

Nuevos detectores de interferometría de baja coherencia para aplicaciones industriales

Tesis presentada para optar al título

de

Doctor en Ingeniería

por

Santiago Cerrotta

director

Dr. Eneas N. Morel

y co-director

Jorge R. Torga



**Universidad Tecnológica Nacional
Facultad Regional Delta,
Grupo de Fotónica Aplicada,
Campana, Buenos Aires, Argentina
Mayo 2023**

Dedicado al,

Al vínculo entre la Ciencia y la Sociedad

Agradecimientos

A la universidad pública que, además de estructurar la sociedad argentina en la que vivimos de una manera que aún no llegamos a percibir en todo su esplendor, me permitió llevar adelante una carrera científica de calidad y crítica.

A la ciencia y a la curiosidad que nos permiten adentrarnos un poquito más en el universo de la naturaleza que nos rodea.

Al Grupo de Fotónica Aplicada de la Facultad Regional Delta, Universidad Tecnológica Nacional en el cual pude realizar mi doctorado.

Al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) y al Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación por la Beca Doctoral usufructuada.

A Eneas, Jorge y Alberto por sus consejos, preguntas y validación durante el proceso.

A mis compañerxs de laboratorio, de facultad, de la JOFA y de congresos por los miles de debates (de todo tipo), músicas escuchadas, las negociaciones de los elementos faltantes para los experimentos, charlas de almuerzos y consultas pava recíprocas.

A mi madre y padre, dos pilares fundamentales que construyeron entornos fértiles para que mi proyecto crezca, florezca, de frutos y desparrame semillas.

A mis hermanxs, mis profes y estudiantes de vida más antiguos que tengo, por su amor incondicional eterno.

A mi compa, por *acompañar* la vida, *compartir* aventuras y *compatibilizar* las ciencias naturales con las sociales.

A mis amistades, por mostrarme nuevos mundos y divertirme en el camino. En especial a esxs que les gustaba preguntar y escuchar alguna respuesta sobre la naturaleza del universo.

A la capoeira, por sacarle protagonismo a la Ciencia y balancearla en su punto más óptimo.

Al futuro, que aún no se lo que me deparará.

Fecha: Octubre 2023

Lugar: Campana, Buenos Aires, Argentina

Santiago Cerrotta
DNI 35348818

Resumen

La técnica de interferometría de baja coherencia ha sido extensamente investigada, desarrollada, aplicada y comercializada dentro del área de la medicina durante las últimas décadas gracias a ser una técnica no invasiva. Durante los últimos años, las cualidades de esta técnica también empezaron a despertar interés dentro del ámbito industrial. Dentro de estas cualidades encontramos: el rango de medición de distancias o diferencias de camino óptico (desde micrones hasta varios milímetros), la resolución micrométrica, la capacidad de medir en tiempo real y sin contacto con la muestra accediendo tanto a la información superficial como a la del interior del producto o proceso deseado. Permitiendo mostrar esta información mediante gráficos en 1, 2 o 3 dimensiones. Estas capacidades posicionan a esta técnica con grandes potencialidades para ser utilizada dentro de la línea de Ensayos No Destructivos y caracterización de materiales, áreas muy valoradas dentro de la Industria.

Si bien hay mucho trabajo detrás de esta técnica, el foco estuvo puesto, tradicionalmente, en las necesidades requeridas por la Medicina que no son las mismas que las del ámbito industrial. Los requerimientos solicitados por industrias regionales e internacionales de rubros como el plástico, pinturas y recubrimientos, metalmecánica y vidrios (por mencionar algunas) están entorno al rango máximo de medición, los diseños de equipos robustos y a medida, la generación de algoritmos de postprocesado y la capacidad de mostrar los resultados de interés de una manera clara y entendible. Además, uno de los mayores desafíos es lograr estos requerimientos a un costo lo más bajo posible

para que la actividad industrial en cuestión sea económicamente redituable. En la tesis, se realiza un estudio de procesos particulares de vinculación con empresas e instituciones para dar ejemplos de estos requerimientos generales detectados.

Esta tesis busca desarrollar ciencia para que pueda ser transferida. Traer soluciones científico-tecnológicas a problemáticas presentes en la sociedad. Tuvo como objetivo específico diseñar y construir detectores no convencionales de la técnica de interferometría de baja coherencia en el dominio de las frecuencias con características diferentes a las ya conocidas que permitan extender su rango máximo de medición con bajos recursos, programar algoritmos de post procesado y vincularse con instituciones publicas y/o privadas a través de servicios de caracterización de muestras y/o consultorías. Con la aspiración de continuar desarrollando tecnología aplicada y acumulando experiencia para a un mediano plazo lograr transferir un equipo de medición de interferometría de baja coherencia que satisfaga la necesidad deseada de una de estas (u otras) instituciones. Estas nuevas formas de detección están basadas en: a) repensar el diseño del espectrómetro y personalizarlo para la medición requerida optimizando los recursos disponibles, b) agregar un interferómetro antes del espectrómetro que duplica y sintoniza su rango de medición a lo largo de varios centímetros, c) implementar redes neuronales artificiales que procesan señales de topografías reemplazando el uso de la transformada de Fourier, d) diseñar de detectores basados en cavidades Fabry Perot que trabajan en rangos y resoluciones similares a los del espectrómetro sin la necesidad de usar redes de difracción, e) una nueva técnica denominada Interferometría de baja coherencia en el dominio Temporal de Fourier (TFD-LCI) que utiliza la interferencia de la interferencia para detectar la transformada de Fourier de la señal de manera analógica, permitiendo de esta manera extender el rango de medición a varios centímetros.

Keywords— FD-LCI, interferometría, transferencia científica, detectores espectrales, señales interferométricas

Tabla de contenidos

Dedicatoria	i
Agradecimientos	iii
Resumen	v
Tabla de contenidos	xi
Lista de Figuras	xiv
Lista de tablas	xxiii
Lista de abreviaciones	xxiv
Lista de símbolos	xxv
1 Introducción y motivaciones	1
1.1 Estado del arte	1
1.1.1 Grandes distancias con bajo costo para FD-LCI	9
1.2 Problemática abordada por la Tesis	10
2 Conceptos generales: LCI, cavidades y redes neuronales	14
2.1 Interferometría de baja coherencia	14
2.1.1 Modelado matemático de LCI	19
2.1.2 Interferometría de baja coherencia en el dominio del tiempo	25
2.1.3 Interferometría de baja coherencia en el dominio de las frecuencias	27
Interferometría de baja coherencia con fuente sintonizable	31
Transformada de Fourier	32
Transformada Coseno	33
2.2 Luz viajando a través de cavidades	34

2.2.1	Haces gaussianos	34
2.2.2	Cavidad Fabry Perot	35
2.3	Redes Neuronales Artificiales	37
2.3.1	Redes Convolucionales	40
2.3.2	Estimación de frecuencias	42
3	FD-LCI para la Sociedad	45
3.1	Caminando de la Ciencia a la Sociedad y viceversa . . .	46
3.1.1	Mi proceso	46
3.1.2	Ciencia, Tecnología y Sociedad	48
3.2	Descripción de las aplicaciones realizadas	52
3.2.1	Medición de espesores de placas alveolares de policarbonato	53
3.2.2	Medición de altura de canales en microchips . .	54
3.2.3	Caracterización de rugosidades en muestras metálicas	56
3.2.4	Identificación de elementos contaminantes e im- purezas internas presentes en parabrisas	58
3.2.5	Caracterización por métodos ópticos de polvos contaminantes en muestras de parabrisas	61
3.2.6	Espesor recubrimiento de barniz en maquinas agrícolas	63
3.3	Plan de negocios	65
3.4	Aprendizajes y conclusiones	70
4	Espectrómetro personalizado	72
4.1	Funcionamiento del espectrómetro para FD-LCI	73
4.1.1	Simulaciones y cuentas	77
4.1.2	Propuesta de extensión de rango	86
4.2	Espectrómetro personalizado	87
4.3	Conclusiones	90
5	Interferómetro Heterodino	92
5.1	Descripción teórica	93
5.2	Mediciones	98

5.3	Conclusiones	102
6	Procesado de señales de FD-LCI con Redes Neuronales	104
6.1	Estimando frecuencias de señales topográficas de FD-LCI	105
6.2	Consideraciones generales	108
6.3	Estimación paramétrica de frecuencias con redes neuronales	110
6.4	Estimación de frecuencias a partir de la señal completa	115
6.5	Conclusiones	131
7	Detectores para FD-LCI usando cavidades Fabry Perot	133
7.1	Propagación de haces Gaussianos en cavidades Fabry Perot	134
7.1.1	Haces Gaussianos	134
	Fase de Gouy	135
7.1.2	Cavidad Fabry Perot	137
	Medición en cavidad FP	139
	Resonancias en cavidades FP con Fase de Gouy .	140
7.2	Nuevos Detectores para FD-LCI	143
7.2.1	Detector Axial	146
7.2.2	Detector Radial	147
7.3	Conclusiones y perspectivas	149
8	Interferometría de baja coherencia en el dominio Temporal de Fourier TFD-LCI	152
8.1	Demostración Teórica	153
8.1.1	Comparando TFD-LCI con TD-LCI y FD-LCI .	159
8.2	Comprobación experimental	161
8.2.1	Medición de una señal de TFD-LCI	162
8.2.2	Movimiento del brazo del detector de TFD-LCI .	163
	Precisión	165
	Extensión rango del actuador	168
	Muestreo y tiempo de adquisición	168
8.3	Medición de muestras monocapas	170

8.4	Aplicaciones industriales	171
8.4.1	Medición apuntada a envases	171
8.4.2	Medición de un parabrisas	174
8.4.3	Extensiones de la técnica	175
8.5	Conclusiones	175
9	Conclusiones Generales	177
A	Apendice	180
A.1	Capitulo 6: Redes convolucionales	180
	Publicaciones y premios	184
	Referencias	187

Organización de la Tesis

Esta tesis se organiza en 9 capítulos. Comenzando desde el estado del arte de la interferometría de baja coherencia (LCI) hasta la presentación de nuevos aportes innovadores en la detección de esta técnica desarrolladas durante este doctorado.

