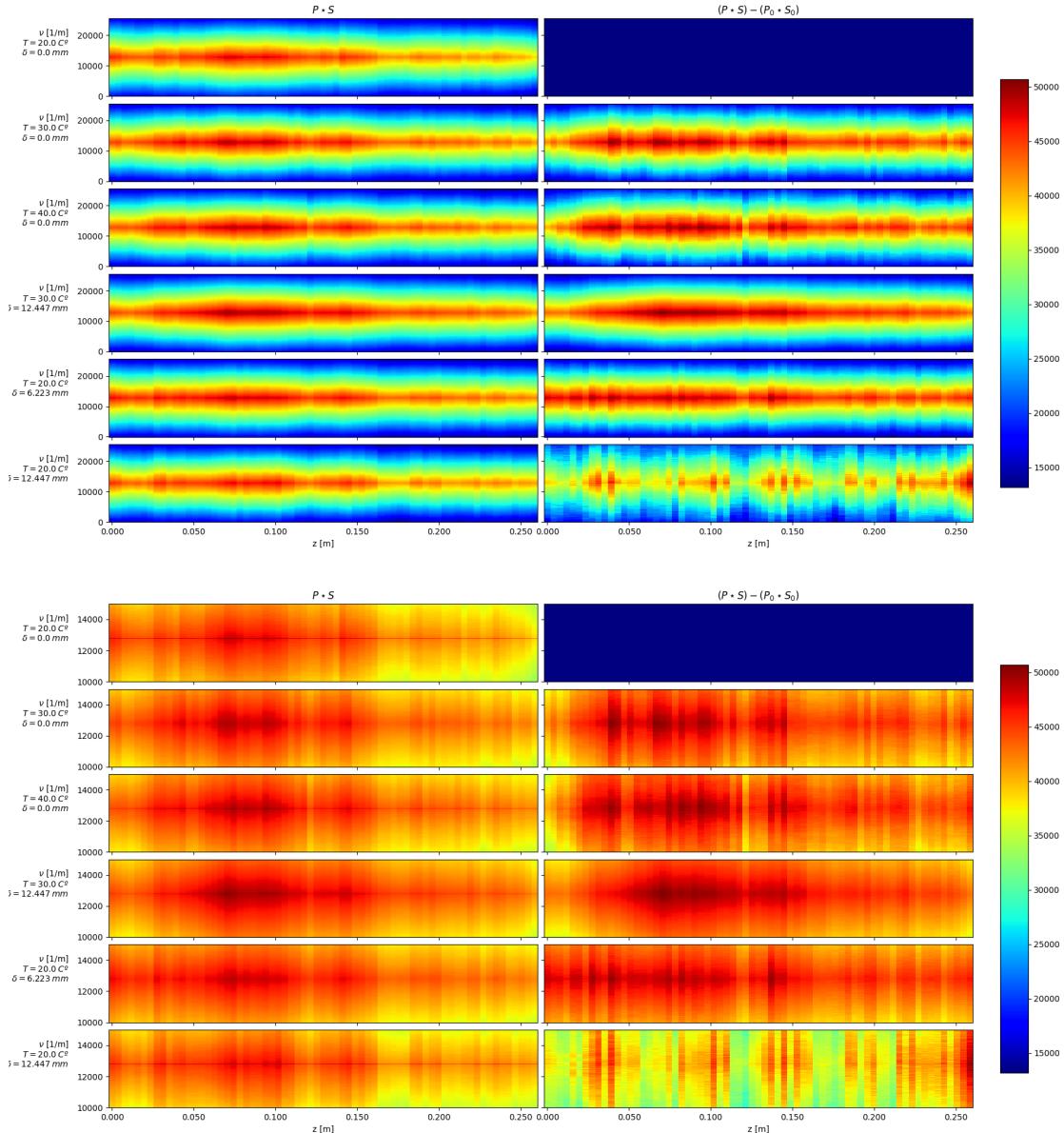


Figura 29: Correlación cruzada de los dos estados de polarización y comparación de correlaciones cruzadas con dos diferentes niveles de zoom.

4.3. Extracción de características

En vista de los resultados obtenidos en la sección anterior, se puede determinar que las técnicas convencionales de análisis de señal encaminadas a obtener una señal más clara o limpia de la distribución espectral son inefficientes para este problema ya que se trata de una señal compuesta principalmente de ruido. Sin embargo, no se abandona por completo la extracción de características espectrales ya que si se plantea, como se hizo anteriormente en el Caso de Estudio 2 ([1]), el uso de inteligencia artificial para desacoplar los fenómenos térmicos y mecánicos, resulta interesante poder extraer previamente de la señal alguna característica que una inteligencia artificial sea capaz de reconocer y asociar a una cierta salida más que plantear las señales completas sin preprocesar.

Cabe destacar que los métodos para extracción de características son innumerables y los métodos para comparar estas características entre sí son también cuantiosos, es por ello que en este apartado se mostrarán tan solo una pequeña parte de ellos.

4.3.1. Armónicos y percusivos

Para extraer más información de la señal se ha tratado de descomponer esta mediante la separación de fuentes de percusión armónica con filtrado medio (HPSS). Mediante esta técnica se obtiene por un lado la componente armónica (Figura 30) y la componente percusiva (Figura 31). Después se trató de seguir el mismo procedimiento que se ilustra en la Figura 20 y luego restar el estado de referencia al igual que en la sección anterior. Sin embargo, en ninguno de los dos casos se obtiene una traza que se pueda relacionar con la variación de temperatura o con la de deformación.

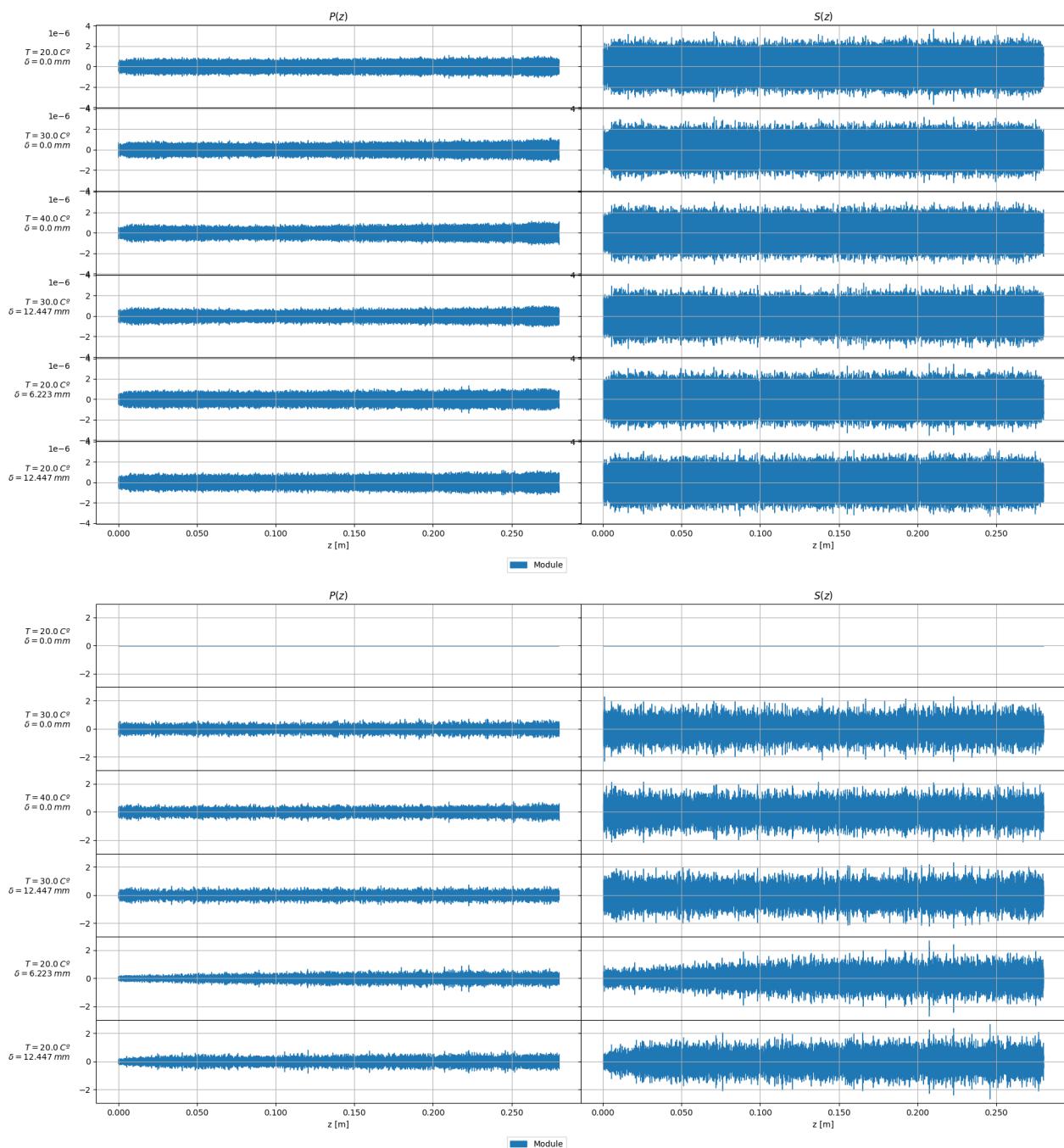


Figura 30: Parte armónica de las señales (arriba) y diferencia con la señal de referencia (abajo).

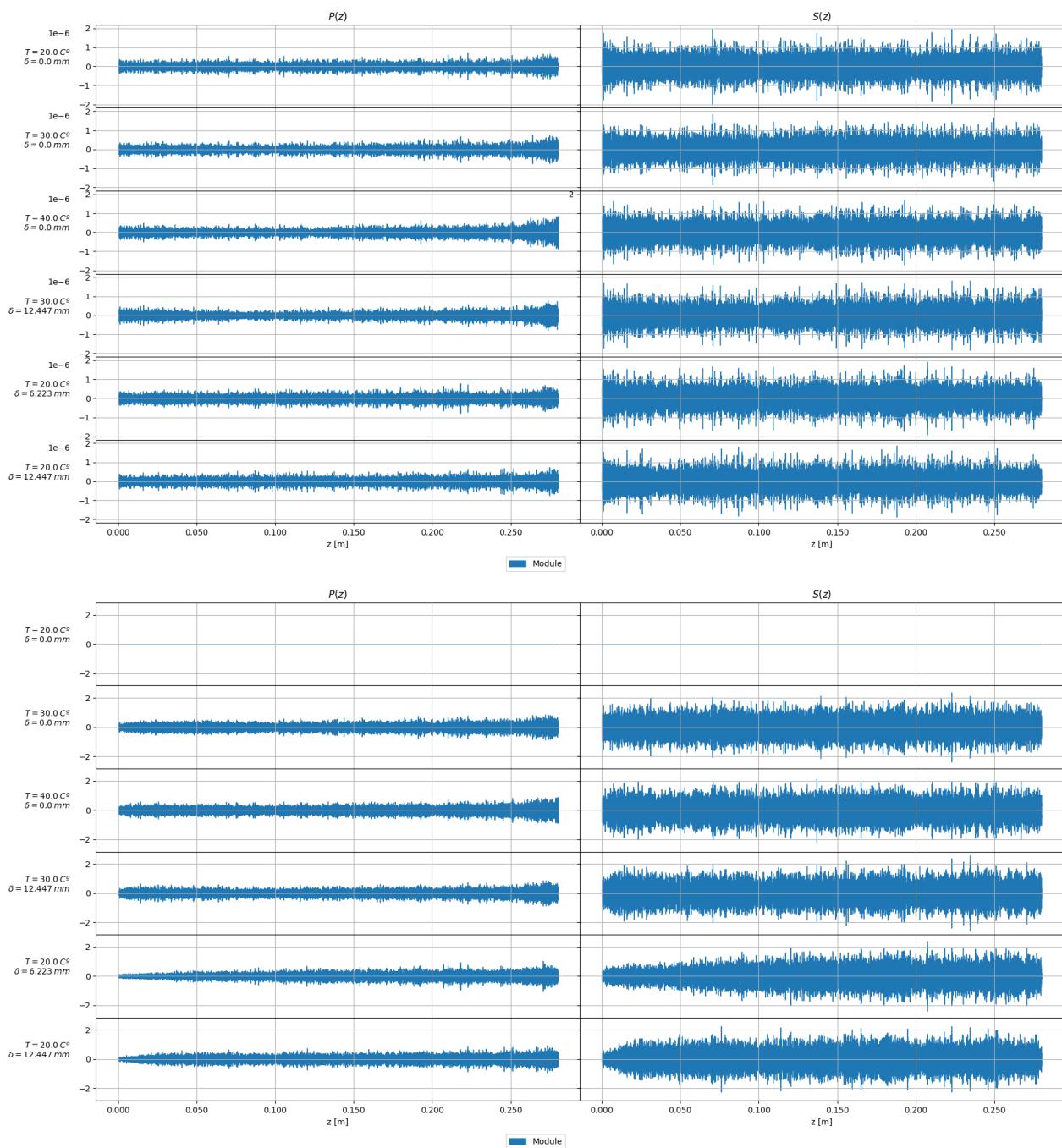


Figura 31: Parte percusiva de las señales (arriba) y diferencia con la señal de referencia (abajo).

4.3.2. Características espectrales

Para tratar de sacar más información del espectrograma se han extraído características típicas como las que se muestran a continuación:

- **Centroide espectral.** Indica dónde se encuentra el "centro de masas" del espectro. Desde el punto de vista perceptivo, tiene una sólida relación con la impresión del brillo de un sonido. (Véase Figura 32).
- **Atenuación espectral.** Es la frecuencia por debajo de la cual se encuentra un porcentaje determinado de la energía espectral total, en este caso el 85 %. (Véase Figura 33).
- **Ancho de banda espectral.** Se define como el ancho de banda de la luz a la mitad del pico máximo. (Véase Figura 34).
- **Contraste espectral.** Se define como la diferencia entre los picos y los valles del espectro. (Véase Figura 35).
- **Planicidad espectral.** También conocida como coeficiente de tonalidad o entropía de Wiener, permite cuantificar en qué medida un sonido se parece a un tono puro, en lugar de ser un ruido. (Véase Figura 36).
- **Energía media cuadrática.** La energía de una señal corresponde a la magnitud total de la señal lo que en señales de audio corresponde aproximadamente al volumen de la señal. En este caso se trabaja con la energía media cuadrática. (Véase Figura 37).

Todas estas características se han extraído de los espectrogramas que se muestran en la Figura 24 más el paso intermedio, correspondiente al espectrograma con la correlación cruzada que se describe con la Figura 20, ya que han sido los que parecen contener más información.

En vista de los resultados obtenidos se concluye que, si bien es cierto que no se puede apreciar un comportamiento claro de estos parámetros que se relacione con la temperatura y el estado de deformación, sí que se aprecia en algunos casos cierto comportamiento no aleatorio el cual es susceptible de ser analizado mediante técnicas más avanzadas que la observación visual.

Centroide espectral

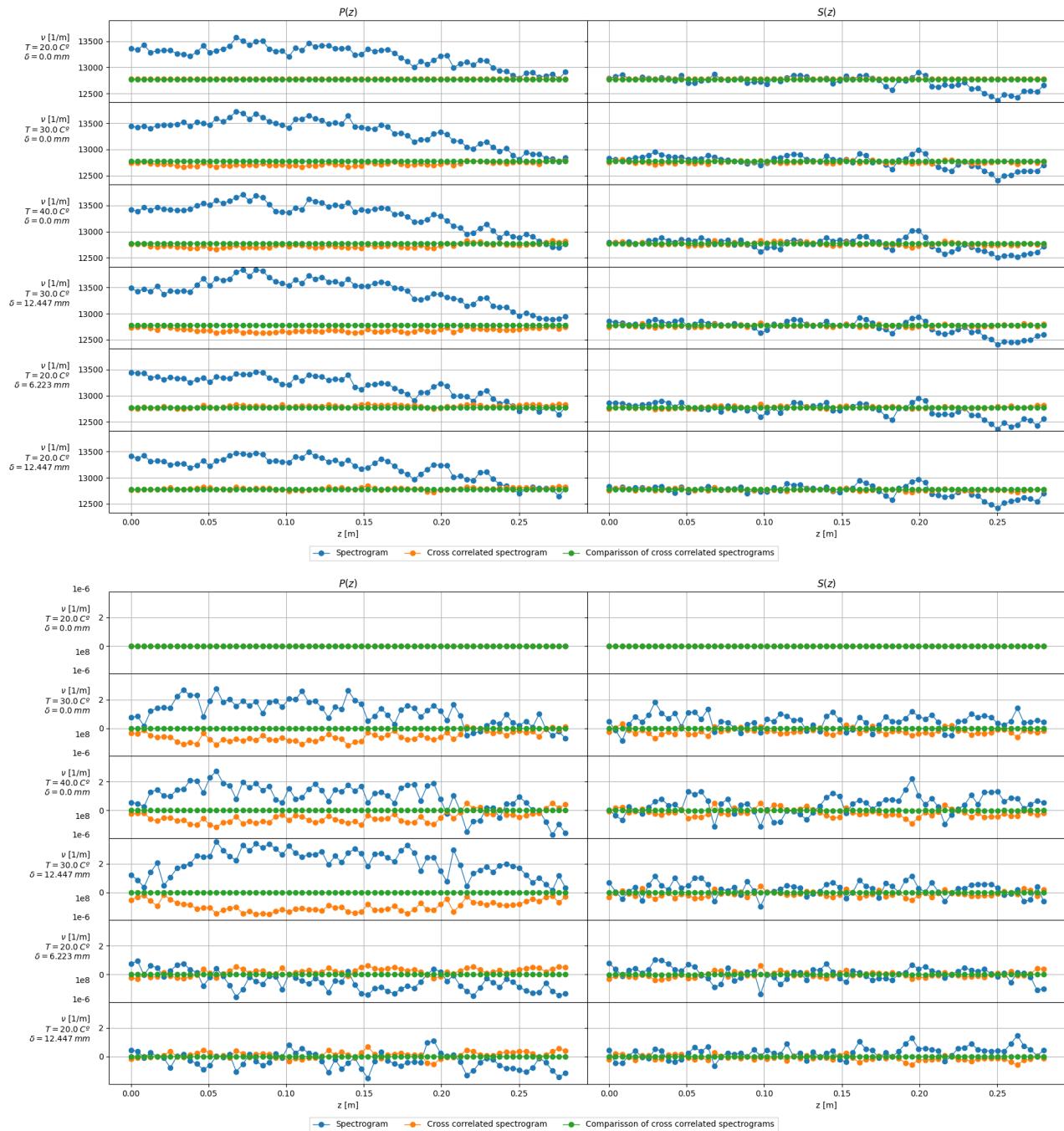


Figura 32: Centroides espectrales de los distintos espectrogramas (arriba) y diferencias con el espectrograma de referencia (abajo).