En el capítulo 1 se cuenta el devenir a través de los años de la técnica de la interferometría de baja coherencia en el dominio de las frecuencias (FD-LCI), avances significativos en las características de medición y aplicaciones al ámbito industrial. Detallando los trabajos más importantes asociados a estos temas. También se explican las motivaciones de este trabajo y se formula la problemática a encarar de la Tesis.

En el capítulo 2, se presentan los conceptos a partir de los cuales se trabaja. Se explican las diferentes versiones de la técnica de LCI y sus características principales. También se realizan breves introducciones de cavidades Fabry Perot y de redes neuronales artificiales.

En el capítulo 3, se analizan los esfuerzos de generar vínculos entre el laboratorio y las empresas. Se muestran mediciones realizadas con la técnica de FD-LCI convencional para diferentes instituciones y/o para ciertas aplicaciones. Se busca contar un poco sobre las experiencias de los servicios y las transferencias llevadas a cabo en todo este periodo. Analizando cada caso particular e identificando puntos altos y bajos que darán sentido y causalidad a los desarrollos realizados.

El trabajo de investigación de esta tesis se centra puntualmente en desarrollar nuevas y mejores formas de detección de la técnica de FD-LCI. Podemos agrupar las mejoras realizadas en dos bloques: El primer bloque, que son mejoras que requieren el uso de un espectrómetro (detector convencional de FD-LCI), detalladas en los capítulos 4, 5 y 6. Un segundo bloque, conformado por los capítulos 7 y 8 en donde no se requiere el uso del espectrómetro.

En el capítulo 4, se estudia el funcionamiento del espectrómetro y como sus características influyen en la técnica de FD-LCI, proponiendo diseños personalizados en función del requerimiento de la muestra a medir y que pueden incluir una

extensión del rango de medición de ser necesario.

En el capítulo 5, se explora la posibilidad de agregar un interferómetro extra antes del espectrómetro que permite sintonizar la ventana de medición a lo largo de varios centímetros.

En el capítulo 6, se utilizan redes neuronales para estimar la DCO de las señales obtenidas por el espectrómetro reemplazando parte del post procesado necesario para realizar la transformada de Fourier.

En el capítulo 7, se diseñan y proponen dos formas de detectar la señal de interferencia utilizando la resonancia presente en cavidades Fabry Perot con fotodiodos y/o cámaras.

En el capítulo 8, se presenta una nueva e innovadora técnica de detección denominada Dominio temporal de Fourier que permite extender el rango de FD-LCI a varios centímetros.

En el capítulo 9 se cierra la tesis detallando las conclusiones generales, las lecciones aprendidas y se desarrollan las perspectivas a futuro del trabajo realizado.

Lista de Figuras

2.1	Esquema de un interferómetro de tipo Michelson, destacando los campos eléctricos incidentes y reflejados en el espejo y en la muestra	17
2.2	Esquema de las intensidades normalizadas detectadas al desplazar una de las ramas del interferómetro: a) Para una única longitud de onda (izquierda), b) para 5 longitudes de onda superpuestas.	17
2.3	Esquema de la intensidad detectada al desplazar una de las ramas del interferómetro para 5 longitudes de onda superpuestas.	19
2.4	Esquema de los escaneos y coordenadas de desplazamiento. Izquierda: Adquisición unidimensional (A-scan). Un único perfil de profundidad midiendo la intensidad retroreflectada en función de la profundidad. Centro: Imagen 2D (B-scan). El haz de iluminación es barrido transversalmente en una dirección mientras se adquieren A-scan. Derecha: Adquisición 3D. Múltiples B-scan desplazándose en la dirección transversal restante, realizando un barrido sobre toda el área de la muestra. Imagen adaptada de [73].	20
2.5	Esquema de la relación por transformada de Fourier entre la función de coherencia $\gamma(z)$ de forma gaussiana caracterizada por L_c y el espectro de la fuente $S(k)$ centrado en k_0 caracterizado por su ancho Δk	23
2.6	Dos interferogramas para DCOs de $50 \mu\text{m}$ y $150 \mu\text{m}$ al utilizar una fuente de luz gaussiana centrada en 850 nm con un ancho de 60 nm .	24
2.7	Esquema del dispositivo experimental y de una señal de interferencia para la técnica de interferometría de baja coherencia en el dominio del tiempo. Cada lóbulo en la señal de interferencia corresponde a una interfase en la muestra. Imagen adaptada de [74]	26
2.8	Esquema del dispositivo experimental la técnica de interferometría de baja coherencia en el dominio de la frecuencia. Imagen adaptada de [74]	27

2.9	Esquema de la señal de interferencia y de su correspondiente transformada de Fourier en la técnica de interferometría de baja coherencia en el dominio de la frecuencia. Imagen adaptada de [74].	29
2.10	Esquema del dispositivo experimental correspondiente a la técnica de interferometría de baja coherencia con fuente sintonizable. Imagen adaptada de [74].	31
2.11	Esquema de una cavidad Fabry Perot de ancho d siendo iluminada por un haz Gaussiano, se detallan las múltiples reflexiones y sus distancias recorridas.	36
2.12	Esquema de la reflexión/transmisión total de una cavidad Fabry Perot para dos finzas (F) en función de la longitud de onda. Se detallan los conceptos de rango espectral libre (FSR) y resolución espectral ($\delta\lambda$).	36
2.13	Esquema de una neurona artificial, mostrando la analogía con una neurona biológica y detallando las entradas x_i , pesos w_{ij} , el sesgo θ_i , la función de activación f y la salida y_i	38
2.14	Esquema de una red neuronal densamente conectada, identificando la capa de entrada, capas ocultas y capa de salida.	39
2.15	Esquema de la función de costo en función de los pesos de la red. En cada iteración los valores de los pesos se acercan al conjunto que optimiza la función.	40
2.16	Esquema de las capas presentes en una red convolucional.	41
2.17	Esquema mostrando diferentes mapas de características extraídos de una imagen en una red convolucional de varias capas.	43
3.1	Inversión en investigación y desarrollo según tipo de actividad de diferentes países	50
3.2	Imagen de diferentes placas alveolares de policarbonato.	53
3.3	Barrido en área de la diferencia de camino óptico del espesor inferior de una placa en presencia de una de las costillas.	53
3.4	Esquema del chips a caracterizar, detallando el área A y el área B de interés.	55
3.5	Relevamiento del área A mediante la técnica de FD-LCI	55

3.6	Relevamiento del área B mediante la técnica de FD-LCI	56
3.7	Perfil de rugosidad obtenida de una muestra patrón mediante la técnica de FD-LCI.	57
3.8	Imagen de campo oscuro 5X de la muestra 2. Fibra sintética de diámetro variable entre 5 y 20 μm	59
3.9	Imagen de campo oscuro de 5X de la muestra 11.	59
3.10	Imagen 3D mediante la técnica de FD-LCI, del espesor del polímero en μm , de la muestra 13 tomando pasos de 5 μm . Notar que se observa la topografía de la suciedad	60
3.11	Imagen 2D mediante la técnica de FD-LCI haciendo incapie en la intensidad de la reflexión de la muestra 13. Notar que se puede apreciar detalles de la textura. Pasos de 5 μm	61
3.12	Imagen 2D de microscopio con 5x de aumento de una de las muestras del grupo PMG.	62
3.13	Parte representativa de una columna de fibra de carbono junto con un esquema de los puntos de medición (arriba). Espesor del recubrimiento a lo largo de la muestra (abajo).	64
3.14	Barrido de un área de 4 mm x 6 mm con pasos de 50 μm del espesor de recubrimiento.	64
3.15	Primer prototipo trasladable de un tomógrafo óptico desarrollado en el Doctorado por el Grupo de Fotónica Aplicada, basado en la técnica de FD-LCI	66
3.16	Análisis Canvas explicitando los 9 componentes de la empresa de base tecnológico propuesta.	67
3.17	Análisis FODA de la empresa de base tecnológico propuesta.	67
4.1	Esquema de una configuración de espectrómetro del tipo Czerny-Turner. Donde A hace referencia al haz incidente, B a la ranura, C al primer elemento óptico (espejo concavo en este caso), D al elemento dispersivo, E al segundo elemento óptico y F al dispositivo de detección de luz	73

4.2	Esquema del espectrómetro personalizado, donde se detallan los elementos que lo componen y los parámetros relevantes a tener en cuenta.	78
4.3	Esquema de la dispersión de una red de difracción de 1200 líneas/mm para un ángulo incidente de 18.9 grados y un ancho espectral $\Delta\lambda = 130$ nm centrado en 830 nm	80
4.4	Esquema de la distancia a la cual hay que ubicar la lente de salida respecto a la red de difracción d_{rl} contemplando la separación de la longitud de onda inicial y final.	80
4.5	Ancho mitad de altura FWHM del pico de la señal de interferencia en función de la cantidad de líneas iluminadas para diferentes redes.	82
4.6	Tamaño del spot sobre detector en función de las longitudes de onda para $f_{out} = 100$ mm y para un diámetro de haz $D = 12$ mm.	83
4.7	Posición transversal x_{foco} del foco de cada longitud de onda para $\Delta\lambda = 60$ nm, para el orden 1 de una red de 1200 l/m y $f_{out} = 100$ mm. Ocupando un espacio total $D_x = 7,72$ mm, para un diámetro de haz $D = 12$ mm	84
4.8	Cálculo de la resolución espectral de cada pixel mediante una simulación integral del espectrómetro	85
4.9	Cálculo de la resolución espectral de cada pixel modificando solo el ancho de haz a $D = 22$ mm	86
4.10	Esquema de la extensión del rango de medición de un espectrómetro para FD-LCI, para mismos anchos espectrales de iluminación con lentes de mayor distancia se puede sobrellenar la cámara	87
4.11	Esquema para las máximas profundidades medida en función de la cantidad de píxeles iluminados para diferentes anchos espectrales	88
4.12	Medición de la intensidad en cada pixel de la señal interferométrica de un cubre objetos con el espectrómetro personalizado con los elementos disponibles en el laboratorio.	89
4.13	Comparación de 32 mediciones espaciadas cada 100 μm (cada una con un color distinto) entre el espectrómetro personalizado y un espectrómetro comercial Ocean Optics 4000.	89