Atenuación espectral



Figura 33: Atenuación espectral de las señales (arriba) y diferencia con la señal de referencia (abajo).

Ancho de banda espectral



Figura 34: Ancho de banda espectral de las señales (arriba) y diferencia con la señal de referencia (abajo).

Contraste espectral



Figura 35: Contraste espectral de las señales (arriba) y diferencia con la señal de referencia (abajo).

Planicidad espectral

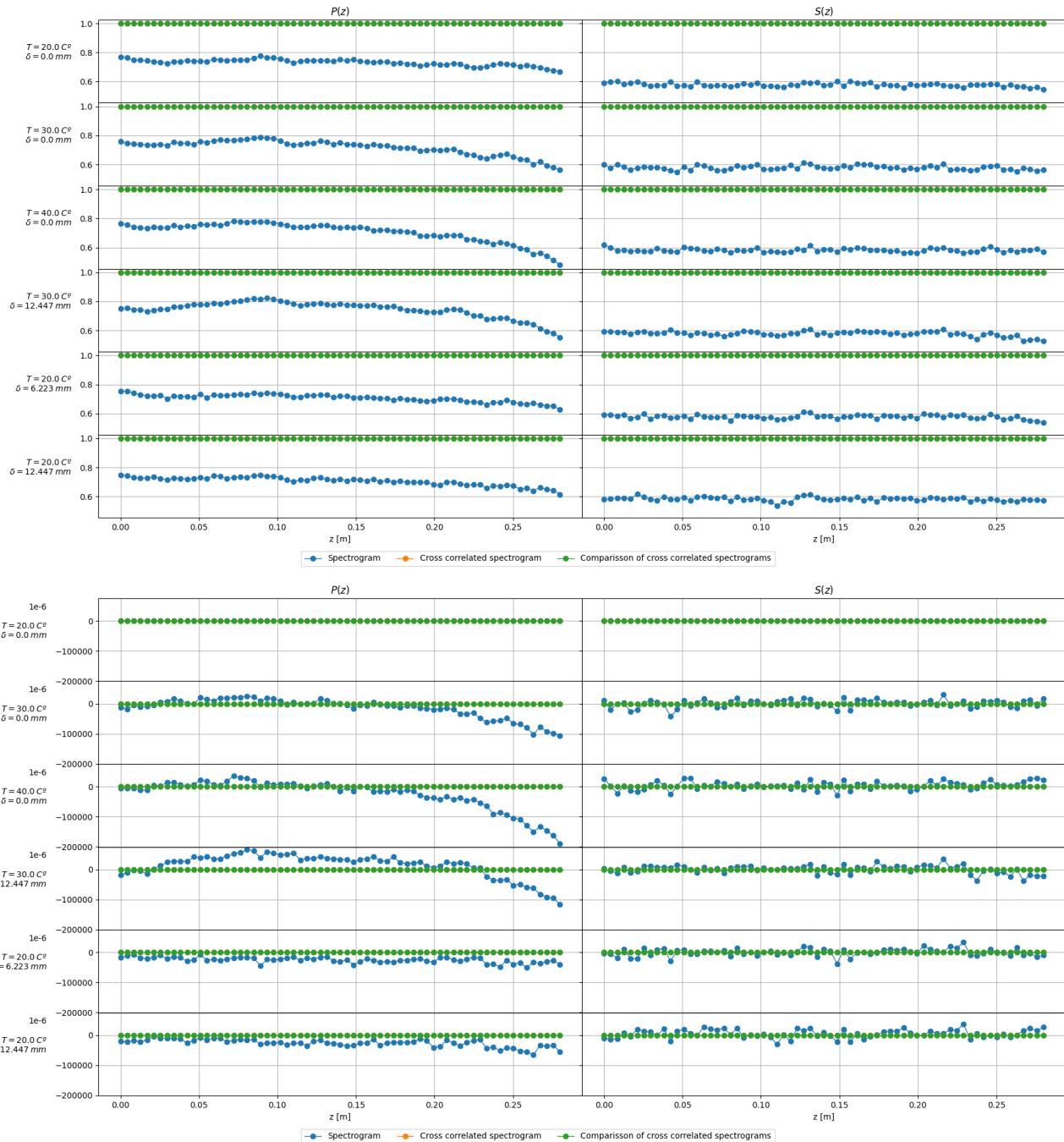


Figura 36: Planicidad espectral de las señales (arriba) y diferencia con la señal de referencia (abajo).

Energía media cuadrática

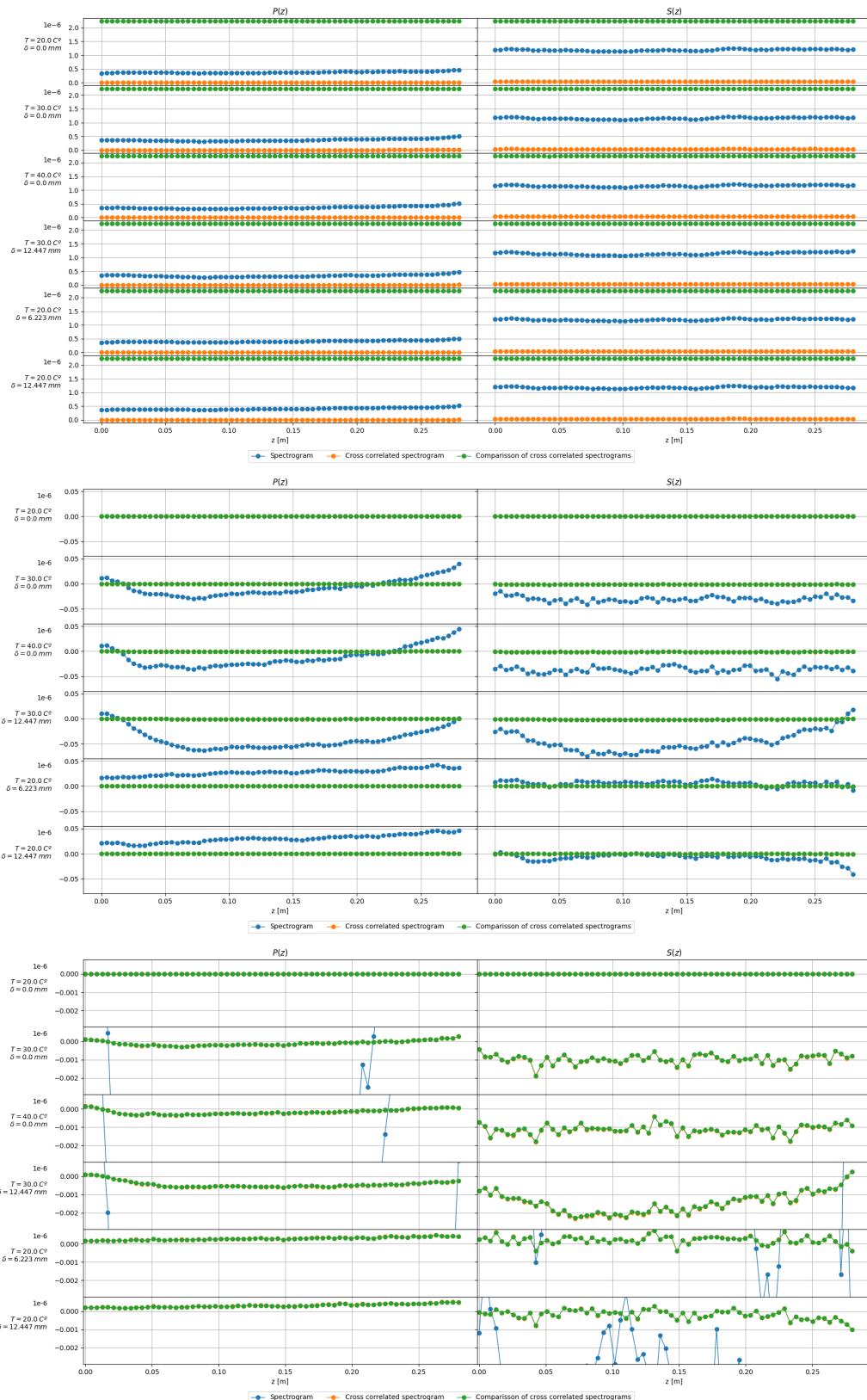


Figura 37: Energía media cuadrática de las señales (arriba) y diferencia con la señal de referencia en dos niveles de zoom (centro y abajo).

4.4. Tempograma

Para indagar un poco más sobre la correlación de señales, se ha querido también crear un tempograma de la señal. Un tempograma es una transformación que permite obtener información sobre el ritmo de la señal y se computa por medio de la autocorrelación local de la *onset strength envelope* de la señal.

El tempograma obtenido es el que se muestra en la Figura 38 y aunque del mismo no se puede extraer a simple vista mucha información sus características, es decir, la autocorrelación local media y la autocorrelación global, sí que parecen mostrar también cierto comportamiento diferente al variar el estado de la fibra óptica tal y como puede observarse en la Figura 39.

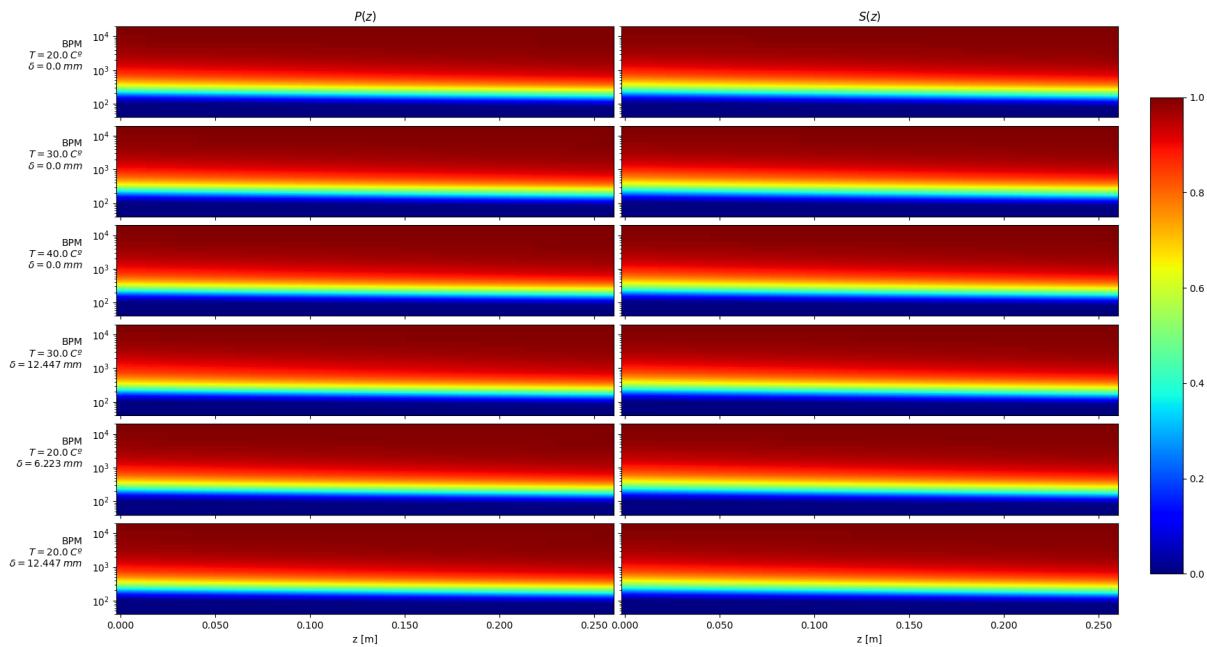


Figura 38: Tempogramas de las señales de ejemplo.

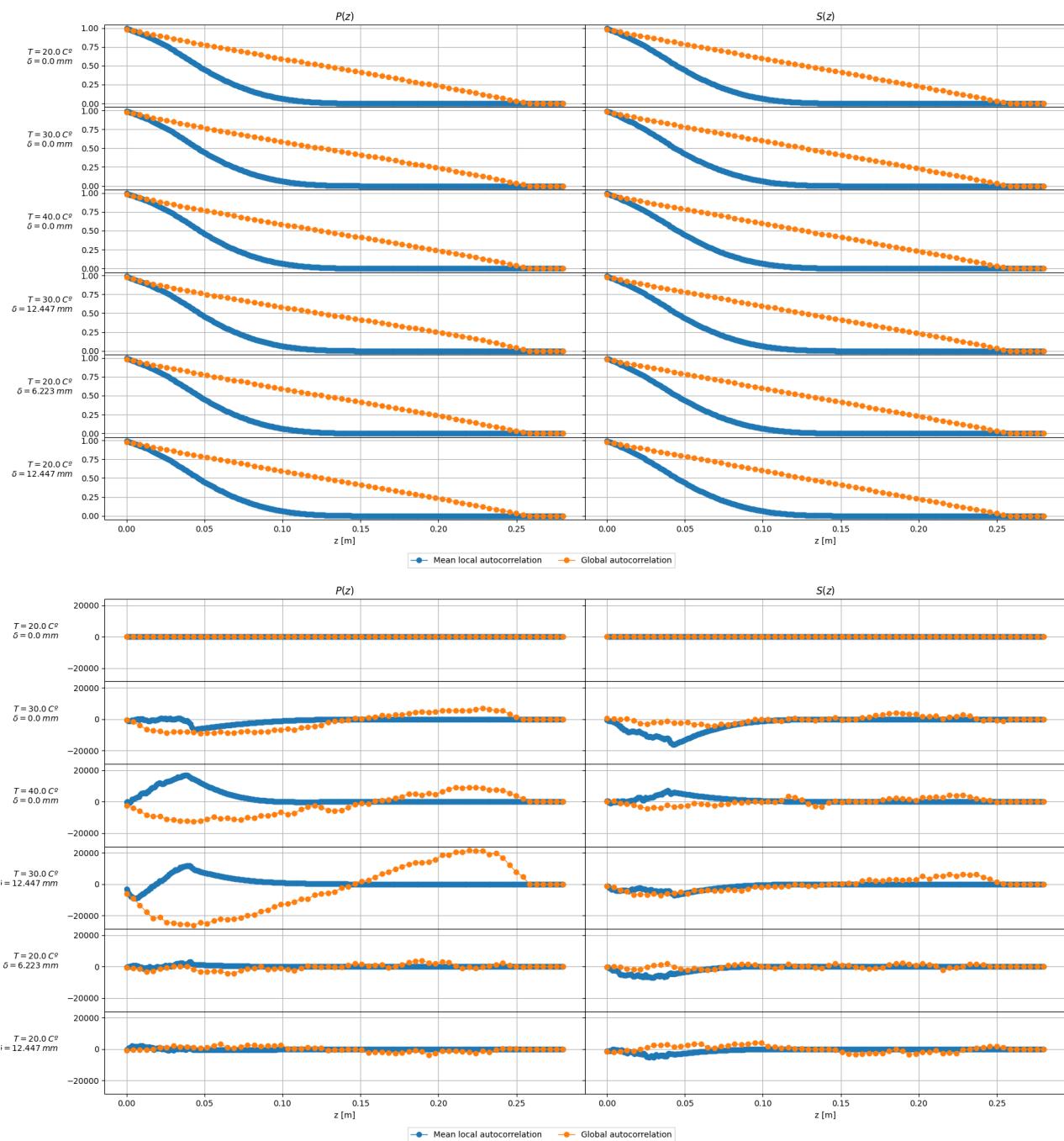


Figura 39: Características del tempograma (arriba) y diferencia entre ellas y la de referencia (abajo).

4.5. Transformación Z-Chirp

La transformada Z-Chirp (CZT) es una generalización de la transformada discreta de Fourier (DFT). Mientras que la DFT muestrea el plano Z en puntos uniformemente espaciados a lo largo del círculo unitario, la transformada Z chirp muestrea a lo largo de arcos espirales en el plano Z, correspondientes a líneas rectas en el plano S (correspondiente a la transformada de Laplace). La DFT, la DFT real y la DFT zoom pueden calcularse como casos especiales de la CZT.

En este caso se ha usado esta transformación tanto para transformar la señal completa como para sustituir la transformada rápida de Fourier (FFT) en el STFT desarrollado. En este último caso, como se puede observar en el Anexo B.1.3, los resultados son idénticos a los anteriormente obtenidos y además el tiempo de cómputo es mucho mayor. Por otra parte, los resultados obtenidos de transformar las señales completas pueden consultarse también en el Anexo B pero se han querido destacar un par de ellos.

Si se observa el nivel de brillo del estado de polarización P en la Figura 40 se puede observar que a medida que aumenta la temperatura disminuye el contraste de la comparación. Esto quiere decir que este mapa tendrá una menor energía. Luego, si se computa la energía media cuadrática (véase Figura 41) se puede observar también cierta tendencia relacionada con la temperatura. De nuevo no se puede establecer un criterio de proporcionalidad pero este resultado podría ser un punto de partida para futuras investigaciones.

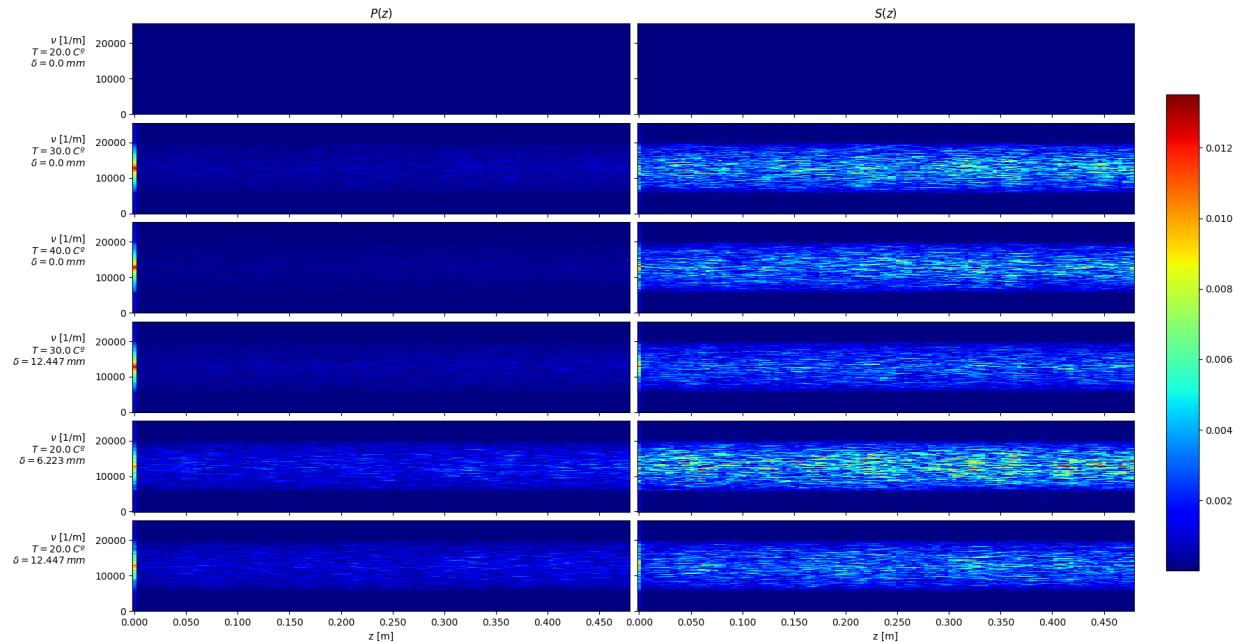


Figura 40: Comparación de autocorrelaciones.

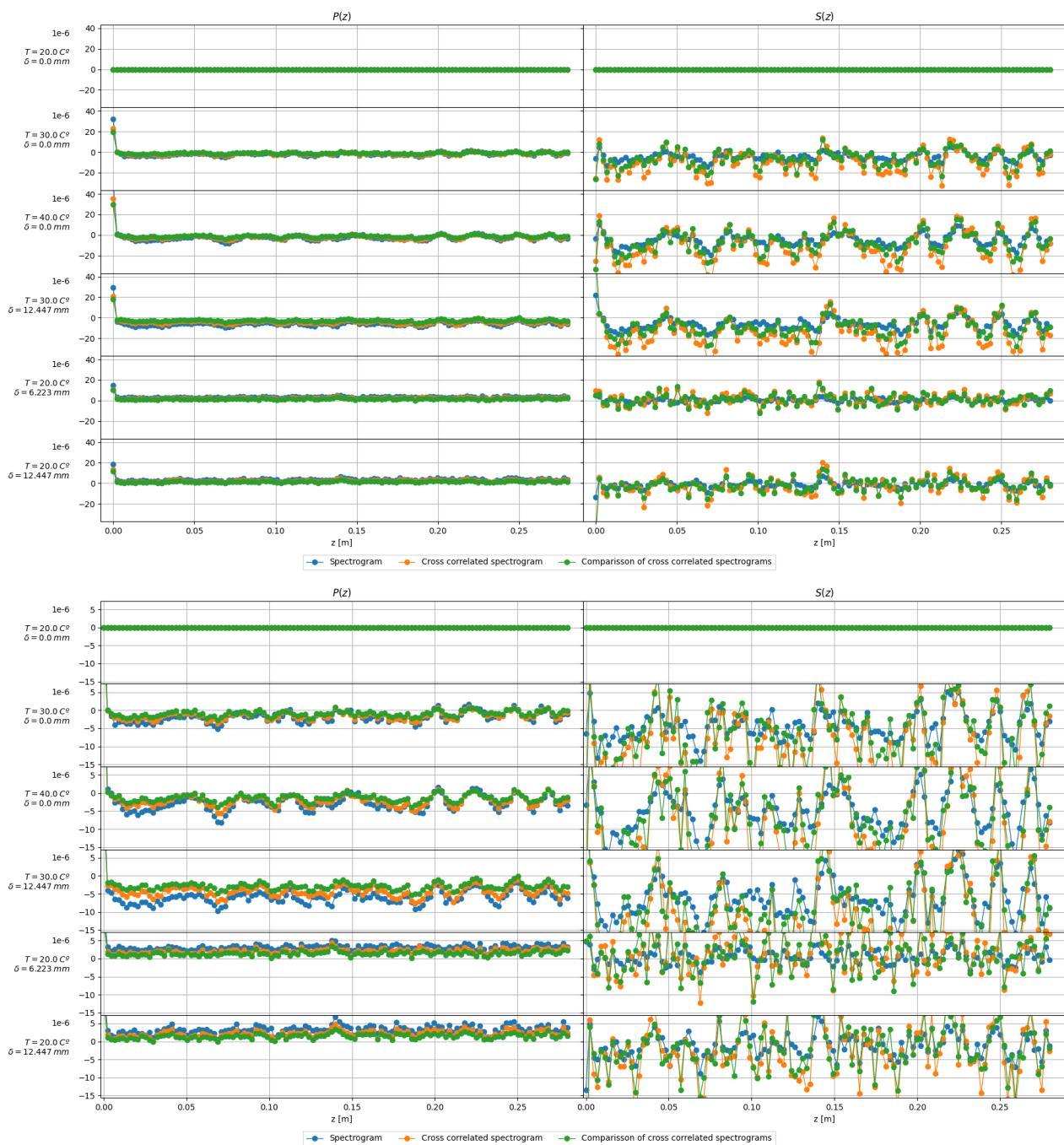


Figura 41: Comparación de energía media cuadrática con dos niveles de zoom.

5. Análisis del modelo de Inteligencia Artificial actual

La Inteligencia Artificial Explicable (XAI) consiste en una serie de métodos enfocados a convertir los resultados ofrecidos por una Inteligencia Artificial (IA) de forma que puedan ser entendidos por los humanos. Contrastó con el concepto de "caja negra" del aprendizaje automático, en el que ni siquiera sus diseñadores pueden explicar por qué una IA llegó a una decisión concreta. Gracias a los métodos de XAI se pueden extraer características que permiten confirmar el conocimiento existente, cuestionar el conocimiento existente y generar nuevas hipótesis.

En este caso la XAI permite explicar cómo el modelo desarrollado en el Caso de Estudio 2 ([1]) interpreta las correlaciones de las señales para predecir temperatura y deformación lo que se ha hecho, lo que se hace en este momento, lo que se hará a continuación y desvelar la información en la que se basan las acciones. Para implementar los métodos de XAI sobre este modelo se ha recurrido al repositorio *Lime-For-Time* (véase [10]) en el cual se usa la librería *LIME* ([11]) para analizar series temporales.

El análisis consiste en tomar una señal de ejemplo, que en este caso es la que se muestra en la Figura 42, y dividirla en segmentos, que en este caso han sido 120, dada la composición de la señal.

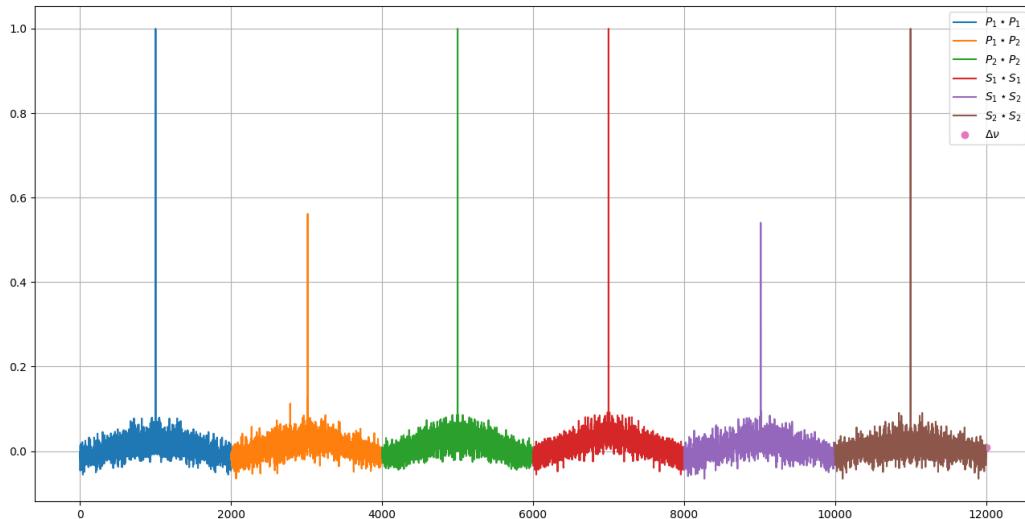


Figura 42: Señal de ejemplo (sin normalizar).

Luego, se estudia la red neuronal como un clasificador en el cual cada segmento constituye una clase y que contribuye en mayor o menor medida a la decisión final. A partir de la señal de ejemplo se efectúan múltiples variaciones de los parámetros para interpretar cómo se comporta el modelo a las distintas entradas. A partir de estos datos se puede determinar qué relevancia tiene cada uno de los segmentos. Tomando los 12 segmentos más relevantes y exponiendo sus pesos en un histograma se confeccionan las imágenes que se muestran en la Figura 43.

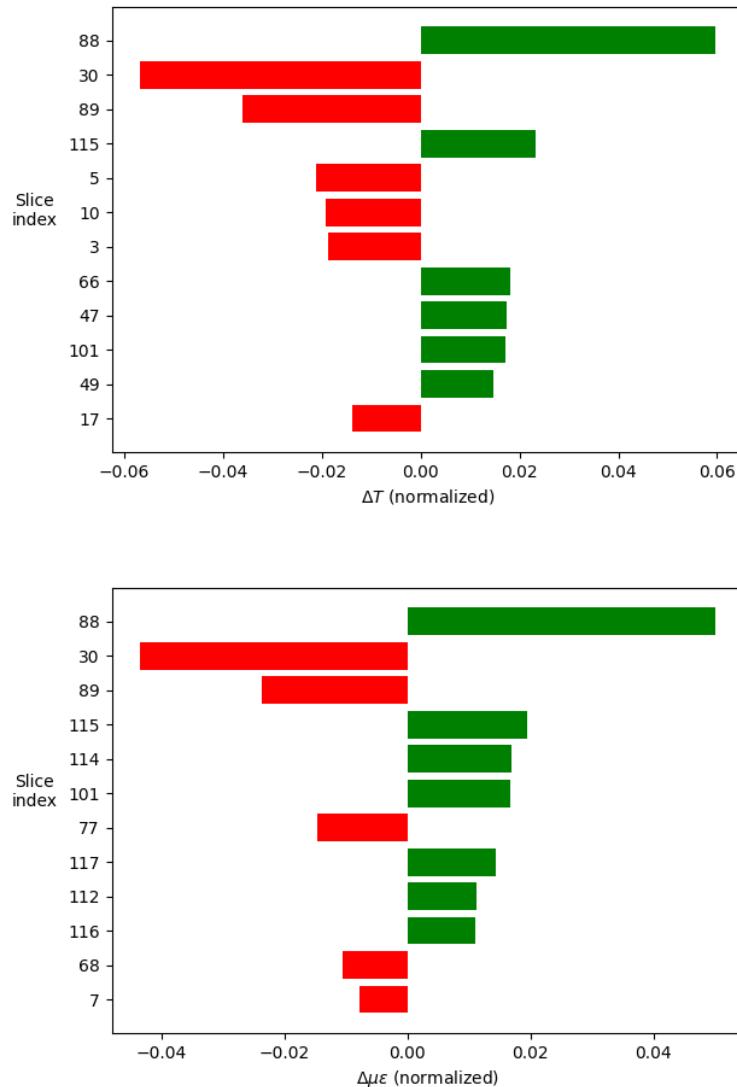


Figura 43: Peso en la decisión final de cada uno de los segmentos en orden de importancia, a la izquierda para la decisión de temperatura y a la derecha para la de deformación.

Si se muestran esos segmentos sobre la señal, se puede ver qué regiones son las más relevantes. En este caso, para representar la importancia se ha asignado una opacidad según los pesos anteriormente mostrados en los histogramas. El resultado de esta representación gráfica es la que aparece en la Figura 44.

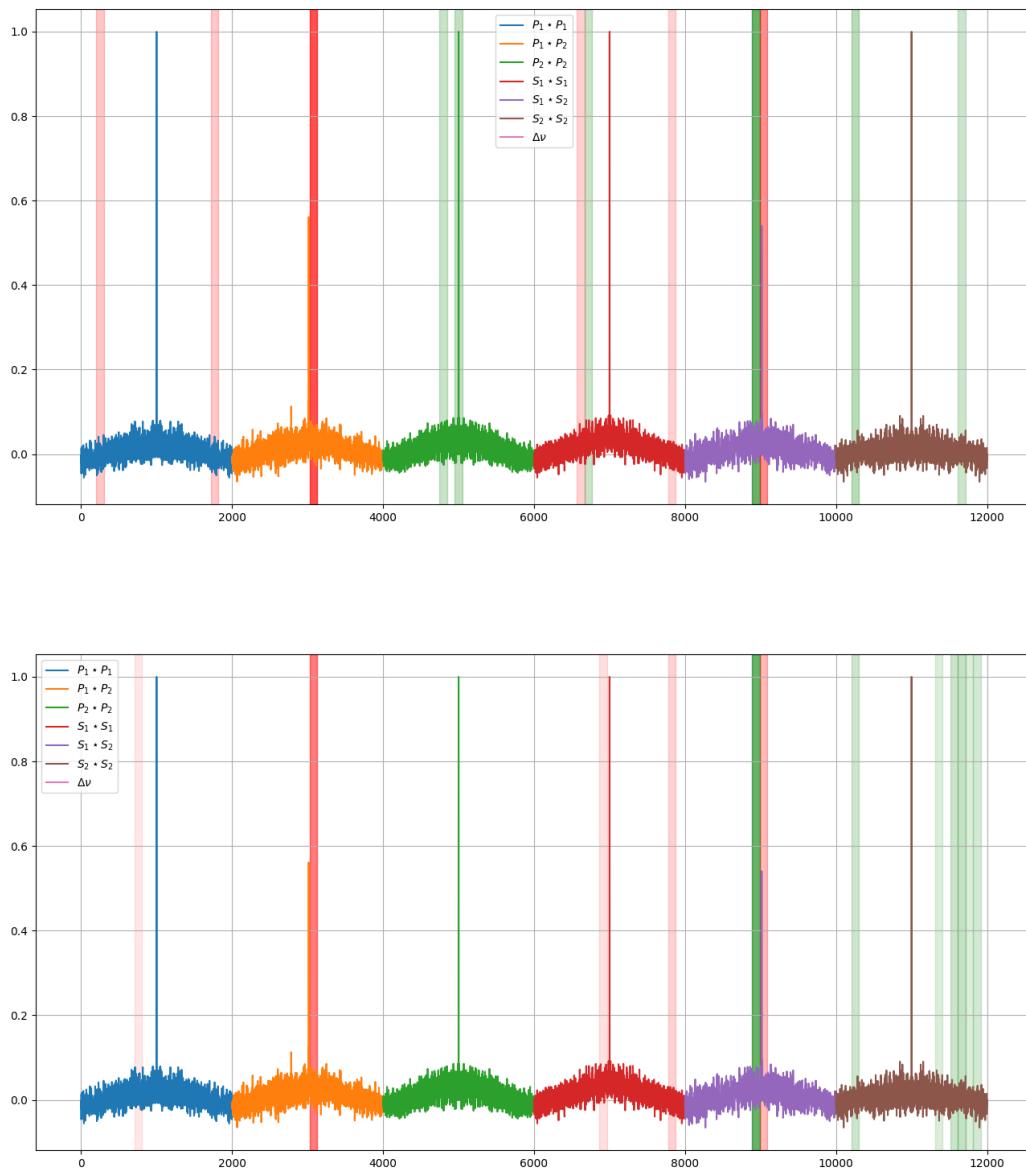


Figura 44: Regiones más relevantes de la señal para cada una de las predicciones del modelo, arriba para la predicción de temperatura y abajo para la de deformación.

Los resultados permiten observar cómo la inteligencia artificial reconoce el desplazamiento espectral, comparando los valores de los segmentos 88, 30 y 89, que corresponden a la zona central de las correlaciones cruzadas entre las dos señales comparadas. Por otra parte, resulta interesante estudiar el resto de valores ya que es ahí donde reside la capacidad discernir entre efectos térmicos y mecánicos.

Comparando las dos imágenes de la Figura 44 se puede observar cómo, para determinar la temperatura, el modelo toma dos regiones simétricas de la autocorrelación del estado de polarización P de la primera señal y unas regiones similares en la autocorrelación del estado de polarización S de la segunda. Por otro lado, para determinar las deformaciones, se observa que los últimos valores de la autocorrelación del estado de polarización S de la segunda señal se interpretan mediante algún tipo de integral.

Por otra parte la decisión relacionada con la temperatura parece centrarse más en el comportamiento del pico de la autocorrelación del estado de polarización P de la segunda señal mientras que las deformaciones se centran en el pico de la autocorrelación del estado de polarización S de la primera.

Esta información permite determinar que la autocorrelación de las señales sí aporta una información adicional que puede ser clave a la hora de determinar, de forma inequívoca a qué temperatura y estado de deformación se encuentra la fibra óptica. Por otra parte, la forma en la que el modelo interpreta la señal indica que las características extraídas de los espectrogramas en la Sección ?? pueden jugar un papel importante de cara a futuro.



6. Automatización del proceso de adquisición de muestras

Bien sea para la obtención de un dataset más completo y extenso con el cual entrenar una inteligencia artificial o bien sea para poder realizar un análisis de señal con una mayor cantidad de señales, la automatización del proceso de adquisición resulta necesaria y es por ello que en la realización de este trabajo se ha tratado de solventar este problema.

Como las variables de interés para este tipo de sensores son la temperatura y el estado de deformación es necesario poder someter la fibra óptica a incrementos de temperatura y deformación conocidos. Por tanto se ha modificado una estufa lo suficientemente grande como para poder contener los útiles necesarios para someter un segmento de fibra óptica a diferentes niveles de deformación. En la Figura 45 se muestra el interior de la estufa en cuestión con una pletina empotrada en un extremo y con un peso colgado en el otro.



Figura 45: Estufa modificada para la adquisición automática de señales.

Se ha modificado esta estufa en primer lugar porque no funcionaba y en segundo lugar porque al ser un modelo antiguo su construcción es simple, robusta y accesible. El diseño final permite el control de la temperatura y la adquisición de datos de forma simultánea. Por otro lado, los pesos han de ser incorporados manualmente.

- Los elementos con los que cuenta para el control de temperatura son una resistencia en forma de lazo de 47Ω , un ventilador AC de 220V/35W y un termopar tipo J. Excepto el termopar, que ha sido sustituido por uno tipo K, el resto de elementos han sido comprobados e incluidos en el diseño final.
- La electrónica original de la estufa ha sido sustituida por una Arduino Nano ([12]) al que se le ha añadido un módulo de sensor de temperatura ([13]) basado en el chip MAX31855 ([14]). Además la Arduino Nano actúa sobre un relé de estado sólido ([15]) el cual enciende y apaga la resistencia de acuerdo a la temperatura seleccionada mediante conexión serial (por puerto USB). Para alimentar la Arduino se ha añadido una fuente de alimentación de corriente continua ([16]).
- Además se ha desarrollado un software para que la estufa sea capaz de enviar y recibir datos simultáneamente mediante un protocolo de interrupciones mientras que controla la temperatura mediante un control PID cuyo diseño se detalla a continuación.

6.1. Esquema eléctrico

Una vez conectados todos los elementos entre sí, el esquema eléctrico resultante es el que se muestra en la Figura 46.