5.1	Esquema de dos interferómetros tipo Michelson en serie iluminados con un Fuente de luz (FL), detallando los separadores de haces (sh), las distancias de cada rama, los coeficientes de reflectividad de cada espejo y usando un espectrómetro como detector.	94
5.2	a) Diagrama esquemático de una muestra monocapa con un DCO mayor el rango de medición del espectrómetro. b) Esquema de los picos experimentales de la señal de la transformada de Fourier, utilizando el interferómetro en tándem. Ajustando ΔR es posible ubicar el pico resta (P_r) dentro del rango dinámico del espectrómetro.	97
5.3	Diseño de la configuración experimental. Típico montaje de interferometría de baja coherencia en fibra óptica con un segundo interferómetro añadido antes del espectrómetro.	99
5.4	Medición de un cubre-objetos con ΔR sintonizado dentro del rango dinámico del espectrómetro. Se identifican las DCO de la muestra ($n_g \Delta d$), del segundo interferómetro (ΔR) y los picos suma (P_s) y resta (P_r).	100
5.5	a) Esquema de una muestra conformada por dos cubre-objetos paralelos separados 16 mm, en el cual se indican todas las distancias características. Se realizaron mediciones para sintonizaciones de b) $\Delta R = (2,017 \pm 0,008)$ mm y c) $\Delta R = (15,951 \pm 0,012)$ mm.	102
6.1	Señal típica de FD-LCI de una topografía, donde se puede apreciar la oscilación de la amplitud en función de k	106
6.2	Esquema de las etapas de procesamiento necesario para obtener la DCO deseada.	107
6.3	Ejemplos del procesado convencional. a) señal de FD-LCI detectada, b) señal con filtrado de las frecuencias bajas, c) señal anterior habiéndola dividido por la señal envolvente y d) Transformada rápida de Fourier de la señal anterior.	108
6.4	a) Esquema ilustrativo con los parámetros elegidos para caracterizar una señal típica de FD-LCI. b) Valores de los parámetros para las 1000 simulaciones realizadas variando la distancia z_s	111

6.5	Estructura de la Red Neuronal de 8 neuronas densamente conectadas elegida para estimar frecuencia de señales parametrizadas. Se toman 4 valores de entrada y uno de salida.	112
6.6	Índice de refracción en función de la longitud de onda utilizado en la simulación.	113
6.7	a) Esquema de una señal de LCI experimental con chirpeo, notar que $SM_1 < SM_2$ y $AM_1 < AM_2$ para una distancia z_s . b) Valores de los 7 parámetros para las 1000 simulaciones realizadas variando la Distancia z_s	114
6.8	Esquema inicial de las etapas de preprocesado de una señal FD-LCI antes de ser introducida a la red neuronal.	116
6.9	Muestreo de la señal a procesar para las diferentes redes neuronales. Los 2000 puntos seleccionados se encuentran separados una distancia k_m y son los valores de entrada a la red neuronal. El ejemplo en este caso es una señal cosenoidal con un z_s de $50 \mu m$	118
6.10	Esquema de la una red neuronal de tres capas densamente conectadas de 2,2 y 3 neuronas con salida regresiva.	119
6.11	Predicción para 100.000 señales $\cos(kOPD)$ para la red 223 para 60 epoch. $RMSE = 2.3 \mu m$ y $RSE_{max} = 14.8 \mu m$	119
6.12	Esquema de una señal cosenoidal con la presencia de un desplazamiento debido a la fase extra.	120
6.13	Esquema de la red densamente conectada 100-500-250-125-50-25-10.	121
6.14	Predicción y error una red densamente conectada de 1000-500-250-125-50-25-10 neuronas para un entrenamiento con 100.000 señales del tipo $\cos(kDCO + \phi)$	122
6.15	Esquema de una señal de FD-LCI sin la componente de baja frecuencia. La cual posee una oscilación cosenoidal con una envolvente de tipo gaussiana.	123
6.16	Esquema de la red neuronal que contiene una única capa convolucional, seguido de una capa max Pooling y dos capas densamente conectadas de 10 neuronas	124

6.17	Predicciones y error absoluto de la red convolucional para señales oscilatorias con envolvente gaussiana.	124
6.18	Esquema de las etapas de preprocesado, notar que empleando una red neuronal se puede evitar también la etapa de determinación de la envolvente	125
6.19	Predicciones y error absoluto de la red con 7 capas convolucionales para señales típicas de FD-LCI	127
7.1	Se simularon los valores de a) la cintura y b) el radio de curvatura en función de la distancia de propagación z para una cintura en el foco de $500 \mu m$ y una longitud de onda de $850 nm$	135
7.2	Simulaciones de la Fase de Gouy en función de la propagación a través de $10 cm$ para a) $w_0 = 10 \mu m$, b) $w_0 = 100 \mu m$ y para c) $w_0 = 500 \mu m$	136
7.3	a) Intensidad de la función de transferencia en el eje axial al variar el ancho de la cavidad d para una única longitud de onda de $\lambda = 850 nm$. b) Intensidad de la función de transferencia para un d y z fijo para distintos radios en micrómetros para $\lambda = 850 nm$	138
7.4	Diseño experimental de una cavidad FP plano-cóncava iluminada con un He-ne de $632.8 nm$	139
7.5	Patrón de anillos para una cavidad de $500 \mu m$ plano-cóncava con haces gaussianos con cintura de $500 \mu m$ obtenida mediante una a) simulación y b) medición experimental para parámetros iguales y a escala. c) Perfil de la simulación.	140
7.6	Gráfico de la ITF de una cavidad FP al incidir con $850 nm$ para diferentes valores de z al ir variando el ancho de la cavidad d . Esta normalizado por la longitud de onda incidente para identificar que para z pequeños la posición de la resonancia se desplaza.	141
7.7	Esquema del criterio elegido para determinar cuando la Fase de Gouy puede afectar la resonancia en un cavidad Fabry Perot.	142
7.8	Esquema de los dos métodos de detección propuestas axial y radial.	144

7.9	Señal de interferencia de baja coherencia para un DCO de 200 μm con una fuente de luz con gaussiana centrada en 850 nm y un ancho espectral de 60 nm.	145
7.10	Función de transferencia de la intensidad de cada longitud de onda del detector axial al iluminar con una señal de interferencia de baja coherencia con una diferencia de camino óptico de 200 μm	146
7.11	Función de transferencia de la intensidad de cada longitud de onda del detector Radial para el eje $x = 0$ y para el eje y entre los 600 μm a 900 μm al iluminar con una señal de interferencia de baja coherencia con una diferencia de camino óptico de 200 μm	148
8.1	Configuración experimental para la técnica de TFD-LCI. Un sistema de baja coherencia compuesto por la fuente de luz (FL) un interferómetro de tipo Michelson, las reflexiones en los espejos vuelven a interferir en el detector temporal de Fourier, compuesto por un interferómetro con un brazo móvil, un fotodiodo (Fot) y un osciloscopio (Osc).	154
8.2	Simulación de una señal en el dominio de temporal de Fourier de un interferómetro tipo Michelson con espejos de igual coeficiente de reflexión. La envolvente de la señal es la parte real de la transformada de Fourier.	158
8.3	Señal obtenida en el osciloscopio al desplazar el brazo movable en una configuración de TFD-LCI (superior) y TD-LCI (inferior) para la medición del mismo porta objeto.	161
8.4	Foto del dispositivo experimental de TFD-LCI utilizado para las primeras validaciones de la técnica	162
8.5	Medición experimental de la técnica de TFD-LCI de un cubre objetos	163
8.6	Procesamiento de la señal de TFD-LCI. Gráfico del modulo de la señal de TFD-LCI y calculo de los máximos locales (superior). Gráfico de la función envolvente de cada lóbulo con su máximo global (inferior). En rojo se representa el ancho de cada lóbulo.	164
8.7	Imagen del actuador/motor en conjunto con el carrito utilizado Zaber X-LSM050A	165

8.8	Conteo de máximos para calcular la distancia recorrida de la rama R_1 mediante alta coherencia	166
8.9	Diferencia Dif entre la posición medida con alta coherencia y la posición esperada vt en función del desplazamiento ΔR para dos medidas representativas.	167
8.10	Propuesta par duplicar el rango del motor de desplazamiento	169
8.11	Prototipo experimental de la técnica de TFD-LCI utilizada para las aplicaciones industriales. Para el sistema LCI se implementó un interferómetro de una sola rama en fibra	172
8.12	Imagen de objetos industriales tipo envases que han llegado al laboratorio para ser analizados a lo largo de los años	172
8.13	a) Esquema de las capas internas de la muestra indicando las DCO b) Señal TFD-LCI de una muestra multicapa larga. Se detectan todos los términos de interfaces internas y autocorrelación.	173
8.14	a) Esquema de las capas interna del parabrisas indicando las las diferentes DCO. b) Correlación de dos señales de TFD-LCI del parabrisas y un área ampliada para observar la diferencia de camino óptico más cercanas.	175

Lista de tablas

4.1	Distancias a la cual una red de difracción de 600 líneas/mm separa la longitud de onda inicial y final al ancho de una lente de 25,4 mm.	81
5.1	Valores nominales de las muestras medidas. Los espesores fueron medidos con un micrómetro y los índices de refracción (n_g) fueron proporcionados por los fabricantes.	99
6.1	Tiempo que demora cada etapa de preprocesado utilizando la estimación de frecuencia para la técnica de FD-LCI. Se marcan los órdenes de magnitud ya que el valor de los tiempos depende fuertemente del procesador. * El error en los tiempos es de redondeo ± 0.01 .	110
6.2	Resumen de los resultados de las redes neuronales implementadas. Se evidencian los tiempos de entrenamiento (T. entren) como los tiempos de ejecución (T. ejec).	130
8.1	Mediciones en un solo punto de diferentes espesores de muestras monocapa. El exactitud para TFD se calcula a partir de la diferencia Dif entre la alta coherencia y la posición esperada dividida por el índice de refracción en el rango de movimiento de la muestra. La precisión se calcula sobre 10 mediciones	170

Abreviaciones

DCO diferencias de camino óptico. 16

END ensayos no destructivos. 5

FCN fully connected network. 38

FD-LCI Interferometría de baja coherencia en el dominio de las frecuencias. 3,
27

FL fuente de luz. 16

FP Fabry Perot. 35, 133

ITF función de transferencia de intensidad. 137

LCI Interferometría de baja coherencia. 1, 18

RMSE error cuadrático medio. 109

RN redes neuronales artificiales. 37

SH separador de haces. 16

SS-LCI Interferometría de baja coherencia de fuente sintonizable. 3, 31

TD-LCI Interferometría de baja coherencia en el dominio del tiempo. 3, 25

TFD-LCI Interferometría de baja coherencia en el dominio Temporal de Fourier.
152

Lista de símbolos

$\delta_r \lambda$ Resolución espectral en longitud de onda

$\delta_r k$ Resolución espectral

λ Longitud de onda

L_c Longitud de coherencia

n Índice de refracción

”Caminando en línea recta no puede uno llegar muy lejos” [1].