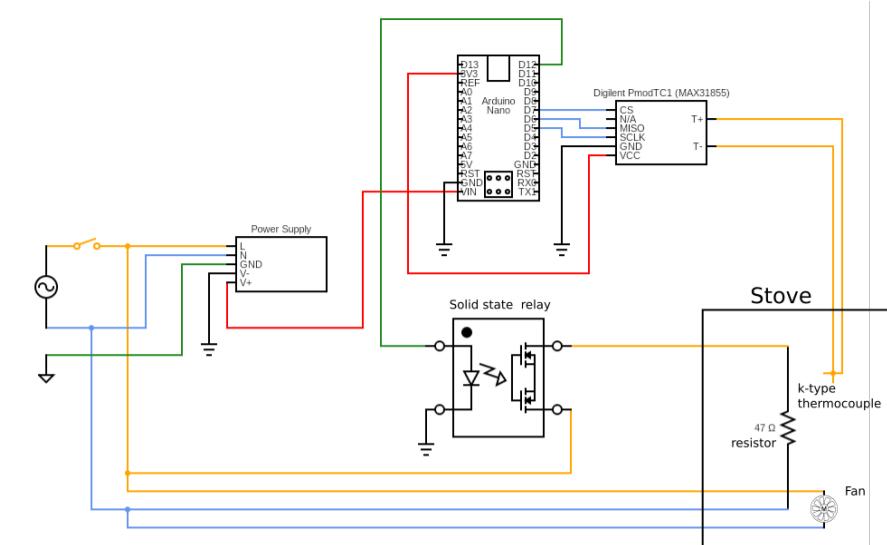


Figura 46: Esquema eléctrico de la estufa.

6.2. Calibración del módulo de temperatura

El módulo de temperatura instalado, al haber sido colocado en la parte posterior de la estufa, junto a la electrónica; y al haberse usado otro cable termopar era susceptible de marcar una temperatura distinta a la esperada. Es por ello que se ha tomado un termómetro calibrado para su comprobación y las lecturas de ambos instrumentos se muestran en la Figura 47.

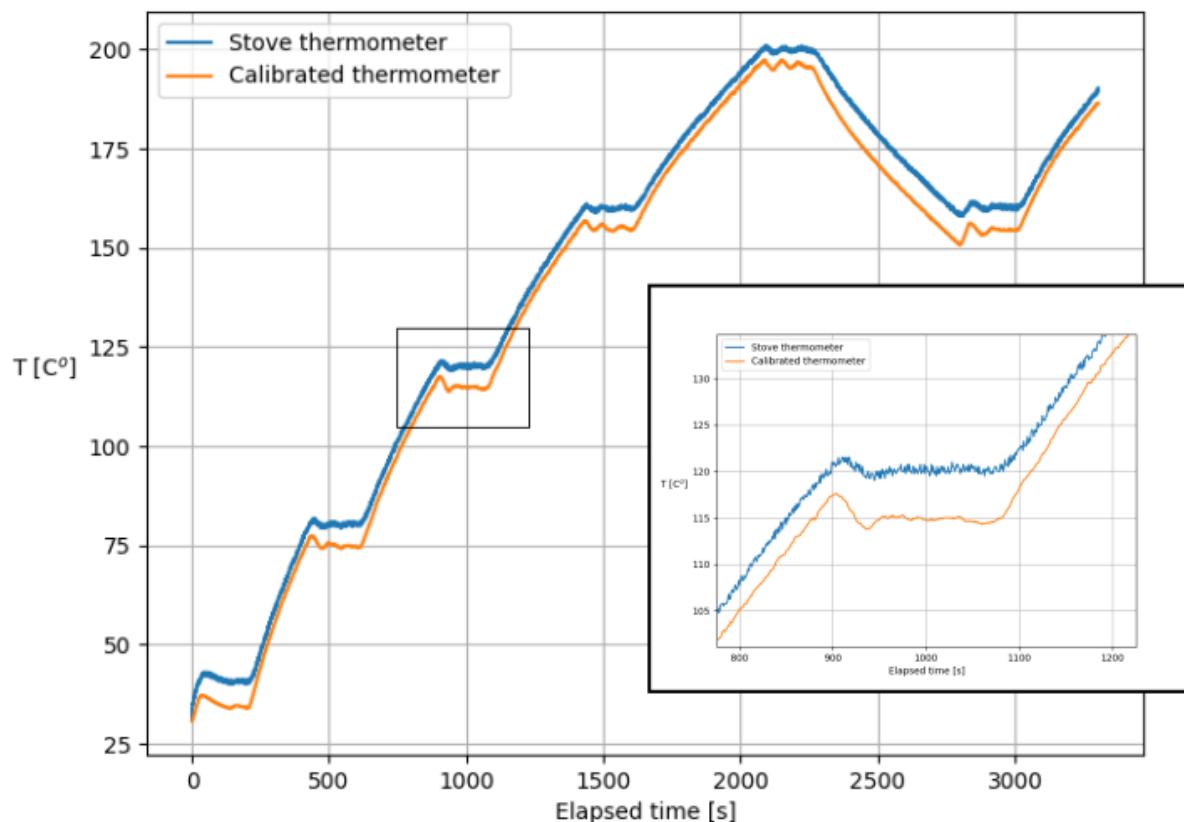


Figura 47: Lecturas del módulo de temperatura sin calibrar y las del termómetro calibrado.

Comparando las lecturas de ambos termómetros se concluye que las lecturas del módulo de la estufa han de ser corregidas de acuerdo a la siguiente ley:

$$T^* = \frac{T - 6.15 C^\circ}{0.98}, \quad (11)$$

donde T es la lectura del módulo de temperatura, T^* es la temperatura una vez corregida. La regresión lineal ha sido ajustada un coeficiente de determinación $r^2=1.00$, y las lecturas, una vez corregidas se muestran en la Figura 48. Si bien es cierto que en las zonas en las que se trata de mantener estable la temperatura existe cierta discordancia ello se debe a la distinta ubicación de los sensores ya que a medida que avanza el tiempo la diferencia es menor.

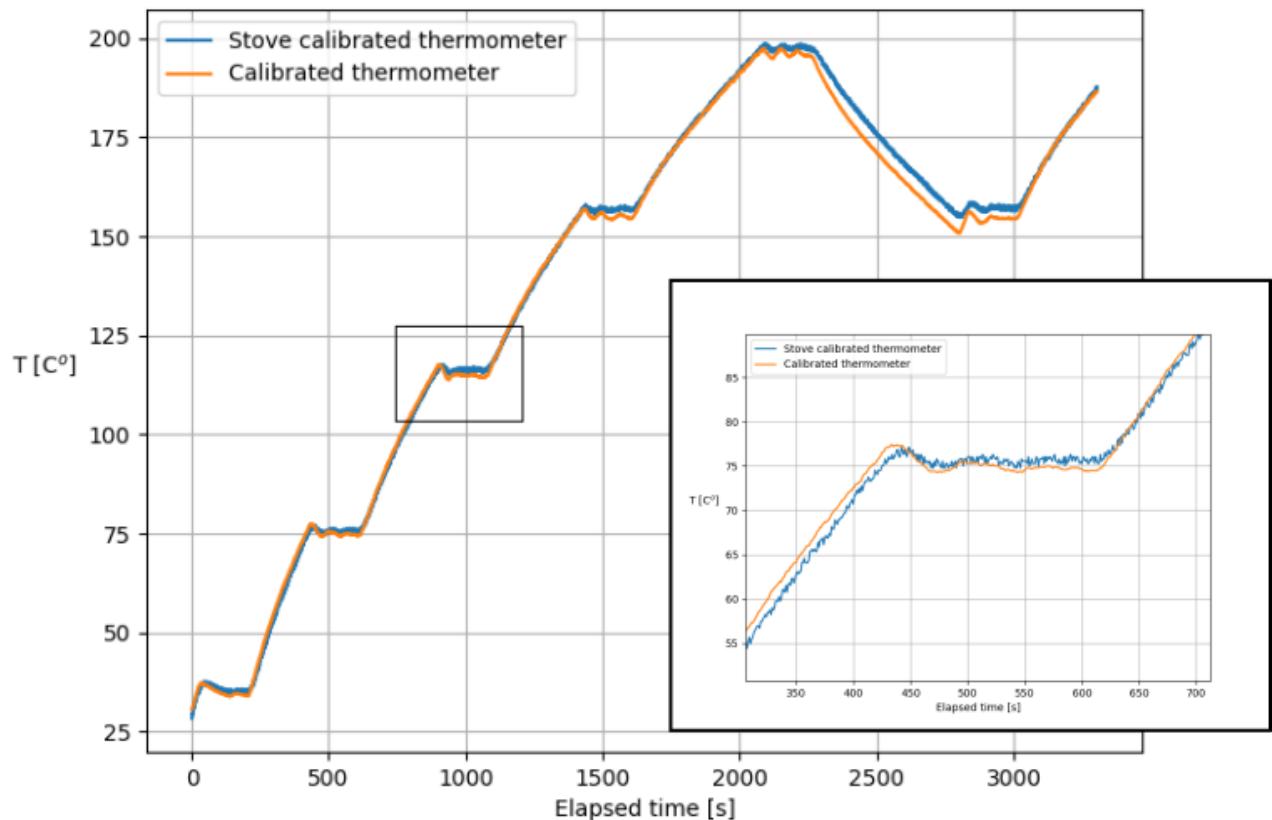


Figura 48: Lecturas del módulo de temperatura una vez calibrado y las del termómetro calibrado.

6.3. Control PID

Como se puede observar en la Figura 48 al tratar de poner la estufa a una temperatura simplemente apagando y encendiendo el relé cuando la temperatura está por encima o debajo de la objetivo implica oscilaciones del orden de un grado, que si bien para otras tecnologías pueden resultar irrelevantes, para el caso de la fibra óptica, que puede determinar la temperatura con una precisión de hasta 0.1 K este aspecto es crítico. En lugar de usar este control, conocido como *bang-bang* se ha propuesto la adición de una ley de control PID. El sistema se describe con el diagrama de la Figura 49 donde, como se puede observar la estufa se modela como un sistema de primer orden un cierto desfase temporal.

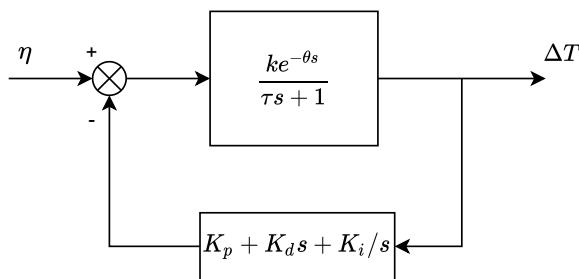


Figura 49: Sistema a controlar.

En este caso la variable de control, η representa el porcentaje de tiempo que el relé permanece encendido, lo cual se consigue estableciendo una ventana de trabajo (del orden de segundos) y manteniendo el relé encendido un porcentaje de ese tiempo. Este método, combinado con las grandes dimensiones de la estufa debería permitir que la variable de salida, ΔT (el incremento de temperatura), no perciba la entrada como discreta sino continua, permitiendo así el control PID.

Para caracterizar el sistema y después poder elegir los parámetros del control PID adecuados se ha utilizado la herramienta web *PID Tuner Controller* (véase [17]). En lugar de trabajar con toda la señal se ha tomado solo un segmento correspondiente a la respuesta a una entrada escalón, véase Figura 50.

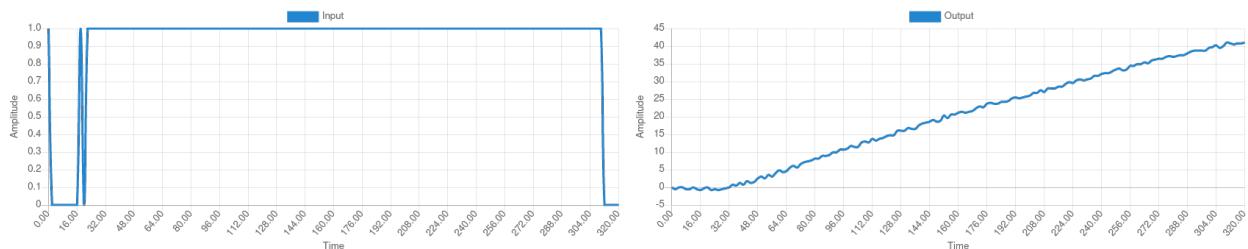


Figura 50: Datos de entrada (izquierda) y salida (derecha).

Gracias a la herramienta el modelo de primer orden queda caracterizado con los parámetros que figuran en la Tabla 1 y en la Figura 51 se muestra el modelo frente a los datos reales.

Tabla 1: Parámetros del sistema de primer orden.

Variable	Value
k	113.1746
τ	618.9658
θ	14.4042

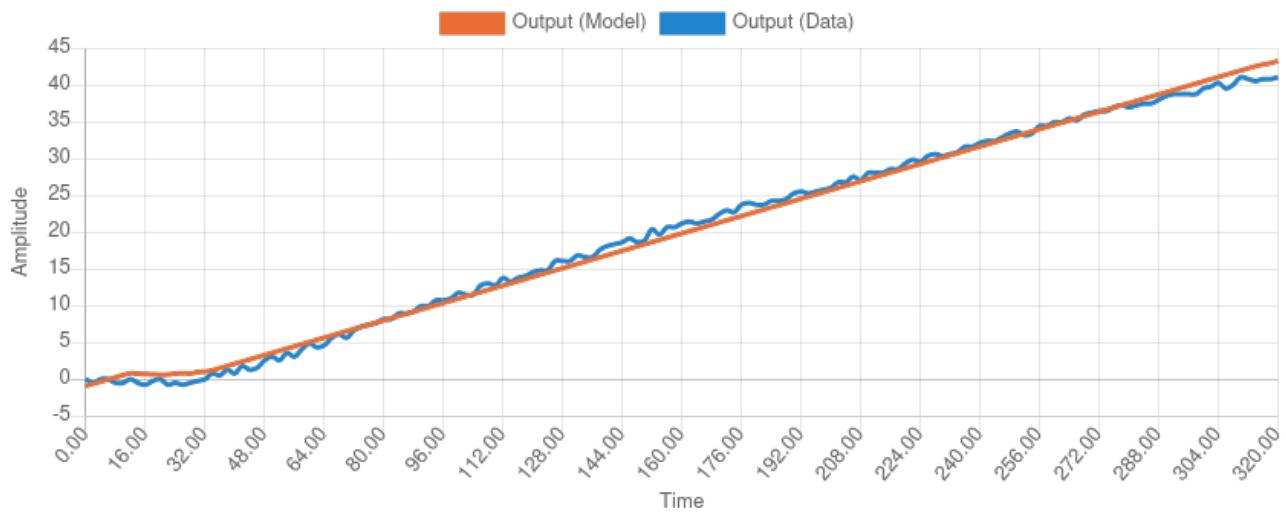


Figura 51: Modelo ajustado frente a los datos experimentales.

Una vez obtenido el modelo se pasa al diseño del control PID. Los coeficientes escogidos finalmente son los que aparecen en la Tabla 2 y se han tratado de elegir de forma que se reduzca el *overshooting* al máximo ya que si es necesario realizar algún ensayo con la estufa en el cual se produzca alguna transformación (como el curado de resinas epoxídicas) al llegar a cierta temperatura, esta transformación no comience de manera interrumpida y brusca sino de forma suave. En la Figura 52 se muestra el comportamiento del sistema a un incremento de 10 K una vez incluido el control PID que, de acuerdo al criterio mencionado anteriormente, se trata de un sistema sobreamortiguado.

Tabla 2: Coeficientes del sistema de control PID.

Variable	Value
K_p	0.1
K_i	$1.664 \cdot 10^{-4}$
K_d	0.15

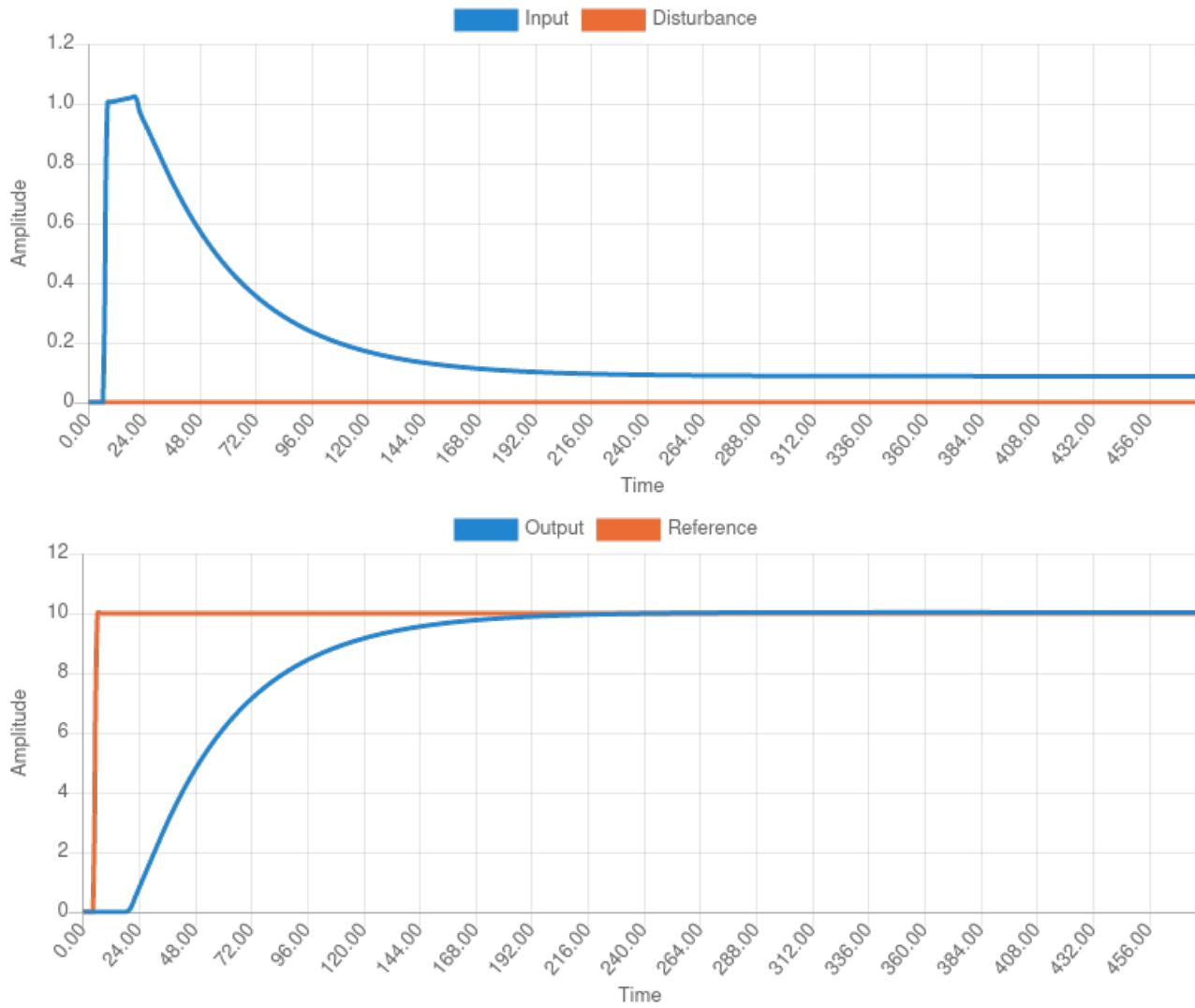


Figura 52: Comportamiento del sistema una vez incluido el control PID, arriba señal de entrada (porcentaje de tiempo que se enciende el relé) y abajo de salida (incremento de temperatura).

Una vez diseñado el control se crea un código en C++ para Arduino para controlar la estufa a la vez que se recibe la información de la temperatura. El comportamiento de la estufa una vez incluido el control es el que se muestra en la Figura 53.

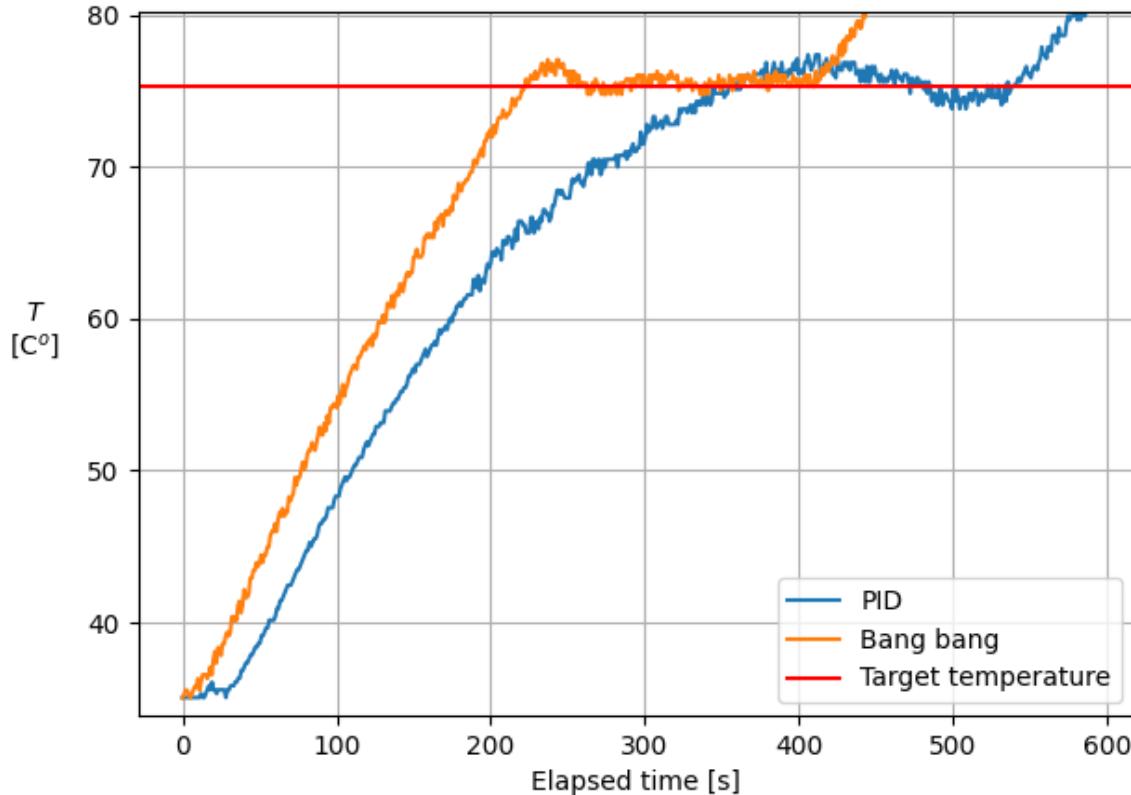


Figura 53: Comportamiento de la estufa una vez incluido el control PID.

Como se puede observar la respuesta está más amortiguada que en el caso anterior, sin embargo no es todavía suficiente. Ello se debe a la forma en la que se ha convertido la variable de control discreta en continua. Este problema se puede minimizar tratando de obtener medidas y estimaciones con una velocidad mayor a la actual o incluyendo un elemento que controle la intensidad que pasa por la resistencia y controlando este elemento en lugar del relé.

7. Conclusiones

Del trabajo realizado se extraen las siguientes conclusiones:

- Los espectrogramas estudiados en la Sección 4 solo son capaces de aportar información si no se filtra la señal de ninguna forma ya que solo al representar el espectrograma sin filtrar se pueden apreciar trazas correspondientes al desplazamiento espectral esperado.
- Por otra parte, existe información adicional existente en los espectrogramas la cual, si son solo analizados desde el punto de vista de máximos y mínimos quedan sesgada impidiendo así la obtención de resultados más precisos.
- Aunque el uso de filtros supone la eliminación de información, la transformación de la señal, en este caso mediante la transformada Z-Chirp, parece proporcionar un enfoque diferente del cual poder extraer información sobre el estado de la fibra.
- Además, a través del análisis espectral clásico se pueden obtener características que, como en el caso de la energía media cuadrática, parecen tener un comportamiento diferente si sobre la fibra se aplica solo temperatura, solo deformación o ambas. Sin embargo, estas características habrán de ser estudiadas con más detalle, sobre una población mayor y con métodos más sofisticados.
- Por medio de la Inteligencia Artificial Explicable (XAI) se ha podido analizar el modelo desarrollado en el Caso de Estudio 2 ([1]), se ha podido extraer información adicional sobre la correlación de señales y queda validado tanto el modelo como la explicación al observarse cómo la red neuronal reconoce el desplazamiento espectral.
- Para poder contrastar en un futuro las hipótesis planteadas en este trabajo se dispone ya de una herramienta automatizada capaz de proporcionar un ambiente controlado para la obtención de datos lo cual permitirá un análisis más preciso de los fenómenos estudiados.



8. Futuros trabajos

Dado que el trabajo ha consistido en el análisis de señal y de las herramientas actualmente disponibles para la creación de sensores de medida distribuida, las conclusiones que se extraen suponen más que un hito, un punto de partida para futuras investigaciones de las cuales se propone:

- Analizar mediante redes convolucionales los espectrogramas obtenidos en la Sección 4 para más tarde aplicar las herramientas de Inteligencia Artificial Explicable (XAI) empleadas en la Sección 5 y determinar cómo se modifican estos espectrogramas en función de la temperatura y la deformación
- Analizar mediante modelos sencillos, como árboles de decisiones o máquinas de soporte vectorial, las características de los espectrogramas extraídas y de nuevo aplicar técnicas de XAI para determinar por qué se toma cada decisión.
- Estudiar transformaciones de la señal alternativas y descomposiciones de la señal que no impliquen la pérdida de información. Entre los posibles candidatos, dada la naturaleza de la señal estudiada, destaca la transformada de chirplet.



A. Algunos códigos empleados

A.1. STFT

Para realizar una Transformada de Fourier de Corto Periodo, se ha desarrollado un código el cual, aún sin ceñirse demasiado a los algoritmos convencionales, produce un espectrograma en el cual no se ha perdido nada de información.

```
1 def custom_stft(y,window=2000,delta=200):
2
3     """ Function to create a spectrogram based in the STFT algorithm
4         but simplyfied
5
6         : param y      (1D np.array or list)      : time series signal
7
8         : optional window (int) : number of points taken to compute the FFT
9         : optional delta   (int) : hop length between windows
10
11        : return stft (2D np.array): spectrogram
12
13        """
14
15        window = int(window/2)
16
17        steps = range(window, len(y)-window+1,delta)
18        stft = list()
19        for i in steps:
20
21            yy = y[i-window:i+window]
22
23            YY = np.fft.fft(yy)
24            stft.append(YY)
25
26        stft = np.array(stft)
27
28    return stft.T
```

B. Imágenes adicionales

B.1. Transformada Z-Chirp

B.1.1. Señal completa transformada

Señales de ejemplo

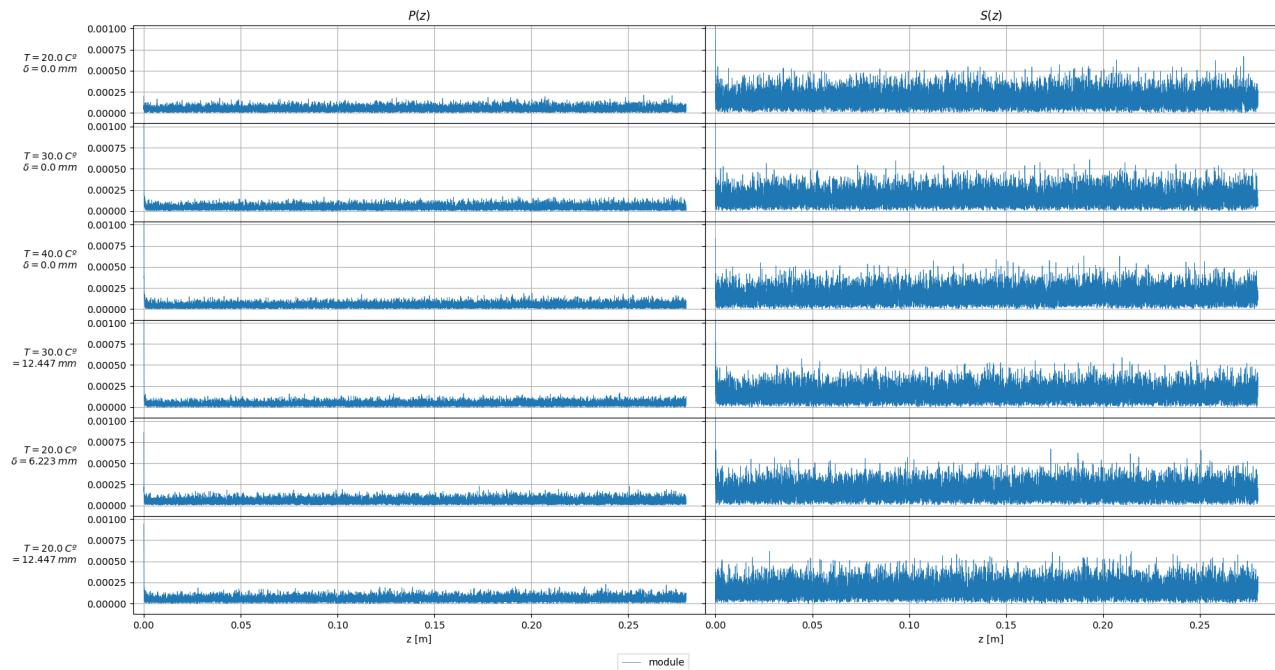


Figura 54: Señales de ejemplo tras la transformación Z-Chirp..



Espectrogramas

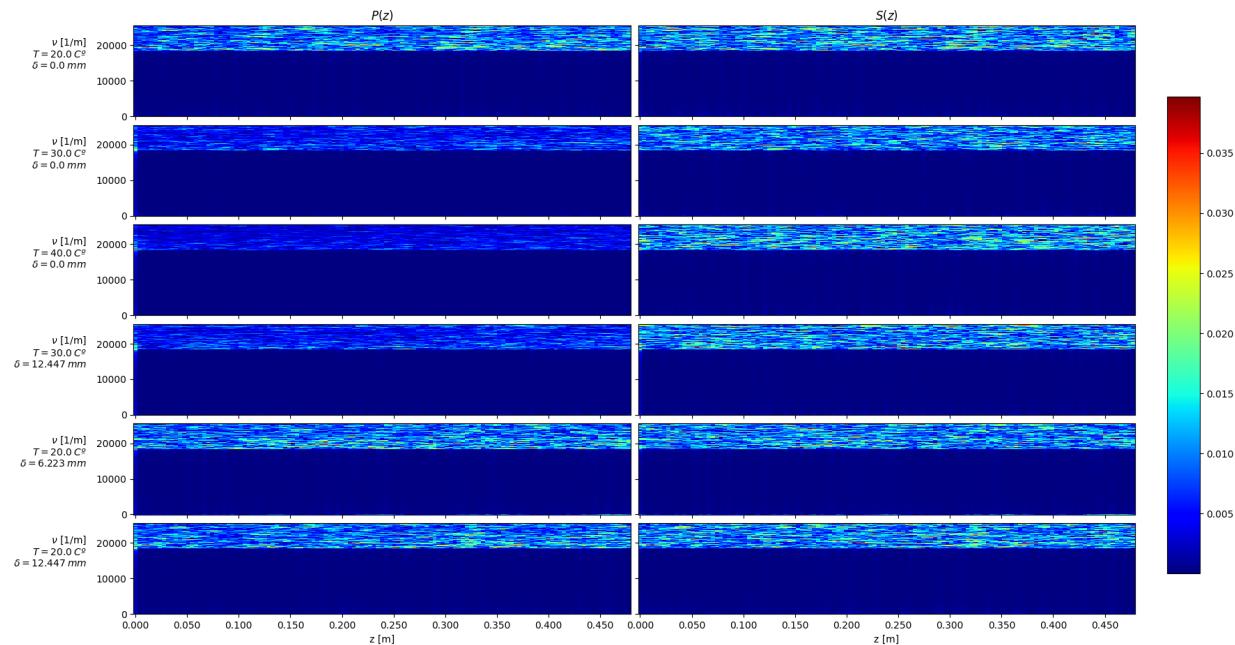


Figura 55: Espectrogramas tras la transformación Z-Chirp..

Correlación de espectrogramas

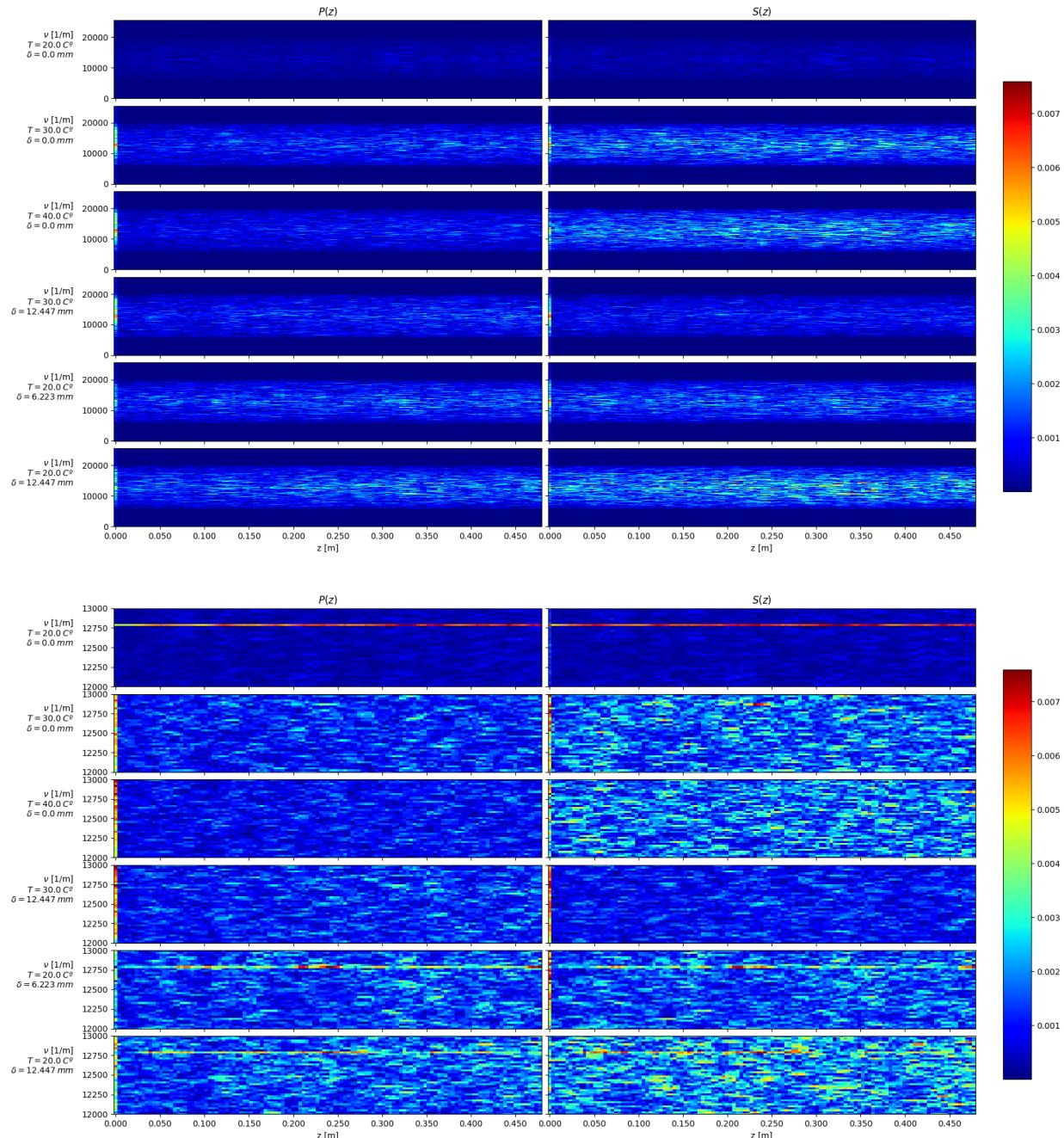


Figura 56: Correlación de espectrogramas tras la transformación Z-Chirp con dos niveles de zoom.