Saint Exupery, A.

1

Introducción y motivaciones

1.1 Estado del arte

La Interferometría de baja coherencia (LCI) [2] es una técnica que utiliza luz con cierto ancho espectral para obtener información del interior o de la superficie de un material con resolución micrométrica a partir de la luz dispersada en el. En caso de extender este barrido a diferentes puntos de la muestra y conseguir generar imágenes bidimensionales o tridimensionales de la misma se la suele denominar Tomografía Óptica Coherente (OCT por sus siglas en ingles) [3]. En la bibliografía algunos autores usan a LCI y a OCT como similares mientras que otros limitan el término de LCI para la adquisición y procesado de imágenes unidimensionales y

el término OCT para imágenes de mayor dimensión.

Las técnicas de LCI y OCT tuvieron gran evolución a lo largo de estos últimos 30 años. Se pueden identificar los trabajos que dieron origen a estas líneas hacia finales de la década del ochenta [4] e inicios de los noventa [5]. Estos primeros desarrollos están específicamente asociados al área Médica de la Oftalmología, ya que estas técnicas poseen la gran capacidad de generar imágenes biomédicas de tejidos vivos, de una manera rápida, barriendo los rangos de medidas deseadas y resoluciones requeridas en esta área. Muy usada para analizar la retina, la córnea, el iris como también para el diagnóstico de enfermedades presentes en el ojo humano como el glaucoma [6]. Hacia fines de la década e inicios del 2000 y luego de mejoras continuas en la técnica, se fue expandiendo para otras ramas dentro de la medicina como dermatología [7] para inspeccionar estructuras pequeñas en la piel, agrupaciones de colágeno e irrigación sanguínea. Su utilización en la realización de endoscopias permitió que genere gran interés en la Cardiología [8] y también en la Oncología [9]. En menor impacto pero ampliamente utilizado en Odontología [10] para caracterizar dientes y enfermedades asociadas. Paralelamente en estos momentos empieza a dejar de ser usada únicamente por la Medicina y la empezaban a adoptar otras disciplinas [11]. En la década del 2010, cuando se pensaba que la técnica ya se había instalado en todas las áreas posibles de la medicina, se empieza a utilizar para la realización de angiografías, el cual es un diagnóstico de imágenes que se dedica a estudiar los vasos sanguíneos que no son visibles mediante la radiología convencional y que por lo general es altamente invasiva. Esto genera un nuevo auge de la técnica que continúa empujando a más inversiones para el desarrollo y transferencia tecnológica.

A lo largo de los prácticamente 30 años de existencia, estas técnicas estuvieron en continua evolución, se logran diferenciar dos grandes versiones. La primera que surge es la técnica de Interferometría de baja coherencia en el dominio del tiempo (TD-LCI), la cual genera la señal de interferencia a partir del desplazamiento de un espejo en la rama de referencia del interferómetro [5]. Unos años más tarde, se desarrolló la técnica de Interferometría de baja coherencia en el dominio de las frecuencias (FD-LCI) que evita el desplazamiento mecánico de una de sus ramas de interferencia y se detecta con un espectrómetro difractivo. Esto permite el diseño de un sistema más rápido, compacto y robusto [12]. Con los avances tecnológicos en fuentes de luz de baja coherencia, se desarrolló una mejora significativa pudiendo realizar un barrido en el espectro de la luz que incide en el interferómetro de manera controlada y realizar la detección con un fotodiodo, denominada también Interferometría de baja coherencia de fuente sintonizable (SS-LCI). Se consigue de esta manera mayor velocidad, resolución y rango máximo de medición [13, 14] a costo de aumentar su valor económico considerablemente.

Debido a la gran capacidad en diagnóstico de imágenes logradas con estas técnicas y a la ausencia de otras tecnologías que consiguiesen resultados similares, las técnicas de LCI y OCT empezaron a trascender a los laboratorios de investigación únicamente. Rápidamente empezaron a realizarse trabajos en conjuntos con Hospitales clínicos. Un claro ejemplo son las pruebas que se comenzaron a realizar entre el Laboratorio de Investigaciones de Electrónica liderado por James Fujimoto del Instituto Tecnológico de Massachussetts (MIT), con el Hospital General de Massachussetts [15, 16]. A medida que las pruebas continuaban siendo exitosas, empezaron a engendrarse empresas de base tecnológica donde su obje-

tivo era diseñar, construir y comercializar equipos de LCI y OCT [17]. Ya que se fue detectando que en el mercado de la salud, puntualmente dentro de Oftalmología en sus comienzos, había un nicho interesado en utilizar esta tecnología en sus tareas rutinarias. Algunas de estas empresas fueron LightLab, Topcon, Biotigen, Lumedica, Carl Zeiss Meditec, Heidelberg Engineering, etc. Muchas de estas fueron fundadas por los directores de los laboratorios más influyentes de LCI y OCT a nivel internacional (James G. Fujimoto, Eric. A. Swanson, Christopher K. Hitzenberger, Adam Wax, etc) o a partir de grandes empresas que ya estaban posicionadas en el mercado de la óptica y medicina. Para dimensionar el impacto de la técnica de OCT desde una perspectiva económica, se puede decir que generó ingresos totales de más de 4770 millones de Euros entre 1996 y 2016. En 2015 el registro fue de 688 millones y con una tasa de crecimiento anual compuesta del 12 % llegando a más de 1500 millones de euros para el 2020 [11], cifra que se viene manteniendo en la actualidad.

Si bien la historia y la dirección de LCI a nivel internacional está determinada por sus aplicaciones en Medicina, las cualidades de la técnica también resultan provechosas y de gran interés para otras áreas [11]. La capacidad de LCI para el estudio del interior de materiales como de su superficie (conocida también como Topografía Óptica Coherente) llevó a que a mediados de la década del 2000 se la empiece a utilizar en la conservación de obras de arte [18] y arqueología [19], metrología y, por último el tema en el que más se enfoca esta tesis, el ámbito industrial [20].

El interés de la aplicación de LCI en la industria circula entorno a la caracterización de materiales y procesos. Posicionándose como una técnica con grandes

potenciales dentro de la línea de ensayos no destructivos (END) [21], área que ya existe dentro del ambiente industrial. Los END son un grupo de técnicas que se dedican a evaluar propiedades de un material, componente o sistema sin causar daños, permitiendo a la industria ahorrar dinero y tiempo, detectar cierto tipo de problemas en las líneas de producción e investigar el producto sin destruirlo.

Entre las aplicaciones industriales de LCI se pueden destacar la determinación de fisuras, medición de espesores, secado de pinturas, perfiles de superficies con grandes ángulos de inclinación, penetración de líquidos en medios porosos [22], medición de deformaciones y determinación de texturas [23]. También, se ha implementado LCI en productos y/o procesos de industrias como la metalmecánica [24], films delgados [25], autopartes, rugosidad [26], control de calidad, pinturas y recubrimientos [27], entre otros [28].

Como se fue describiendo, la técnica de LCI lleva varios años de vida, actualizándose frecuentemente y empujando sus límites para satisfacer nuevas necesidades de distintos sectores sean médicos o industriales. Por estos motivos y su consecuente inversión en investigación los límites de la técnica continúan extendiéndose.

La resolución de la técnica, la cual está íntimamente relacionada con la fuente de iluminación, en sus comienzos rondaba en las decenas de micrómetros. Con los desarrollos de diodos superluminiscentes [29], fuentes sintonizables [13] y supercontinuas [30] se consiguió llevar el ancho espectral de iluminación a varias centenas de nanómetros logrando resoluciones cercanas a 1 o 2 micrones. En general siempre se utilizó luz infrarroja (longitudes de onda mayores a 800 nm) debido a la absorción

de los tejidos humanos, sin embargo se demostró experimentalmente que utilizando rangos visibles de la luz (vis-OCT) se consigue una resolución submicrométrica [31] ya que la resolución mejora para longitudes de onda más pequeñas. Hoy en día vis-OCT es una especialidad que se está volviendo a utilizar en muestras donde la absorción no sea crítica en esos rangos [32].

Otra gran fortaleza de LCI y OCT es la velocidad de adquisición, la cual le permite obtener imágenes en tiempo real. A lo largo de su existencia de estas técnicas, la velocidad de adquisición aumentó prácticamente tres órdenes de magnitud [33]. Para adquirir una imagen bidimensional es necesario primero tomar una medición de un punto la cual nos brinda la información axial (eso se lo denomina A-Scan). Segundo, desplazarse lateralmente sobre la muestra y volver a adquirir. Esto se repite sucesivamente, se procesa la información y se juntan los A-Scan conformando la imagen bidimensional también llamada de B-Scan. Al pasar de TD-LCI a FD-LCI la velocidad de adquisición mejoró más de un orden de magnitud llegando a 16000 Hz para cada A-Scan [34] ya que se evitaba el desplazamiento de una de las ramas. Volvió a aumentar al utilizar la técnica de SS-LCI ya que el barrido del espectro de la fuente se logra a una velocidad mayor de lo que demora el espectrómetro en realizar una adquisición llegando a velocidades mayores a 100 kHz. Hoy en día existen varias tecnologías de lasers sintonizables. En especial con las técnicas de sintonización como *vertical-cavity surface-emitting laser* (VCSELs) se logran velocidades de unos MHz [33] y más aún con el estiramiento de tiempo "time-stretch" (TS-OCT) se consiguen velocidades mayores a 40 MHz [35]. Estas técnicas avanzadas traen otras dificultades asociadas por lo que no son muy utilizadas en aplicaciones de LCI y OCT.