Comparación de las correlaciones entre espectrogramas

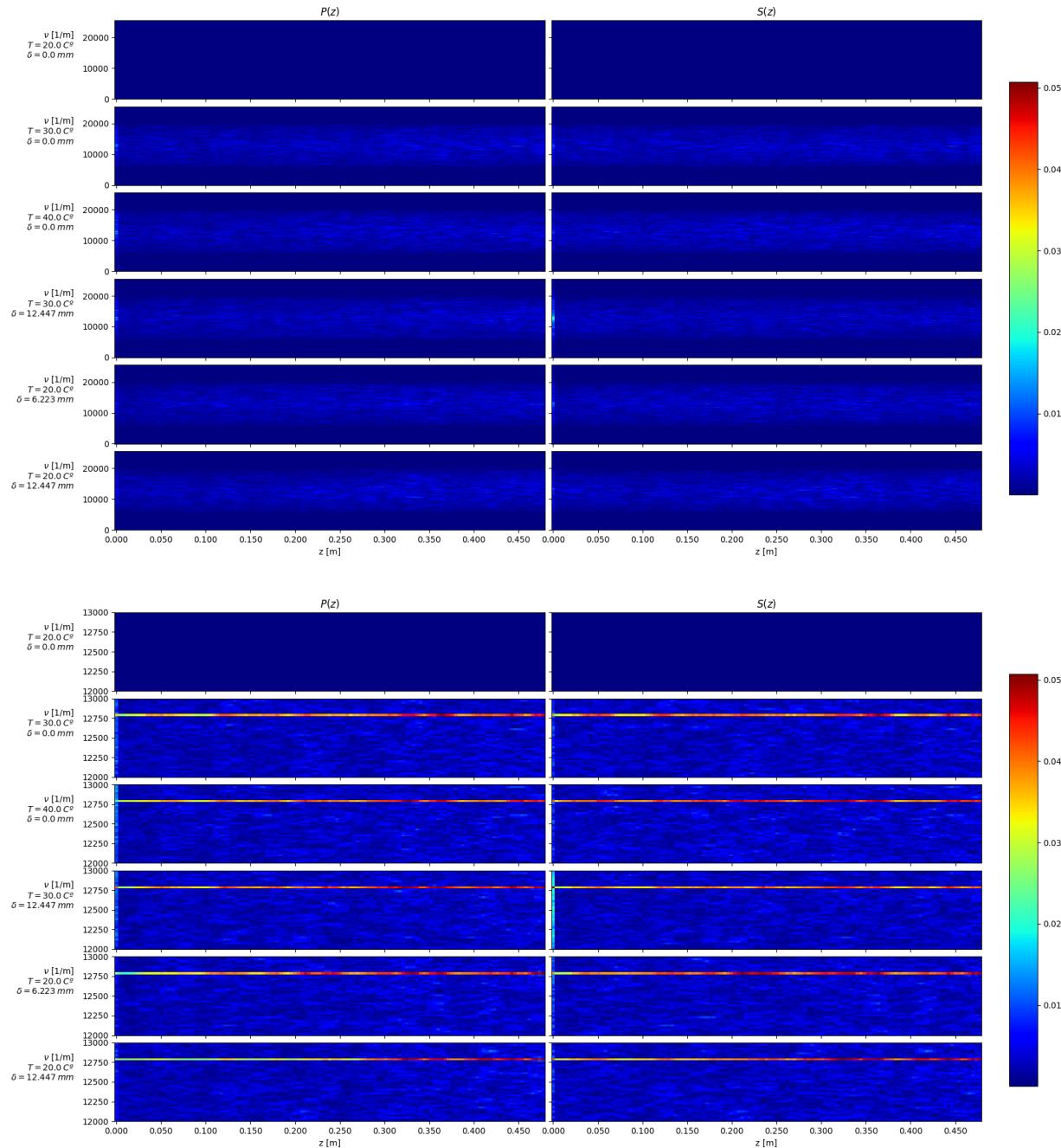


Figura 57: Comparación de las correlaciones entre espectrogramas tras la transformación Z-Chirp con dos niveles de zoom.

Auto-correlación de espectrogramas

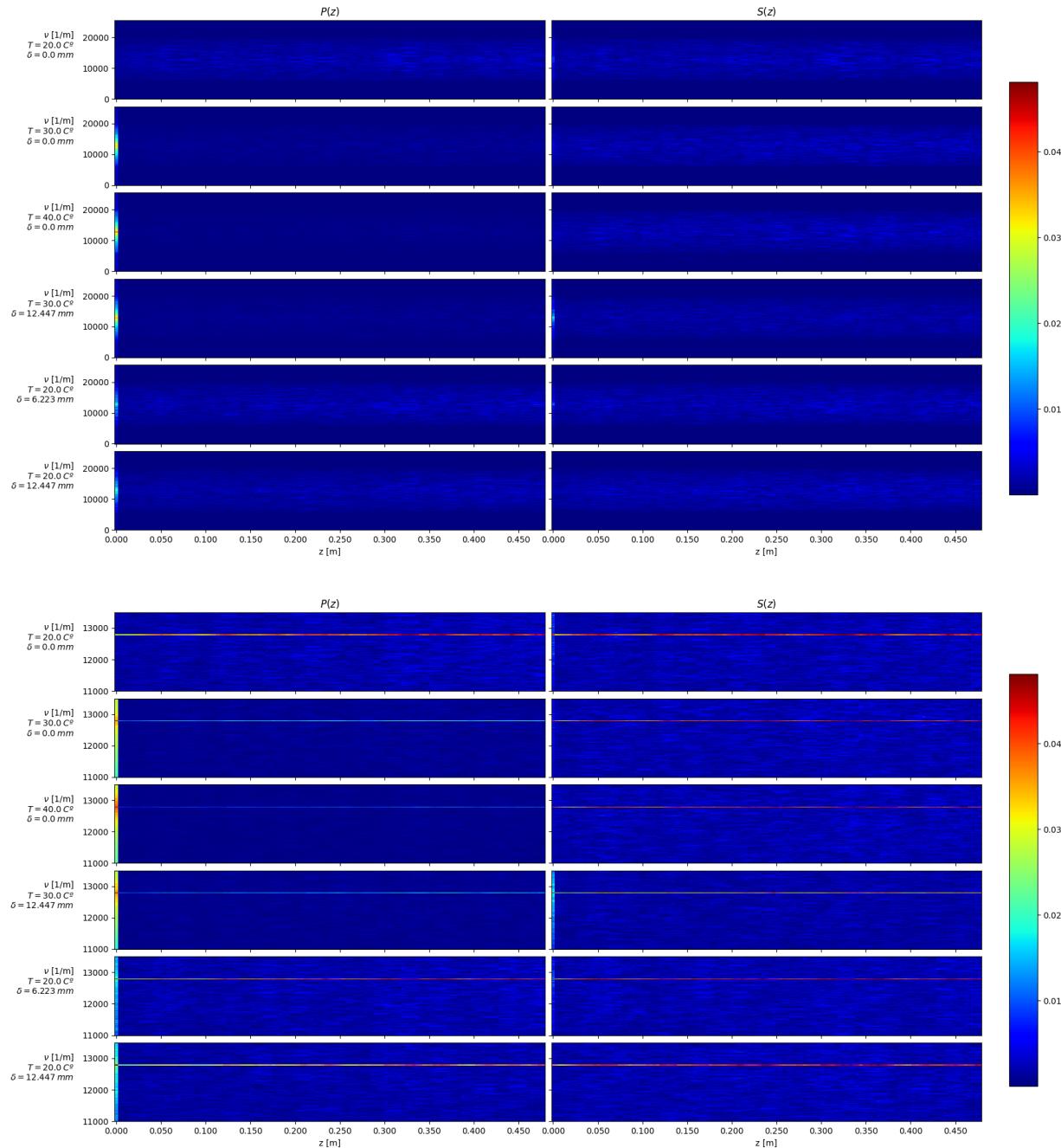


Figura 58: Auto-correlación de espectrogramas tras la transformación Z-Chirp con dos niveles de zoom.

Comparación de las auto-correlaciones entre espectrogramas

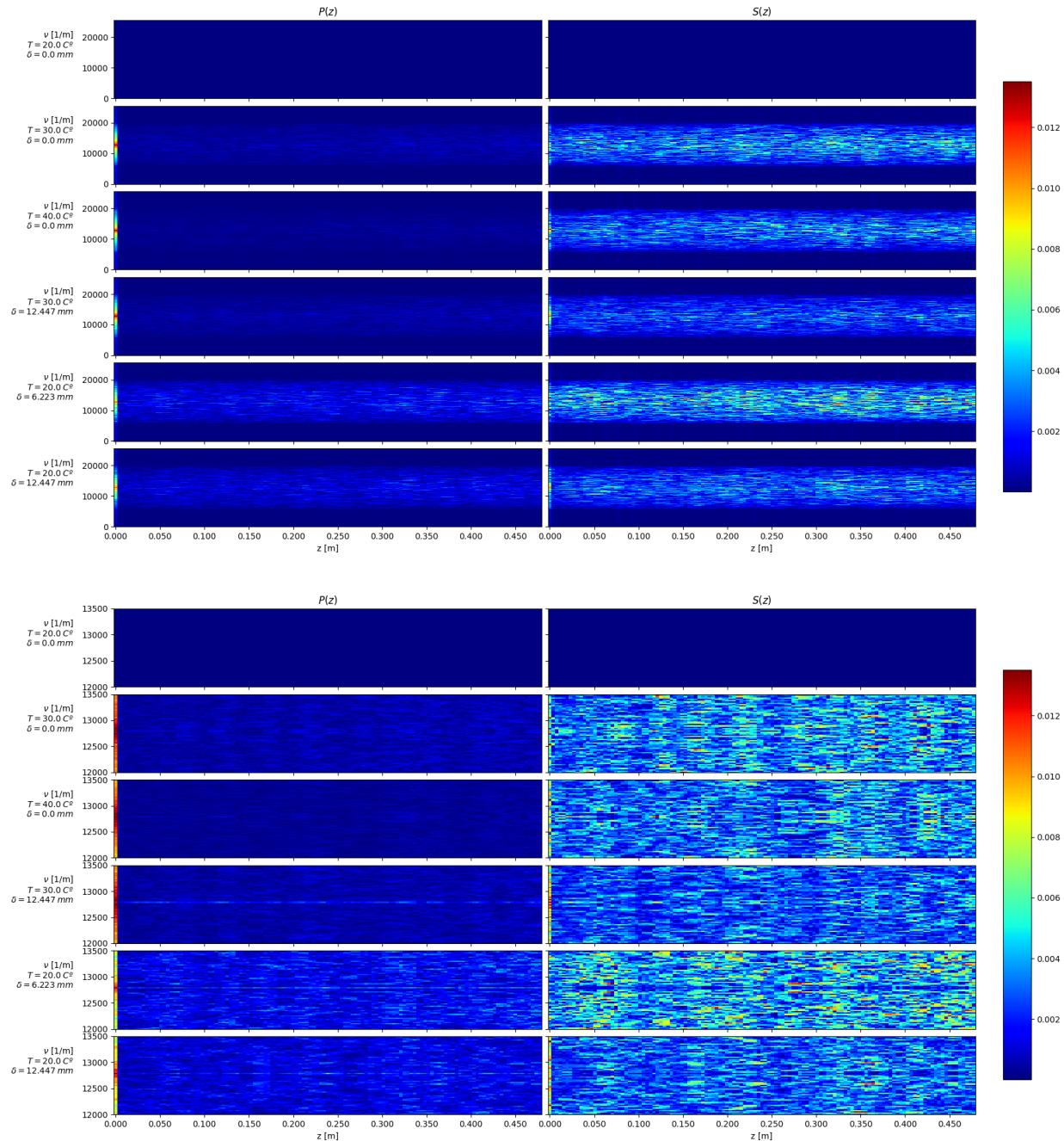


Figura 59: Comparación de las auto-correlaciones entre espectrogramas tras la transformación Z-Chirp con dos niveles de zoom.

Correlación entre los dos estados de polarización

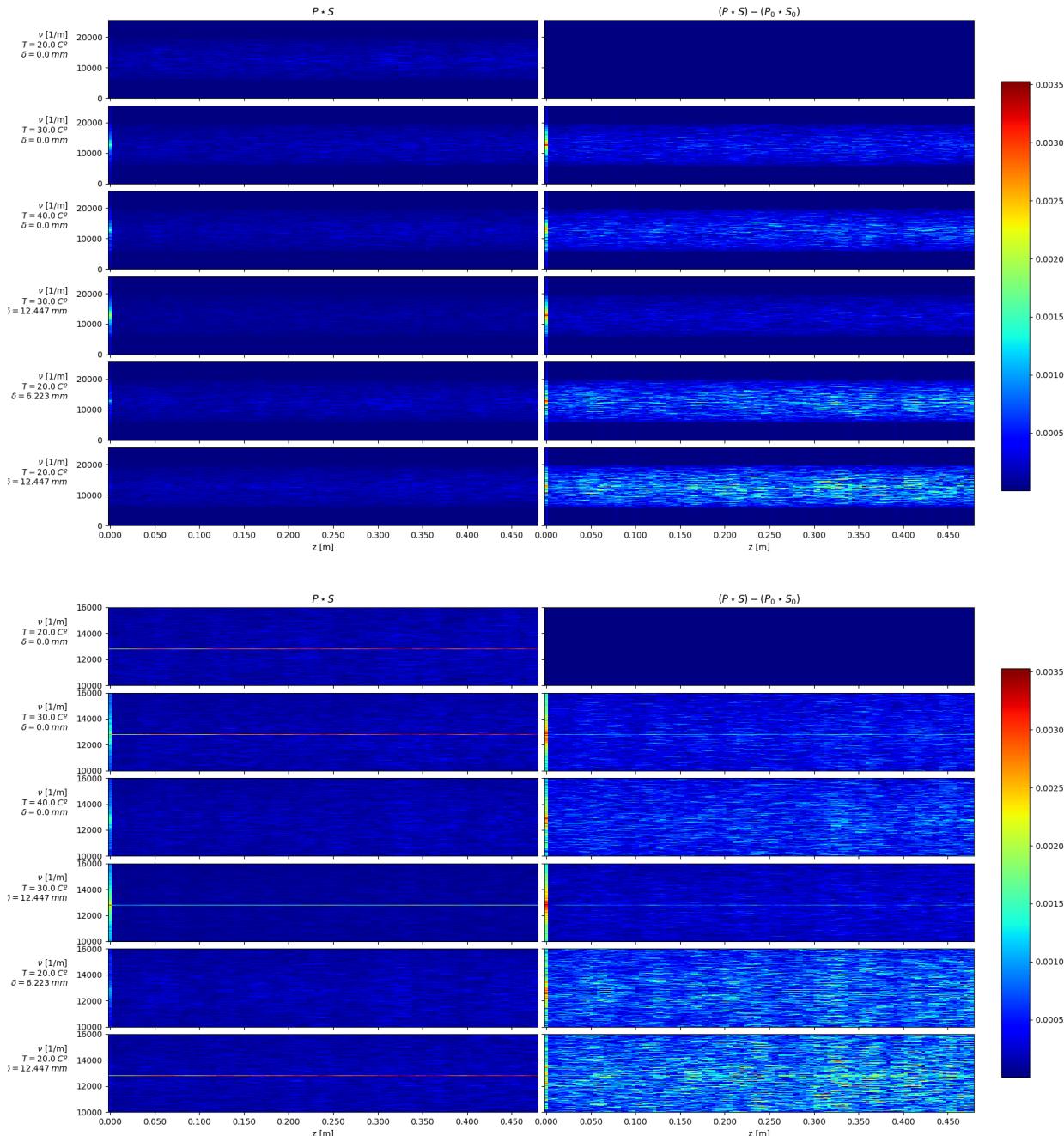


Figura 60: Correlación entre los dos estados de polarización (izquierda) y su comparación (derecha) tras la transformación Z-Chirp con dos niveles de zoom.

B.1.2. Extracción de características de la señal transformada

Centroide espectral

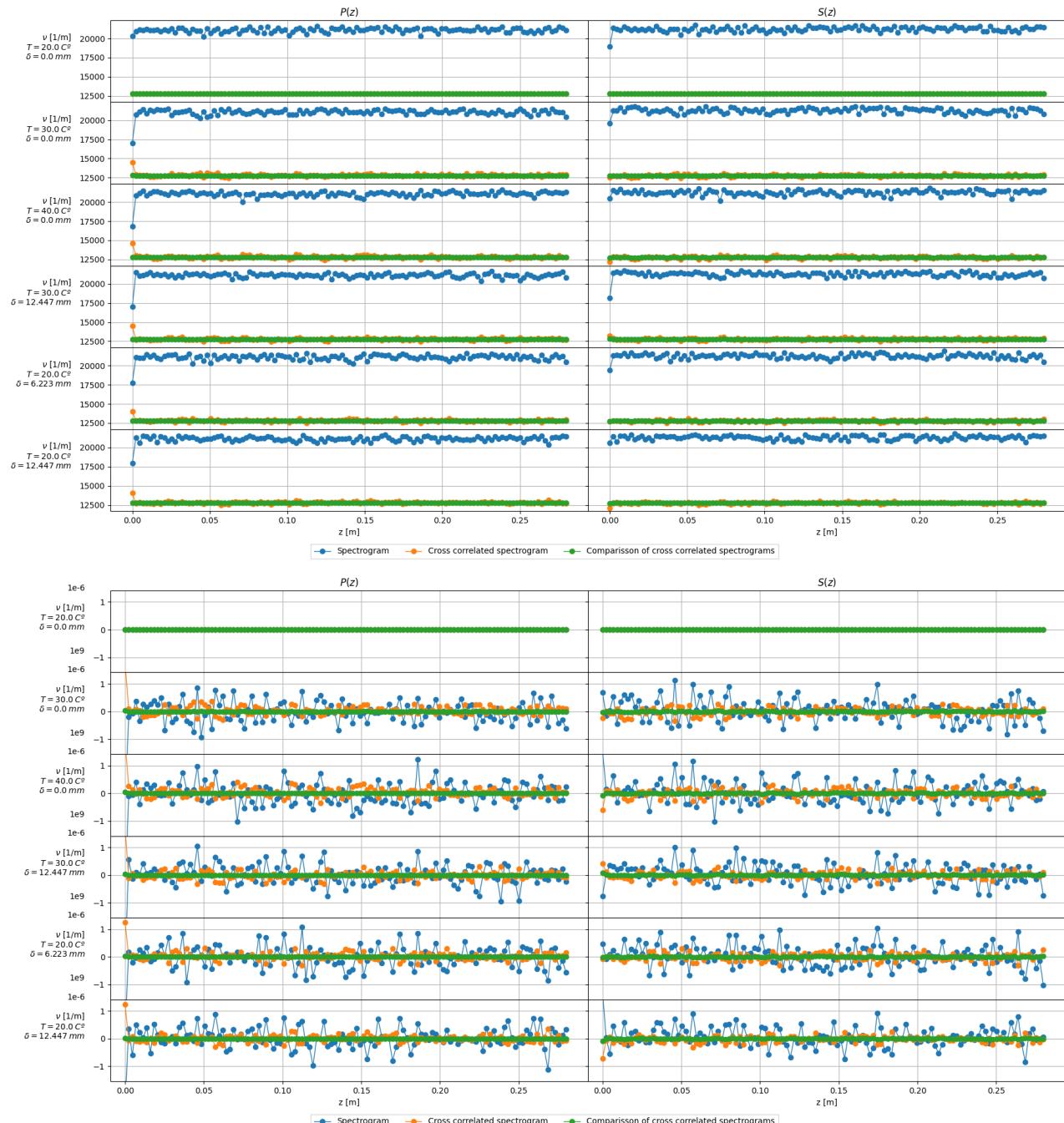


Figura 61: Centroide espectral (arriba) y su diferencia con las señales de referencia (abajo).