El rango máximo de medición alcanzado es otro de los parámetros claves en los sistemas de LCI. En FD-LCI, la máxima distancia medible está dada por la resolución del espectrómetro. Es decir, qué tan bien puedo diferenciar el espectro. Por estos motivos es que hay muchos estudios sobre espectrómetros para LCI [36], sobre el decaimiento de la intensidad de la señal al aumentar la distancia medida debido a la detección con píxeles finitos denominada Fall-off [37], algoritmos que buscan mejorar la relación señal ruido y también nuevas formas de detección [38, 39]. Estas últimas mencionadas son en las que se centra mayoritariamente esta Tesis. Mientras que en SS-LCI la distancia máxima está dada por la fineza con que puedo ir sintonizando las diferentes longitudes de onda del espectro.

El post procesado de la información adquirida juega un rol clave en las imágenes conseguidas. Se utiliza por ejemplo para mejorar la calidad de la señal, filtrar artefactos, realizar la transformada de Fourier en FD-LCI, identificación y clasificación de imágenes, etc. Actualmente se programan algoritmos puntuales para cada aplicación de LCI concreta para lograr una efectividad mayor. Se han obtenido muy buenos resultados al introducir otros métodos de procesamiento como la descomposición empírica de modos y wavelets [40] y análisis de fase [41], ya que han demostrado una mejora en la detección de señales con baja relación señal a ruido. Además con el gran advenimiento de la Inteligencia Artificial muchas de estas tareas se pueden realizar mediante el uso de redes neuronales artificiales [42, 43].

A lo largo de estas décadas también se fueron desarrollando variaciones y/o subtécnicas de FD-LCI donde cada una tiene cierta cualidad que la diferencia. Como para mencionar algunas de ellas, podemos encontrar LCI con luz polarizada (PS-LCI) [44] que se utiliza para detectar birrefringencia de materiales, OCT de

campo completo (FF-OCT) [45] que realiza OCT de toda una imagen evitando que sea un barrido punto por punto, Angle Resolved OCT [46] que mejora la relación señal ruido realizando una incidencia con ángulo en la muestra y el desarrollo de Doppler OCT tuvo gran éxito ya que permite medir velocidades y dirección de flujos [47]. Otra tendencia en la actualidad es a armar sistemas de varias técnicas en paralelo para extraer distinto tipo de información de manera simultanea. LCI puede extraer información de la morfología de las muestras de interés en la escala micrométrica, pero no por ejemplo de la química. Por estos motivos técnicas como LIBS [48], Microscopia de fluorescencia [49], Imágenes de Terahertz, Microscopia confocal [50], microscopia de dos fotones [51] se complementan muy bien con LCI y OCT.

Otra línea de la técnica de LCI y OCT que se encuentra en crecimiento en los últimos años es la de generar sistemas con prestaciones de alta calidad sin la necesidad de estar en los límites mundiales de la investigación y hacerlo a un bajo costo económico. En los congresos internacionales más importantes de OCT como el *Biophotonics* que organiza la Sociedad de Ópticos de America (ex OSA actual Optica) existe un espacio de trabajos denominado “Low Cost OCT equipment” con el objetivo de entrar con mayor profundidad en la industria [52] y además de masivizar los equipos de OCT para la población para que los grandes hospitales no sean los únicos que puedan acceder a esta tecnología [53]

1.1.1 Grandes distancias con bajo costo para FD-LCI

La causa del límite de medición máxima en FD-LCI está dada por la resolución del espectrómetro $\delta_s \lambda$ (Ecuación 2.16). Encontrar nuevas estrategias de medición de la técnica FD-LCI con largo alcance, bajo costo y con resolución micrométrica continúa siendo un gran desafío. Especialmente para las industrias que tienen dentro de su proceso de producción la fabricación de películas delgadas, laminados semitransparentes, vidrios, envases y botellas [54] y también para otras áreas médicas no convencionales que se enfocan en la garganta [55] y los oídos [56].

Las diferentes estrategias utilizadas para ampliar el rango de medición más allá de los clásicos 3 ó 4 mm en una versión de bajo costo pueden clasificarse en dos grupos. El primer grupo consiste en optimizar el rendimiento del sistema convencional [57] del hardware, especialmente para mejorar la sensibilidad del espectrómetro [58] y minimizar el efecto de fall-off [59], hasta el procesamiento de la señal. También se trata de adquirir más de un interferograma y aplicar diferentes algoritmos como el espectro complejo [60]. Este grupo consigue un alcance de 7 u 8 mm. El segundo grupo introduce una modificación en el dispositivo experimental; un divisor de haz adicional, un interferómetro y/o una cámara por lo general. En [61] una configuración de banda de Talbot permite mejorar la sensibilidad y duplica el rango de medición. Un método heterodino innovador consiguió un alcance de unos 5 cm [38] utilizando un interferómetro con redes de difracción y una cámara como detector. Por último, los trabajos existentes que utilizan un interferómetro en cascada adicional consiguen diferentes funcionalidades. A esta configuración también se la suele llamar como doble interferómetro o interferómetro en tándem. En [39,

[62, 63] el interferómetro adicional sintoniza el rango milimétrico del espectrómetro como una ventana a través de varios centímetros. Además del interferómetro adicional en [64], un espectrómetro y una cámara y en [65], un canal adicional con un acoplador de fibra 3x3 y un fotodetector autobalanceado se utilizan para medir escalones y espesores de milímetros con barridos más rápidos. En [66] se utilizan un interferómetro de Michelson y un interferómetro Mach-Zehnder para mejorar la resolución. En [67] se utiliza un método interferométrico en tándem de baja coherencia para medir grandes distancias internas de una muestra de dos espejos paralelos. Sin embargo, ninguno de estos trabajos presenta un esquema en el que se utilice un equipo de bajo costo que realice mediciones con rangos superiores a un centímetro.

1.2 Problemática abordada por la Tesis

La técnica de LCI ha extendido su rango de aplicación al estudio de materiales [68], donde ha tenido un gran impulso en la caracterización de superficies (topografía) y el interior de materiales (tomografía), para diferentes usos. La caracterización de materiales, en general, es un buen punto de partida para la mejora de procesos, ya que permite optimizar los recursos y asegura su correcto uso, permite corroborar el cumplimiento de normas específicas, obteniendo así productos de mayor calidad. Por otro lado, en los procesos industriales tanto en línea de producción o fuera de ella, requieren de equipamientos que brinden más precisión, robustez e inclusive diseños específicos. Permitiendo, por ejemplo, detectar derivas del proceso con posibilidad de inmediata corrección.

A lo largo de la vida del laboratorio del Grupo de Fotónica Aplicada (GFA), donde se investiga y se desarrolla esta técnica hace más de 20 años, muchas empresas de la zona de Zarate, Campana, Pacheco, Pilar, Capital Federal, Chivilcoy y distintos centros y laboratorios de investigación como el INTI, CIOP- CONICET, CONEA entre otros, se han mostrado interesados en la utilización de esta técnica para la caracterización de materiales, procesos constructivos y controles de calidad. Además, mediante análisis de mercado hemos identificado que existen un gran número de empresas nacionales de distintas industrias que podrían estar interesadas, ver Sección [3.3](#)

Como se explicó en la sección anterior, el uso de las fuentes sintonizables mejora considerablemente la resolución, el rango máximo de medición, el tiempo de adquisición y la intensidad incidente de luz pero encarece considerablemente el valor económico del equipo. El valor de una fuente sintonizable para LCI suele estar por encima de los USD 20.000. Algunas aplicaciones dentro de la medicina están dispuestas a pagar esos valores, pero en general dentro de las industrias estos valores restringen el desarrollo de un equipo o transferencia tecnológica. Por otro lado, estas características óptimas no son requeridas para las necesidades específicas de la industria que solicita una solución a su problemática. El desafío se encuentra en el diseño y desarrollo de un equipo puntual acorde a ciertos requerimientos específicos.

Por estos motivos hay nichos importantes para seguir investigando y desarrollando dentro de la técnica de FD-LCI que aún no han sido explotados y que esta tesis busca profundizar:

1.) La capacidad de diseñar espectrómetros a medida para rangos estándar de una aplicación.
2.) La posibilidad de desarrollar nuevas formas de detección para FD-LCI que permitan extender el rango máximo de medición por encima del centímetro ya que de esta manera se podrían captar nuevas necesidades industriales en donde la técnica de FD-LCI se podría utilizar.
3.) Inventar nuevos detectores que posean diferente naturaleza de funcionamiento y por ende otras ventajas y otras limitaciones que permitan complementarse con las ya existentes.
4.) Utilizar, en estas u otras soluciones, recursos de bajo costo para que resulte más atractiva la adopción de esta técnica en el sector industrial.
5.) Adaptar las nuevas tecnologías y herramientas de inteligencia artificial, que tan en auge se encuentran en estos momentos, al post-procesado de las señales de FD-LCI.
6.) Continuar realizando servicios de caracterización y/o consultorías a instituciones privadas/públicas que se acerquen al laboratorio para ir testeando las nuevas tecnologías desarrolladas.

Esta tesis busca seguir aprendiendo y desarrollando la capacidad de generar transferencia de tecnología desde la Ciencia al sector productivo en países no industrializados. Como así también armar canales formales que permitan articular los actores en cuestión (laboratorio, universidades, oficinas de vinculación tecnológica, industria, empresas, etc) tanto para comprender la problemática planteada por la

industria como para proponer una solución específica que le sea efectiva y poder completar el proceso de transferencia.

”¿Qué es más difícil, encontrar la respuesta o hacer la pregunta correcta?” [69].

Oscar E. Martínez

2

Conceptos generales: LCI, cavidades y redes neuronales

2.1 Interferometría de baja coherencia

La interferometría es una técnica ampliamente utilizada en el campo de la óptica en una gran variedad de aplicaciones que van desde la medición de longitud de onda de una fuente hasta la medición de distancias, ángulos y formas debido a su alta precisión [70]. También es capaz de proporcionar información detallada sobre la estructura y propiedades ópticas del objeto de interés.

La interferometría utiliza la superposición de dos o más haces de luz para pro-

ducir un patrón de interferencia que puede ser analizado para extraer información sobre el objeto en cuestión. La longitud de onda de la luz es un parámetro importante, ya que su valor va a determinar la resolución y la precisión de la técnica. Longitudes de onda más pequeñas generan mayor resolución y precisión en las mediciones.

Para que exista interferencia entre los haces es necesario que sus amplitudes y fases estén correlacionadas tanto espacial como temporalmente; a esta característica se la denomina coherencia de la luz [71]. Si la fase del haz en un punto determinado en el espacio se correlaciona con la fase del otro haz en el mismo punto en diferentes momentos del tiempo se dice que son temporalmente coherentes. La longitud de coherencia (L_c) es una medida en distancia de la duración en el tiempo de la correlación entre dos puntos de la onda. Las fuentes de luz con una longitud de coherencia corta tienen un ancho espectral amplio y producen patrones de interferencia definidos sólo por un corto intervalo de tiempo, un ejemplo de esto son los diodos superluminiscentes. Mientras que las fuentes de luz con una longitud de coherencia larga producen patrones de interferencia más estables y definidos. Por otro lado, si la fase de un haz en un punto determinado en el espacio se correlaciona con las fases de otro haz en puntos cercanos en el espacio se dice que son coherentes espacialmente. La coherencia espacial de una fuente de luz está determinada por su tamaño y forma. Por ejemplo, en fuentes extensas como una lámpara incandescente que tienen un filamento largo, se suele restringir el área de luz a algunos μm^2 para conseguir coherencia espacial del haz.

Una de las maneras de generar dos haces coherentes a partir de la misma fuente es utilizando una configuración de tipo Michelson, ver Figura 2.1. Esta utiliza un

separador de haces (SH) para dividir la luz proveniente de la fuente de luz (FL) en dos caminos ópticos diferentes. Uno viaja por la rama llamada de muestra recorriendo una distancia z_M y el otro por la rama de referencia recorriendo una distancia z_R , luego de reflejarse y volver hacia atrás por el mismo camino se recombinan nuevamente y producen el patrón de interferencia cuya intensidad puede ser adquirida con un detector. Estas dos ondas electromagnéticas al llegar al detector acumularon un recorrido distinto, esta magnitud se la denomina diferencias de camino óptico (DCO) y se la puede calcular como:

$$DCO = 2n\Delta d \quad (2.1)$$

Donde n es el índice de refracción y $\Delta d = z_M - z_R$, el factor dos es debido al recorrido de ida y vuelta en cada rama del interferómetro.

Si la FL posee una única longitud de onda λ la intensidad promediada en el tiempo I_0 en un interferómetro de tipo Michelson es :

$$I_0 = |E_M|^2 + |E_R|^2 + |E_M| |E_R| \cos(2k\Delta d) \quad (2.2)$$

Donde $|E_M|$ y $|E_R|$ son las amplitudes de los campos eléctricos de la rama de muestra y de referencia, el símbolo $||$ representa el modulo, k es la frecuencia espacial que depende del medio en que se encuentre a través del índice de refracción y de la longitud de onda : $k = \frac{2\pi}{\lambda}n$. Reemplazando se puede observar que la fase del coseno depende de la DCO.

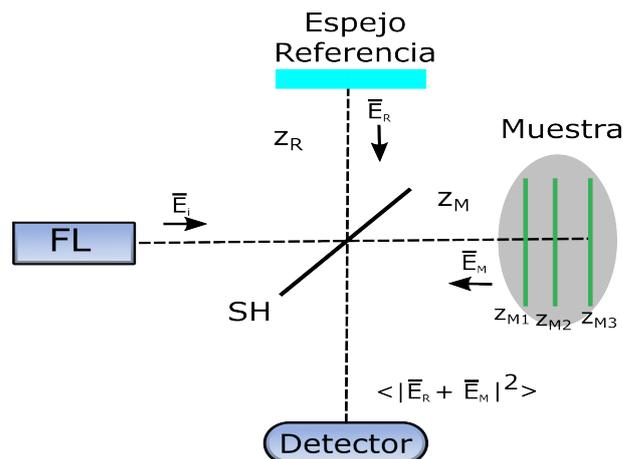


Figure 2.1: Esquema de un interferómetro de tipo Michelson, destacando los campos eléctricos incidentes y reflejados en el espejo y en la muestra

En la Figura 2.2.a) se puede observar un esquema de la intensidad obtenida para alta coherencia de la Ecuación 2.2. Este patrón de intensidad se conforma al superponer estos haces coherentes de manera constructiva y/o destructivamente al ir modificando la DCO al desplazar la distancia de una de las ramas. La distancia entre dos máximos consecutivos es de $\frac{\lambda}{2}$, aquí radica el gran nivel de precisión de esta técnica, permitiendo controlar el movimiento del espejo en escalas nanométricas.

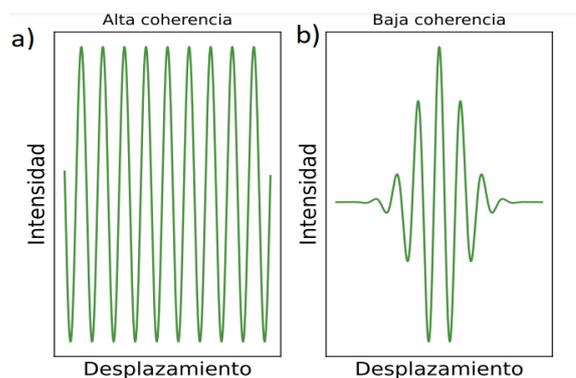


Figure 2.2: Esquema de las intensidades normalizadas detectadas al desplazar una de las ramas del interferómetro: a) Para una única longitud de onda (izquierda), b) para 5 longitudes de onda superpuestas.

Si bien la interferometría de alta coherencia puede registrar variaciones nanométricas con gran precisión, tiene problemas al detectar saltos discontinuos que sean mayores que la longitud de onda con la que se ilumina, ya que la técnica no puede difer-

enciar cuantos máximos pasaron de un punto a otro $\cos(2k\Delta d) = \cos(2k\Delta d + 2\pi j)$ con $j = 0, 1, 2, 3, \dots$. Esta problemática se denomina salto de fase y existen estrategias para solucionar parcialmente esto con algoritmos de reconstrucción de estos saltos de fase [72].

La forma para solucionar esta problemática de manera definitiva es mediante la Interferometría de baja coherencia (LCI) [4]. Esta técnica usa el mismo principio que la interferometría de una única longitud de onda o coherente pero utiliza fuentes de luz de baja coherencia, es decir de cierto ancho espectral (o de varias longitudes de onda), esto genera que la interferencia solo sea apreciable dentro de la L_c , ver Figura 2.2.b). Todas las señales interferométricas correspondiente a cada longitud de onda presente en la fuente de luz van a superponerse. Notar que como las frecuencias de oscilación son levemente distintas, cuando compartan su fase inicial se superpondrán de manera constructiva mientras que a medida q se alejen de ese valor inicial coincidente su promediado tendera a ser nula, de manera destructiva, Figura 2.3. Por lo tanto solo se va a poder observar su interferencia dentro del rango permitido (L_c) acotando así su resolución espacial a unos micrómetros en general. En la Figura 2.2 se puede observar una comparación entre la intensidad observada en un interferómetro de tipo Michelson para alta y baja coherencia.

Debido a ser una técnica óptica no invasiva, con alta resolución y capaz de medir rangos de varios milímetros tuvo grandes aplicaciones en Oftalmología y con el pasar de los años en otras disciplinas de la Medicina. Esta técnica se puede extender para realizar barridos de áreas (B-Scan) o incluso volúmenes y generar imágenes de topografías en 2D o tomografías de 3D de órganos, tejidos o materiales. Por este motivo esta extensión es conocida como Tomografía Óptica

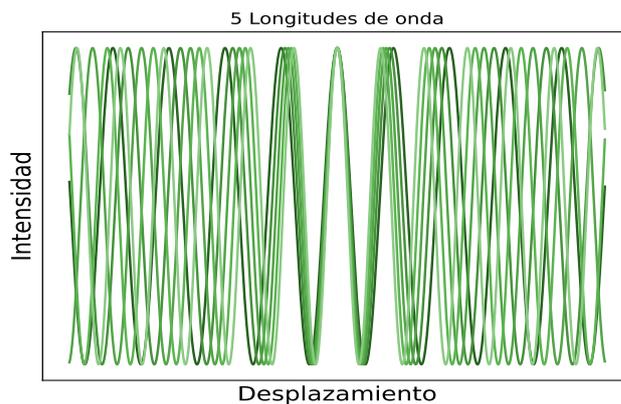


Figure 2.3: Esquema de la intensidad detectada al desplazar una de las ramas del interferómetro para 5 longitudes de onda superpuestas.

Coherente (OCT por sus siglas en ingles) [5].

Las técnicas de LCI se clasifican en dos grandes grupos según como sea el proceso de medición y particularmente en cómo se realice la adquisición de la señal: en el dominio temporal (2.1.2) o en el dominio de las frecuencias (2.1.3).

2.1.1 Modelado matemático de LCI

Para modelar matemáticamente un sistema de LCI como el de la Figura 2.1 usando una fuente de luz de baja coherencia [3], se considera que luz incidente emitida por una fuente de luz es una onda eléctrica E_i plana y policromática, que puede pensarse como una superposición de ondas monocromáticas. Para cada longitud de onda λ es útil escribir el campo eléctrico en forma compleja como:

$$E_i = s(k, \omega)e^{i(kz - \omega t)} \quad (2.3)$$

donde $s(k, \omega)$ es denominado comúnmente como el espectro de la fuente y da

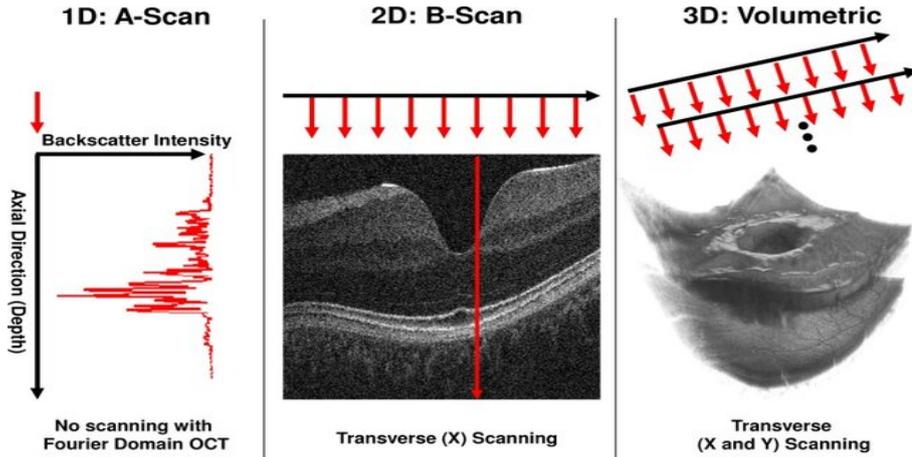


Figure 2.4: Esquema de los escaneos y coordenadas de desplazamiento. Izquierda: Adquisición unidimensional (A-scan). Un único perfil de profundidad midiendo la intensidad retroreflejada en función de la profundidad. Centro: Imagen 2D (B-scan). El haz de iluminación es barrido transversalmente en una dirección mientras se adquieren A-scan. Derecha: Adquisición 3D. Múltiples B-scan desplazándose en la dirección transversal restante, realizando un barrido sobre toda el área de la muestra. Imagen adaptada de [73].

la amplitud del campo eléctrico para cada longitud de onda o frecuencia espacial k y para la frecuencia temporal ω . El separador de haces se supone acromático y con una relación de 50:50. El reflector de referencia, usualmente un espejo, se encuentra a una distancia z_R del divisor de haces y posee una reflectividad del campo eléctrico r_R .