Atenuación espectral

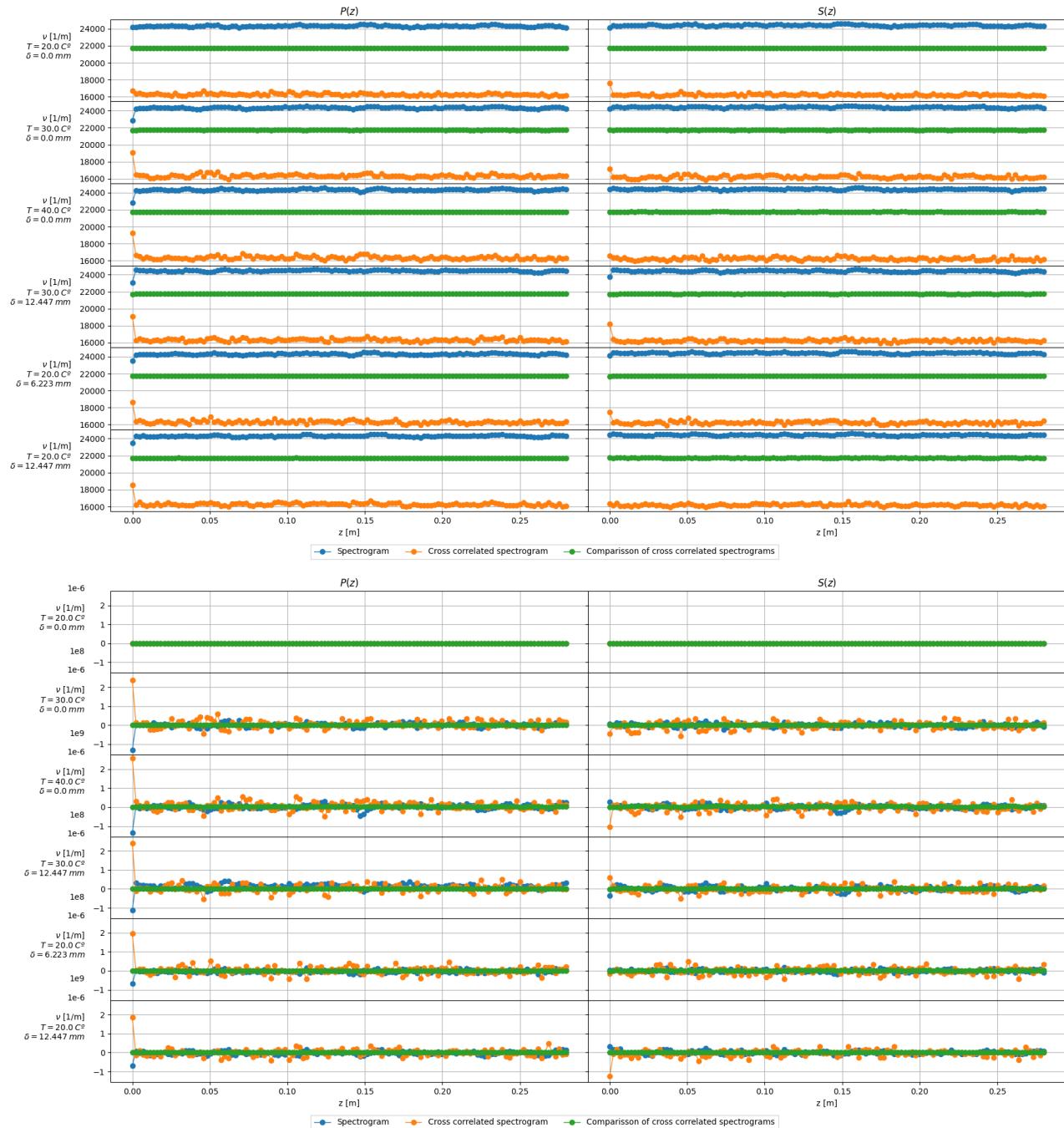


Figura 62: Atenuación espectral (arriba) y su diferencia con las señales de referencia (abajo).

Ancho de banda espectral



Figura 63: Ancho de banda espectral (arriba) y su diferencia con las señales de referencia (abajo).

Contraste espectral



Figura 64: Contraste espectral (arriba) y su diferencia con las señales de referencia (abajo).

Planicidad espectral

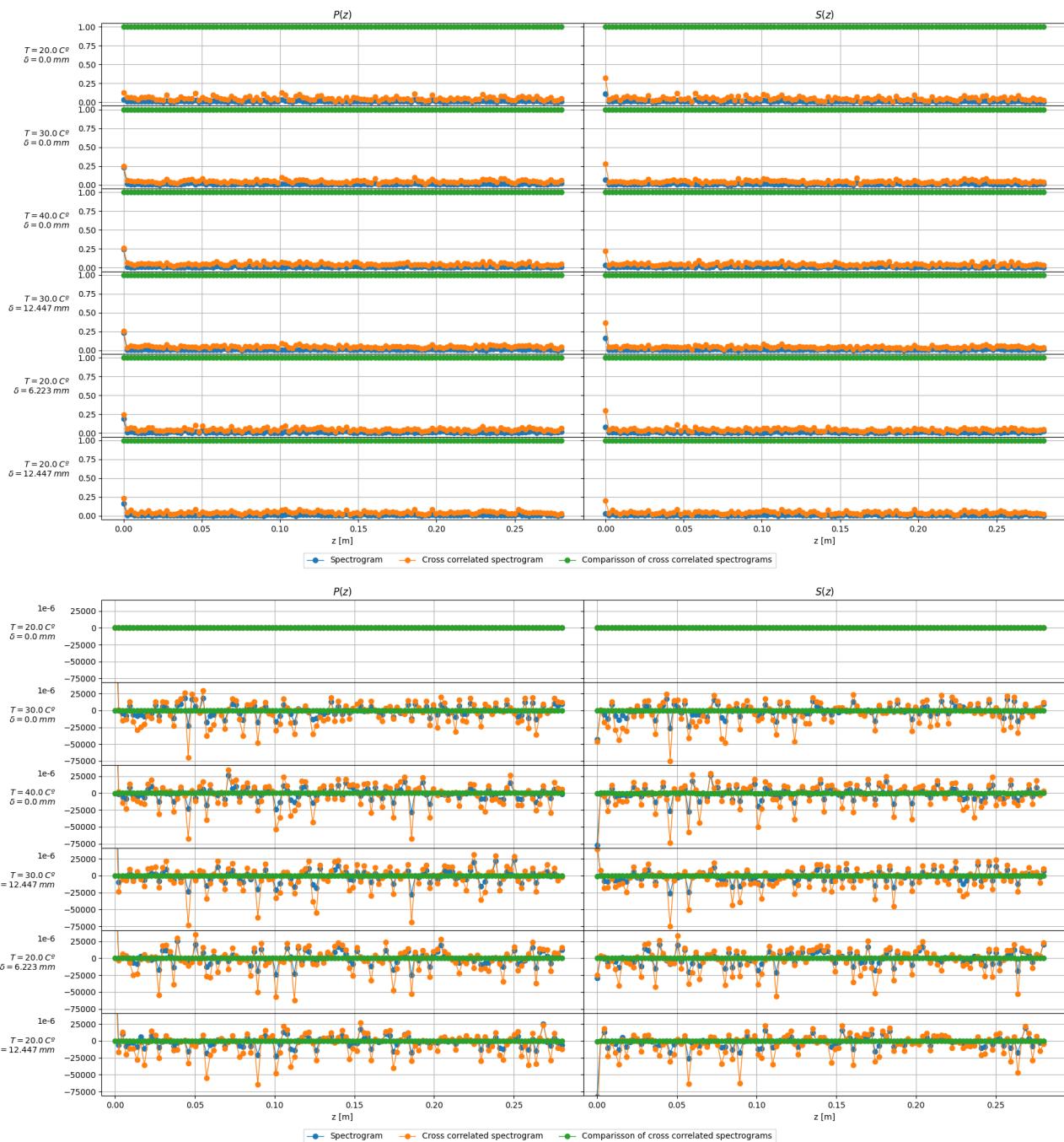


Figura 65: Planicidad espectral (arriba) y su diferencia con las señales de referencia (abajo).

Energía media cuadrática

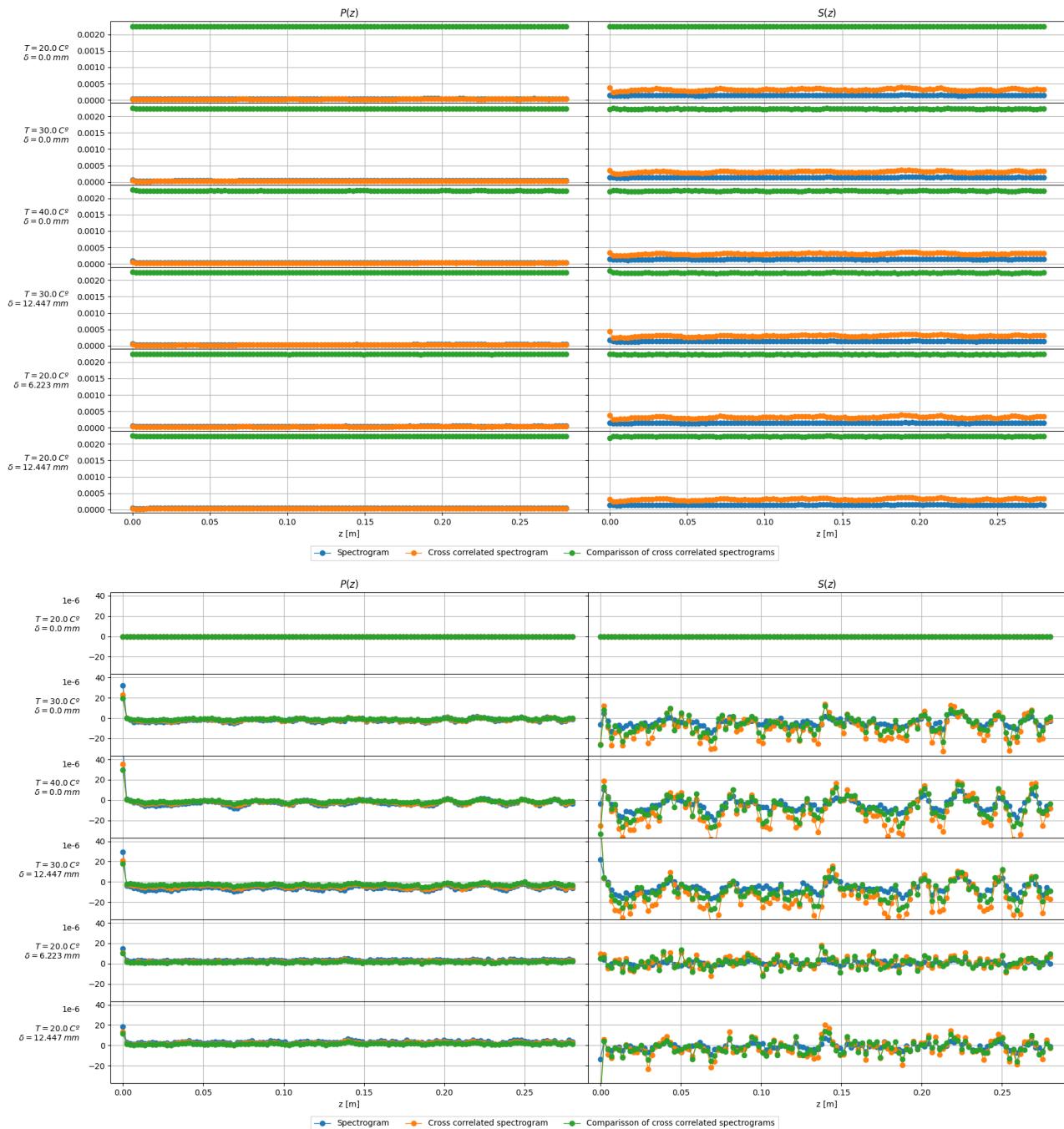


Figura 66: Energía media cuadrática (arriba) y su diferencia con las señales de referencia (abajo).

B.1.3. Espectrograma Z-Chirp

Espectrogramas

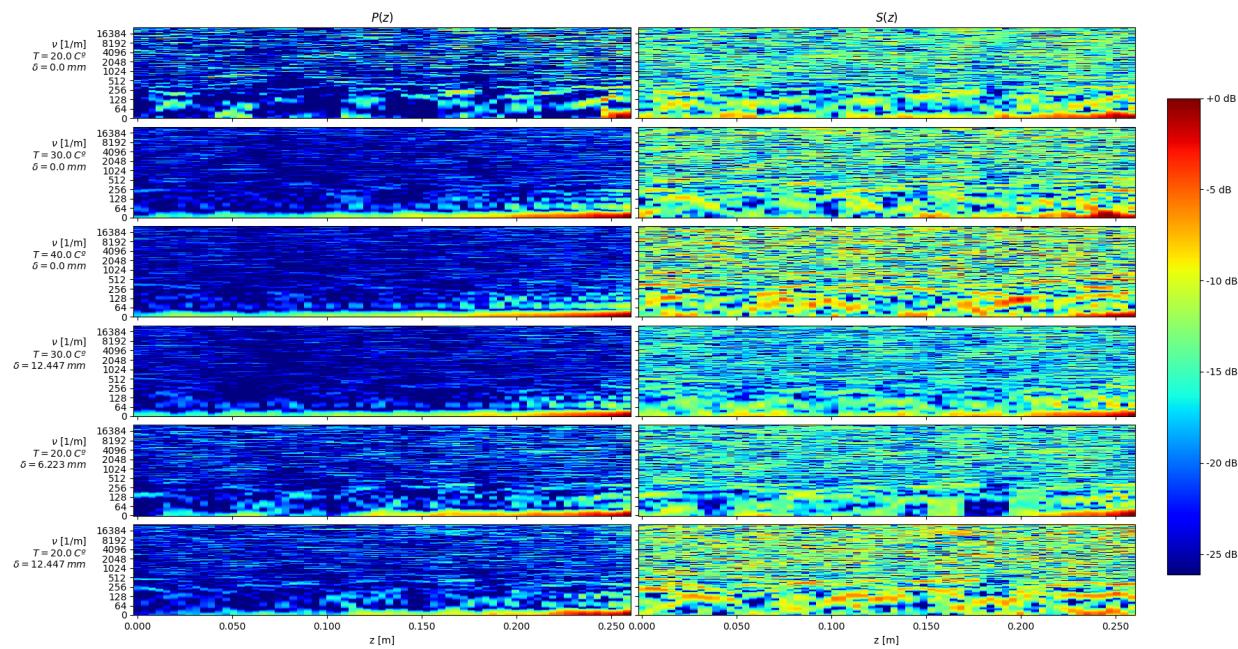


Figura 67: Espectrogramas tras la transformación Z-Chirp..

Correlación de espectrogramas

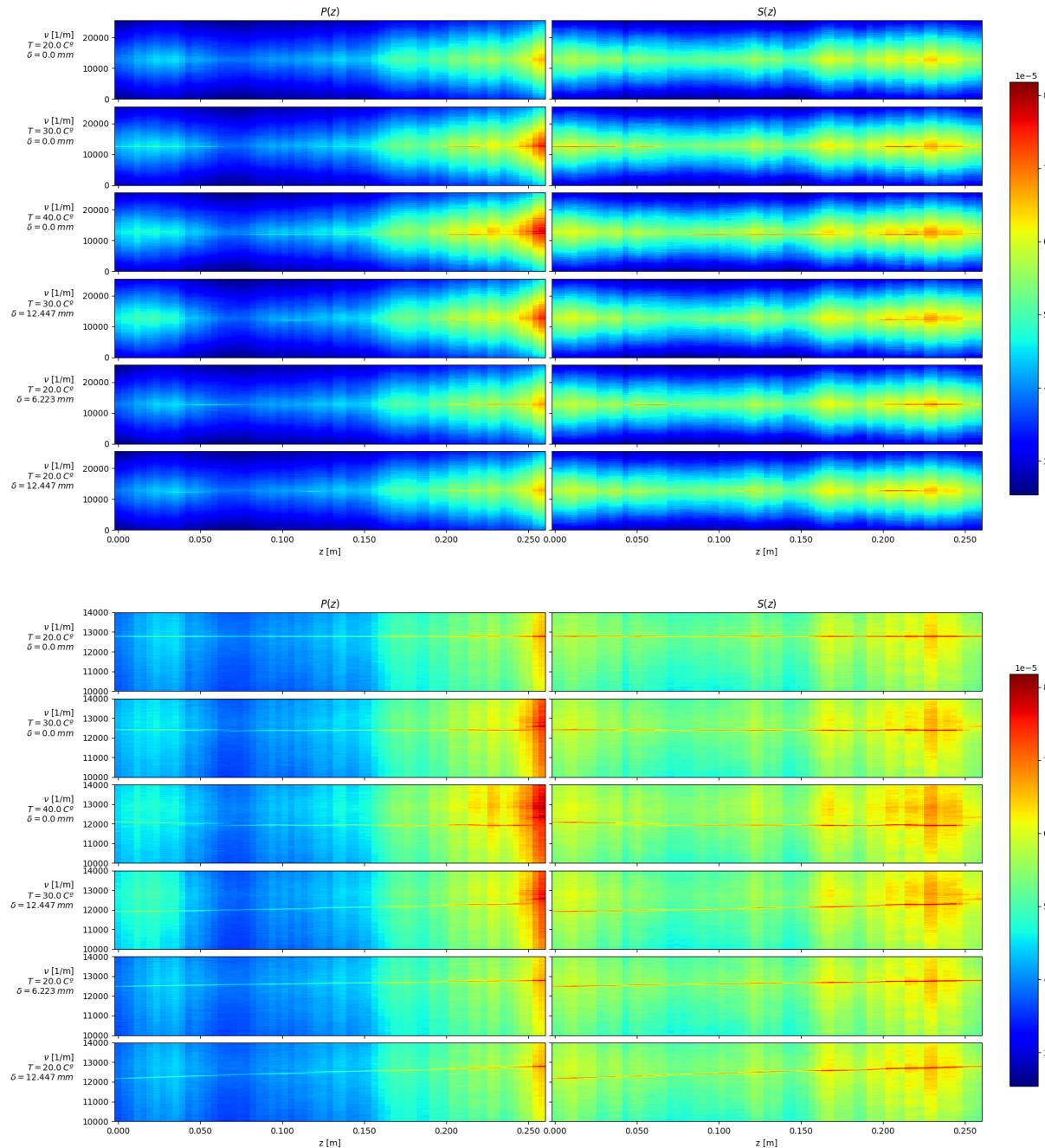


Figura 68: Correlación de espectrogramas tras la transformación Z-Chirp con dos niveles de zoom.