La muestra bajo estudio se caracteriza por la reflectividad r_M de cada una de las interfaces que la componen, que se encuentran a distancia z_{Mn} del divisor de haces. Si bien $r_M(z_M)$ puede ser continuo, para simplificar el estudio se consideran N reflexiones discretas, cada una modelada como una función delta de Dirac centrada en z_{Mn} y con reflectividad r_{Mn} :

$$r_M(z_M) = \sum_{n=1}^N r_{Mn} \delta(z_M - z_{Mn}) \quad (2.4)$$

A su vez se puede definir el coeficiente de potencia reflejada como $R_M = |r_M|^2$. Vale la pena aclarar que la reconstrucción de la función $\sqrt{R_M(z_M)}$ a partir de mediciones interferométricas no invasivas es el objetivo de la interferometría de baja coherencia, Figura 2.4. Dando por supuesto la dependencia temporal en el exponente como wt , el campo eléctrico incidente sobre el divisor al volver de la muestra resulta entonces:

$$E_M = \frac{E_i}{\sqrt{2}} \sum_{n=1}^N r_{Mn} e^{i2(kz_{Mn})} \quad (2.5)$$

Mientras que desde la referencia retorna un campo $E_R = \frac{E_i}{\sqrt{2}} r_R e^{i2(kz_R)}$. Cada campo se ve disminuido a la mitad en potencia al pasar por el divisor de haces, de ahí el factor $\frac{1}{\sqrt{2}}$. La fotocorriente generada en el detector $I_D(k, \omega)$ será proporcional al cuadrado de la suma de los campos incidentes [3]:

$$I_D(k, \omega) = \frac{\rho}{2} \langle |E_R + E_M|^2 \rangle \quad (2.6)$$

$$I_D(k, \omega) = \frac{\rho}{2} \left\langle \left| \frac{s(k, \omega)}{\sqrt{2}} r_R e^{i2(kz_R)} + \frac{s(k, \omega)}{\sqrt{2}} \sum_{n=1}^N r_{Mn} e^{i2(kz_{Mn})} \right|^2 \right\rangle \quad (2.7)$$

Donde ρ es la respuesta sensitiva del detector (responsivity en ingles), el operador $\langle \rangle$ simboliza la integración en el tiempo de respuesta del detector. Al expandir la Ecuación 2.6 se eliminan los términos dependiente de la frecuencia angular ω ya que varían mucho más rápido que la respuesta de detector. Se llega así a una expresión solo con los términos invariantes en el tiempo, a la cual aplicando la

Formula de Euler se obtiene la expresión para el interferograma espectral:

$$\begin{aligned}
 I_D(k) = & \frac{\rho}{4} [S(k)(R_R + R_{M1} + R_{M2} + \dots)] \\
 & + \frac{\rho}{4} \left[S(k) \sum_{n=1}^N \sqrt{R_R R_{Mn}} \cos(2k(z_R - z_{Mn})) \right] \\
 & + \frac{\rho}{4} \left[S(k) \sum_{n \neq m}^N \sqrt{R_{Mm} R_{Mn}} \cos(2k(z_{Mm} - z_{Mn})) \right] \quad (2.8)
 \end{aligned}$$

Donde $S(k, \omega) = \langle |s(k, \omega)|^2 \rangle$ representa la dependencia espectral en potencia de la fuente de luz. A modo de ejemplo, se suele modelar este espectro con una forma Gaussiana ya que se aproxima a la forma de las fuentes de luz reales y tiene propiedades útiles de su transformada de Fourier \mathcal{F} . Considerando a $S(k)$ como una función Gaussiana normalizada y llamando a $\gamma(z)$ como su transformada de Fourier inversa, se puede expresar ambas funciones como:

$$S(k) = \frac{1}{\Delta k \sqrt{\pi}} e^{-(k-k_0)^2 / \Delta k^2} \quad \xleftrightarrow{\mathcal{F}} \quad \gamma(z) = e^{-z^2 \Delta k^2} \quad (2.9)$$

donde k_0 representa la frecuencia espacial central del espectro de la fuente y Δk su ancho de banda espectral, correspondiente a la mitad del espectro en $1/e$ de su máximo. Ambas funciones se ilustran en la Figura 2.5. A la función $\gamma(z)$ se la denomina función de coherencia ya que su ancho completo a mitad de altura (FWHM) está definido por la L_c de la fuente. La relación entre la longitud de coherencia y el ancho de banda de la fuente esta dada por:

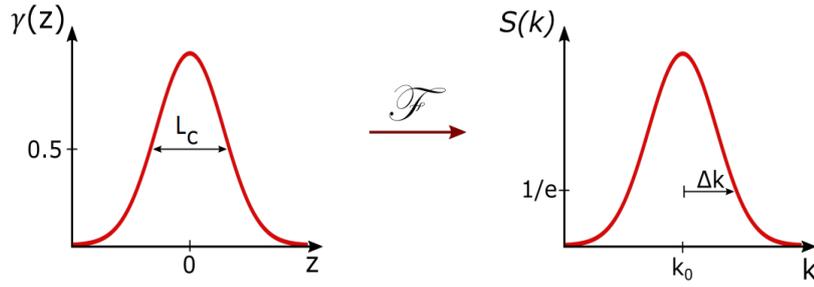


Figure 2.5: Esquema de la relación por transformada de Fourier entre la función de coherencia $\gamma(z)$ de forma gaussiana caracterizada por L_c y el espectro de la fuente $S(k)$ centrado en k_0 caracterizado por su ancho Δk .

$$L_c = \frac{2\sqrt{\ln(2)}}{\Delta k} = \frac{2\ln(2)}{\pi} \frac{\lambda_0^2}{\Delta\lambda} \quad (2.10)$$

donde λ_0 representa la longitud de onda central de la fuente y $\Delta\lambda$ su ancho FWHM, de manera tal que $\Delta k = \frac{\pi}{\ln(2)} \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0^2}$. Es útil notar la relación inversa entre el ancho de banda y la longitud de coherencia de la fuente. La L_C es muy importante ya que va a definir la resolución axial de la técnica $\Delta z = L_C$.

Volviendo al resultado de la Ecuación 2.8, se puede observar que comprende tres términos principales: el primero constante o DC, independiente del camino óptico, el segundo correspondiente a los términos de correlación cruzada, dependientes de la DCO entre la referencia y la muestra y un tercero denominado de “auto-correlación” ya que representa la interferencia que se produce entre las distintas interfaces reflectoras de la muestra.

Para entender el funcionamiento de los sistemas LCI es útil pensar el caso de la topografía: una única interfase de la muestra proveniente de la reflexión del haz en su superficie. Suponiendo una respuesta sensitiva unitaria, que la reflexión en

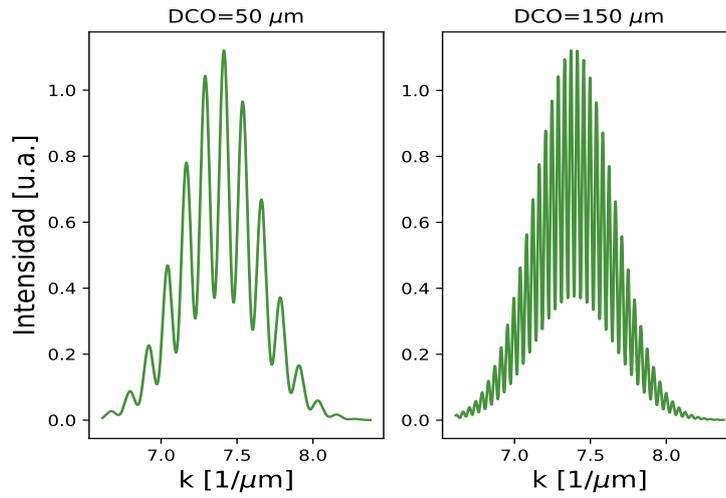


Figure 2.6: Dos interferogramas para DCOs de $50 \mu\text{m}$ y $150 \mu\text{m}$ al utilizar una fuente de luz gaussiana centrada en 850 nm con un ancho de 60 nm .

la muestra y el espejo son iguales y de valor uno la Ecuación 2.8 se reduce a:

$$I_D(k) = \frac{S(k)}{4} (2 + \cos(2k(z_R - z_M))) \quad (2.11)$$

Observar que en el argumento del coseno se encuentra la DCO acumulada con $n = 1$, que en el espacio de los k cumple el rol de la frecuencia de oscilación de la señal. En la Figura 2.6 se pueden observar dos simulaciones de la Ecuación 2.11 para DCOs de $50 \mu\text{m}$ y $150 \mu\text{m}$ al utilizar una fuente de luz gaussiana centrada en 850 nm con un ancho de 60 nm , valores similares a los utilizados en los esquemas experimentales en esta tesis. Se observa como el espectro de la fuente esta modulada por la señal de interferencia. A medida que aumenta la DCO aumenta la frecuencia de oscilación.