Comparación de las correlaciones entre espectrogramas

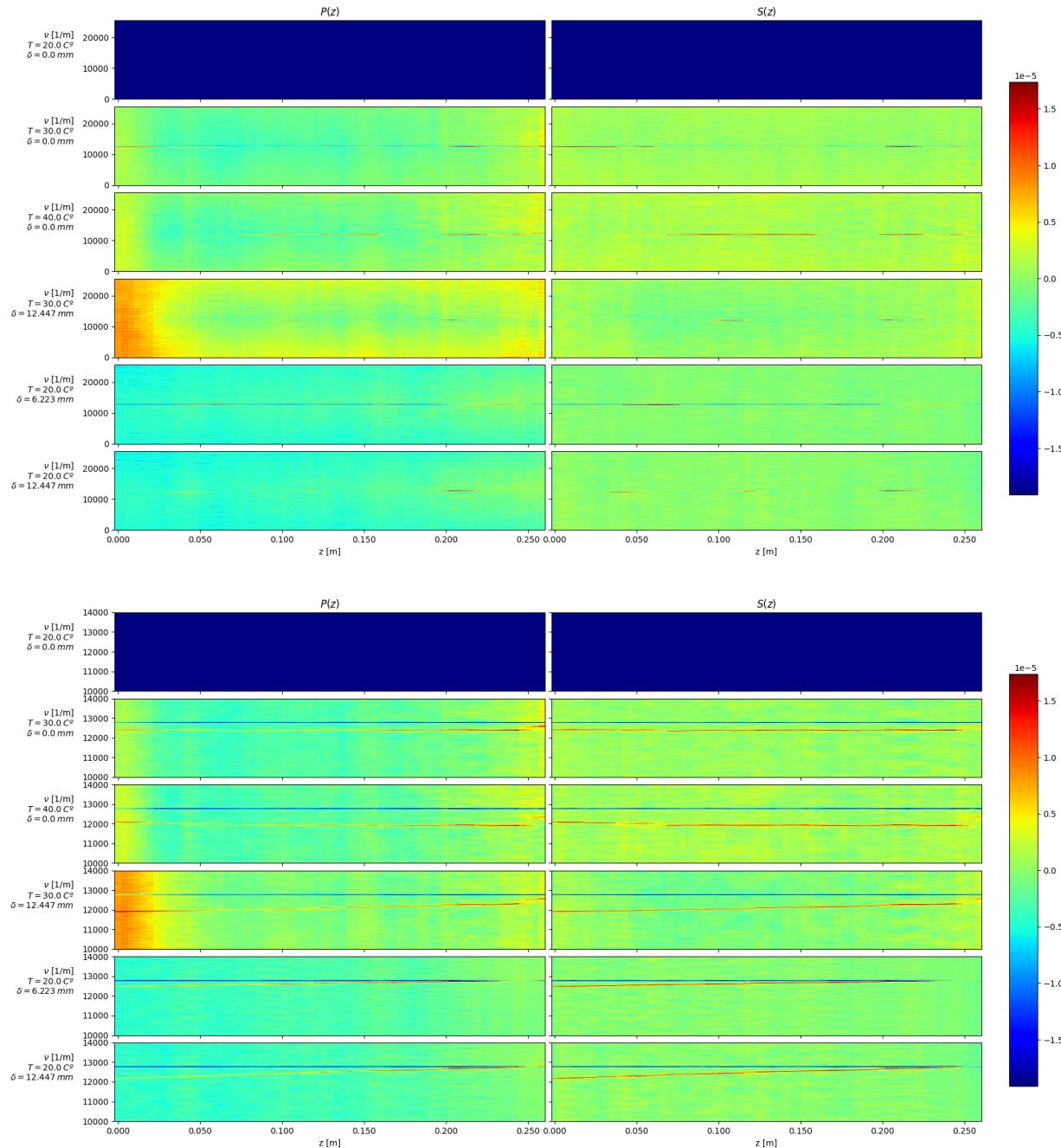


Figura 69: Comparación de las correlaciones entre espectrogramas tras la transformación Z-Chirp con dos niveles de zoom.

Auto-correlación de espectrogramas

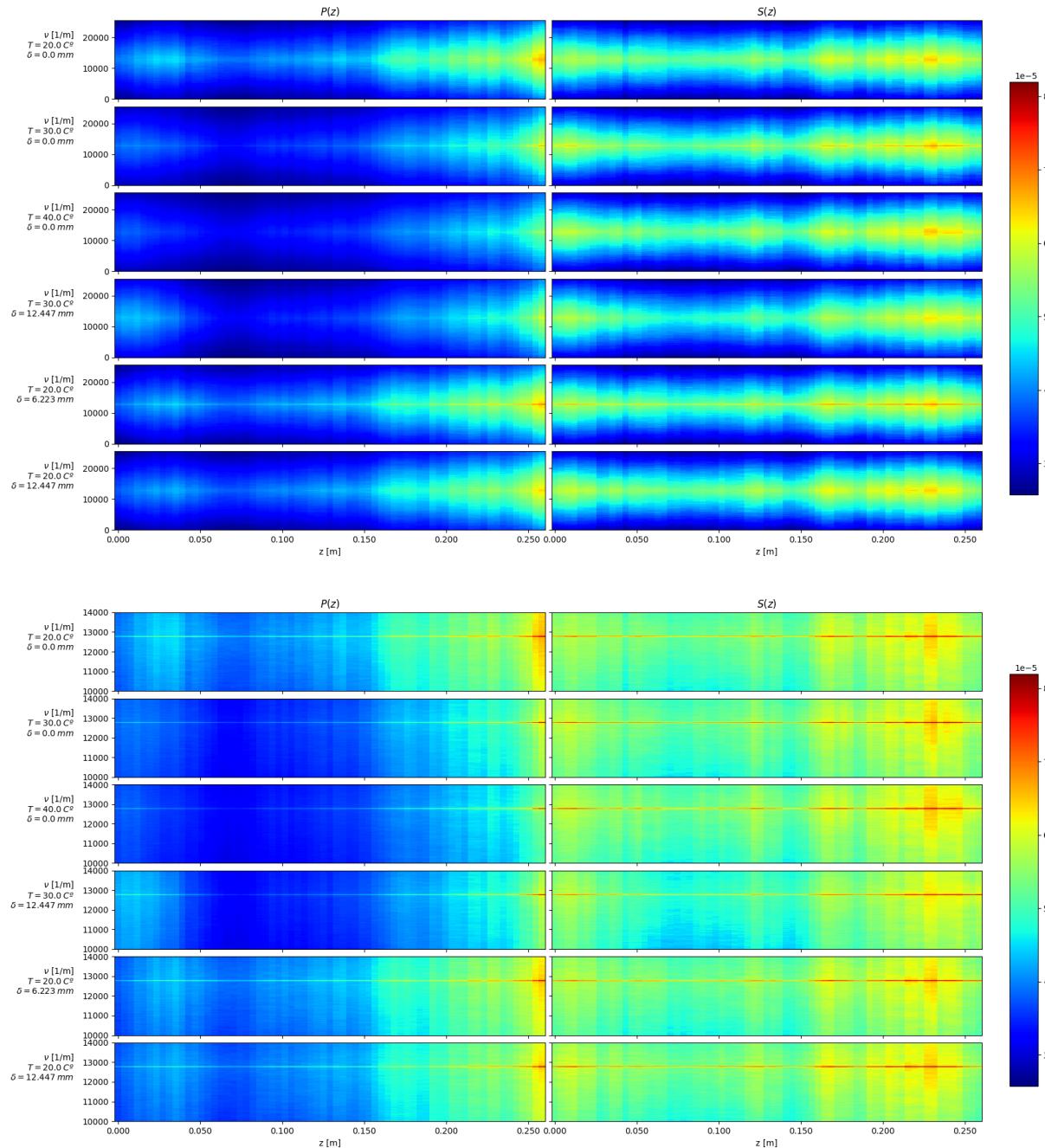


Figura 70: Auto-correlación de espectrogramas tras la transformación Z-Chirp con dos niveles de zoom.

Comparación de las auto-correlaciones entre espectrogramas

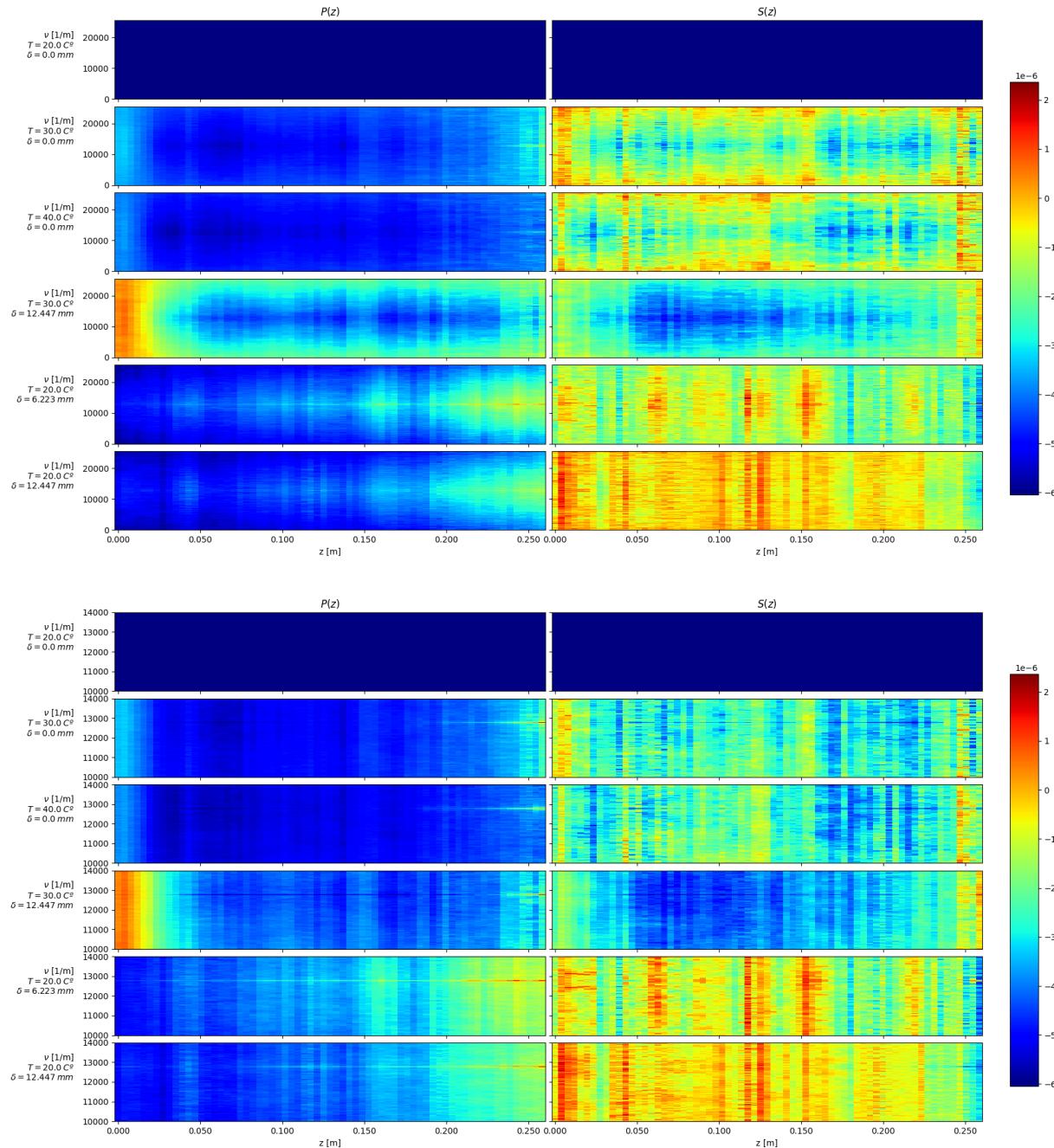


Figura 71: Comparación de las auto-correlaciones entre espectrogramas tras la transformación Z-Chirp con dos niveles de zoom.

Correlación entre los dos estados de polarización

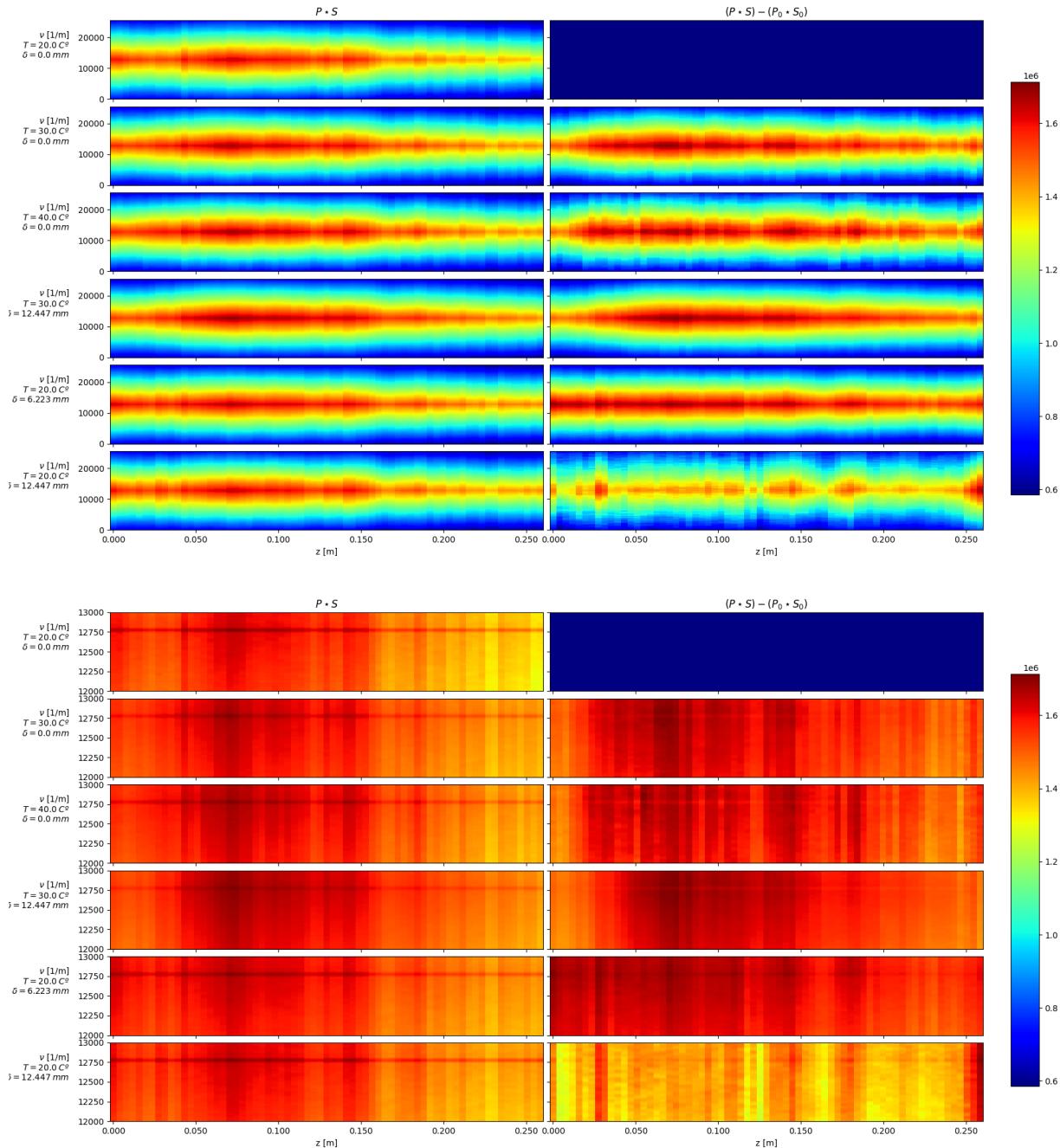


Figura 72: Correlación entre los dos estados de polarización (izquierda) y su comparación (derecha) tras la transformación Z-Chirp con dos niveles de zoom.

Referencias

- [1] A. Pedraza, Caso de estudio 2: Desarrollo y caracterización de sensores de fibra óptica y aplicaciones en la fabricación de materiales compuestos (2022).
URL <https://github.com/temisAP/SHM>
- [2] Luna innovations | fiber optic sensing and measurement systems.
URL <https://lunainc.com/>
- [3] SENSURON, Fiber optic sensing fundamental.
- [4] A. Güemes, A. Fernández-López, B. Soller, Optical fiber distributed sensing - physical principles and applications;, <http://dx.doi.org/10.1177/1475921710365263> 9 (2010) 233–245. doi:10.1177/1475921710365263.
URL <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/1475921710365263>
- [5] A. Olteanu, Birdcall recognition: Eda and audio fe | kaggle.
URL <https://www.kaggle.com/code/andradaolteanu/birdcall-recognition-eda-and-audio-fe#3.-The-Audio-Files%F0%9F%94%88%F0%9F%94%89%F0%9F%94%8A>
- [6] B. McFee, S. Balke, Librosa.
URL <https://librosa.org/>
- [7] T. S. community, Signal processing (scipy.signal) — scipy v1.8.1 manual.
URL <https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/signal.html>
- [8] F. Leonard, J. Eberhardsteiner, H. Mang, H. Waubke, F. Léonard, Phase and frequency spectrograms (2006).
URL <http://www.nsercfloodnet.ca/Viewproject>
- [9] M. A. Soto, X. Lu, H. F. Martins, M. Gonzalez-Herraez, L. Thévenaz, Distributed phase birefringence measurements based on polarization correlation in phase-sensitive optical time-domain reflectometers, Optics Express 23 (2015) 24923. doi:10.1364/oe.23.024923.
- [10] S. S. Marco Tulio Ribeiro, C. Guestrin, emanuel-metzenthin/lime-for-time: Application of the lime algorithm by marco tulio ribeiro, sameer singh, carlos guestrin to the domain of time series classification.
URL <https://github.com/emanuel-metzenthin/Lime-For-Time>

- [11] M. T. Ribeiro, S. Singh, C. Guestrin, "why should I trust you?": Explaining the predictions of any classifier, in: Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, San Francisco, CA, USA, August 13-17, 2016, 2016, pp. 1135–1144.
- [12] . A. S.r.l., Arduino nano — arduino official store.
URL <http://store.arduino.cc/products/arduino-nano>
- [13] R. Components, Módulo de expansión digilent pmod tc1: K-type thermocouple module with wire - 410-315 | rs components (134-6476).
URL <https://es.rs-online.com/web/p/kits-de-desarrollo-de-sensores/1346476>
- [14] A. L. System, Overview | max31855 thermocouple | adafruit learning system.
URL <https://learn.adafruit.com/thermocouple>
- [15] R. Components, Ra2425-d06 | relé de estado sólido, montaje en panel, 25 a, 265 v ac, cero, varistor ra 24 | rs components (856-8377).
URL <https://es.rs-online.com/web/p/reles-de-estado-solido/8568377/?relevancy-data=7365617263685F636173636164655F6F726465723D31267365617263685F696E746572666163&searchHistory=%7B%22enabled%22%3Atrue%7D>
- [16] R. Components, Rs-25-12 | fuente de alimentación conmutada mean well, 12v dc, 2.1a, 25w, 1 salida, montaje en panel | rs components (621-0578).
URL <https://es.rs-online.com/web/p/fuentes-de-alimentacion-conmutadas/6210578>
- [17] PidTuner, Pid tuner controller | free software.
URL <https://pidtuner.com/#/RnoSkLhIjb>