2.1.2 Interferometría de baja coherencia en el dominio del tiempo

La primer versión de la técnica LCI fue la denominada Interferometría de baja coherencia en el dominio del tiempo (TD-LCI), su nombre se debe a que la información sobre la profundidad de los objetos se obtiene midiendo la diferencia del retardo de la luz en recorrer la distancia entre el objeto y el sistema óptico de referencia. Conociendo la diferencia de tiempo Δt y la velocidad de propagación de grupo de la luz en el medio v se puede saber cuanta distancia $\Delta d = v\Delta t$ recorrió. Se puede observar un esquema de su funcionamiento en la Figura 2.7. El funcionamiento de este sistema consiste en realizar un barrido de la distancia de referencia z_R , de manera tal que cuando la diferencia entre z_R y z_M se encuentra dentro de una longitud de coherencia de la fuente de luz, es posible observar la señal de interferencia. La adquisición de la señal se realiza mediante un fotodetector, es decir que para cada posición z_R se tiene la integral sobre todo k de la Ecuación 2.8:

$$I_D(z_R) = \frac{\rho}{4} [S_0(R_R + R_{M1} + R_{M2} + \dots)] \\ \frac{\rho}{2} S_0 \sum_{n=1}^N \sqrt{R_R R_{Mn}} e^{-(z_R - z_{Mn})^2 \Delta k^2} \cos(2k_0(z_R - z_{Mn})) \quad (2.12)$$

Donde $S_0 = \int_0^\infty S(k)dk$ es la potencia espectral emitida por la fuente. Esto da como resultado el perfil de reflectividades de la muestra modulado por una señal cosenoidal cuya frecuencia depende de la frecuencia espacial central del espectro k_0 . Cada lóbulo en la señal de interferencia corresponde a una interfase en la muestra

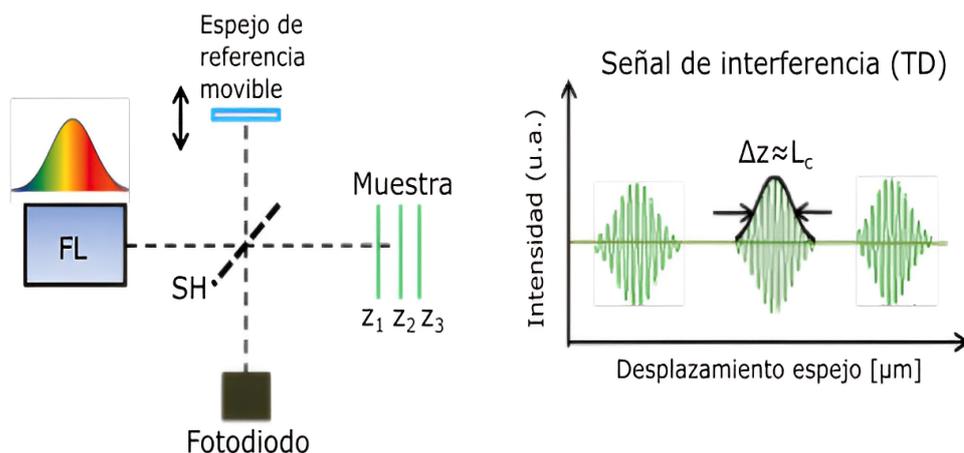


Figure 2.7: Esquema del dispositivo experimental y de una señal de interferencia para la técnica de interferometría de baja coherencia en el dominio del tiempo. Cada lóbulo en la señal de interferencia corresponde a una interfase en la muestra. Imagen adaptada de [74]

Es útil notar que toda la señal oscila alrededor del valor constante DC. Este perfil de intensidades en función del desplazamiento es el “A-scan” (Figura 2.7). La colección de los A-scan para barridos laterales de la muestra es el “B-scan”, el cual permite obtener una imagen en dos dimensiones de la muestra bajo estudio. El rango de medición de estos sistemas será tan extenso como el desplazamiento de la referencia lo permita, por lo tanto las plataformas de desplazamiento lineal que se utilicen juegan un rol fundamental. Se asume que el desplazamiento se realiza a una velocidad constante y conocida para poder obtener la DCI. Por un lado, para distancias largas se requiere un desplazamiento de igual magnitud pero con un paso suficientemente pequeño para muestrear correctamente la señal. Por otro lado, el tiempo de adquisición de un perfil dependerá de cuan rápido pueda realizarse y adquirirse el barrido en el rango deseado. Estas características dificultan la aplicación de TD-LCI en diferentes ámbitos y fueron parte de los motivos por que gran parte de la técnica de LCI utiliza interferometría de baja coherencia en el dominio de las frecuencias.

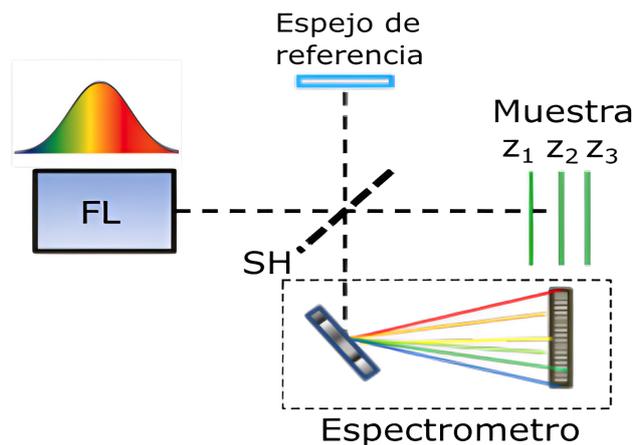


Figure 2.8: Esquema del dispositivo experimental la técnica de interferometría de baja coherencia en el dominio de la frecuencia. Imagen adaptada de [74]

2.1.3 Interferometría de baja coherencia en el dominio de las frecuencias

En la técnica de Interferometría de baja coherencia en el dominio de las frecuencias (FD-LCI) [3, 75] o también conocida como interferometría de baja coherencia en el dominio de Fourier, la fotocorriente es adquirida diferenciando cada frecuencia espacial k y procesada utilizando análisis de Fourier, ver sección 2.1.3, para reconstruir el perfil de reflectividades de la muestra. El dispositivo experimental es similar al de TD-LCI, se utiliza una FL de baja coherencia, un interferómetro pero no hay necesidad de desplazar una de sus ramas y en vez de usar un fotodiodo como detector se utiliza un espectrómetro, ver Figura 2.8.

El espectrómetro permite adquirir por separado las intensidades correspondiente a cada k o en su defecto de cada longitud de onda obteniendo una señal experimental similar a la Ecuación 2.11. Por este motivo también se la conoce como LCI basada en espectrómetros.

En la Ecuación 2.11, se puede observar claramente como cada DCO presente en

el experimento va a determinar una frecuencia de oscilación en la función coseno en el espacio de los k , por lo que la señal total va a ser la superposición de todas estas. Por este motivo realizando un análisis espectral de esta señal se puede obtener la información deseada con relativa sencillez, sin la necesidad de desplazar ninguna rama. Por lo tanto, el perfil de reflectividades se estima a partir de la transformada de Fourier inversa de $I_D(k)$ de la Ecuación 2.11, utilizando las relaciones entre los pares transformados $\frac{1}{2}[\delta(z + z_0) + \delta(z - z_0)] \xleftrightarrow{\mathcal{F}} \cos(kz_0)$ y la propiedad de convolución $x(z)*y(z) \xleftrightarrow{\mathcal{F}} X(k)Y(k)$, obteniendo así una expresión para el A-scan:

$$\begin{aligned}
i_D(z) = & \frac{\rho}{8} [\gamma(z)(R_R + R_{M1} + R_{M2} + \dots)] \\
& + \frac{\rho}{4} \sum_{n=1}^N \sqrt{R_R R_{M_n}} [\gamma(2(z_R - z_{M_n})) + \gamma(-2(z_R - z_{M_n}))] \\
& + \frac{\rho}{8} \sum_{n=1}^N \sum_{m \neq n} \sqrt{R_{M_n} R_{M_m}} [\gamma(2(z_{M_n} - z_{M_m})) + \gamma(-2(z_{M_n} - z_{M_m}))]. \quad (2.13)
\end{aligned}$$

Nuevamente se identifican: el primer término constante DC, el segundo con los términos de correlación cruzada CC y los últimos con la autocorrelación AC. Como la reflectividad de la referencia suele ser mayor que la de la muestra los términos de correlación cruzada tienen generalmente una amplitud más grande. En la Figura 2.9 se muestra un esquema del resultado de la Ecuación 2.13 para una muestra discreta y un espectro de la fuente de luz con forma gaussiana. En él se puede observar el pico constante DC, los picos de correlación cruzada de mayor amplitud y los de autocorrelación de menor intensidad, como así también sus respectivos picos negativos que se obtienen al realizar la transformada de Fourier de la función coseno.

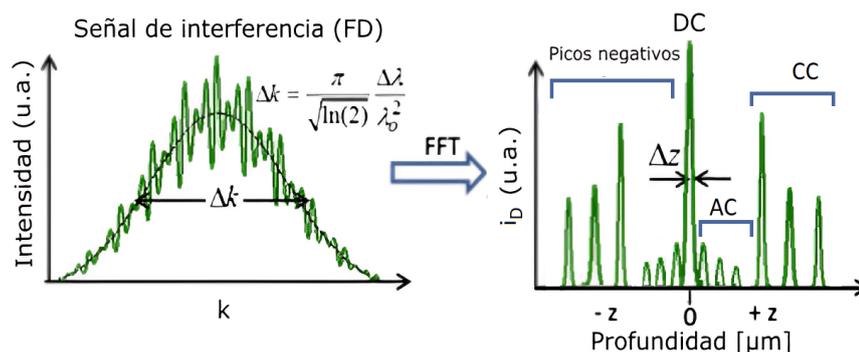


Figure 2.9: Esquema de la señal de interferencia y de su correspondiente transformada de Fourier en la técnica de interferometría de baja coherencia en el dominio de la frecuencia. Imagen adaptada de [74].

La resolución axial Δz de FD-LCI va a estar determinada por la L_C , ya que el ancho del pico de la transformación de Fourier está determinado por la convolución con $\gamma(z)$, Ecuación 2.9. Por lo cual a mayor ancho espectral de la FL mejor será la resolución de la técnica.

La introducción de los sistemas en el dominio de Fourier permitió incrementar notablemente la velocidad de adquisición, principalmente debido a que no se necesita de barridos mecánicos. Además posee una gran ventaja respecto a los sistemas TD-LCI en cuanto a la sensibilidad [58, 76] dada esencialmente porque todas las retroreflexiones de la muestra son medidas simultáneamente, sin necesidad de realizar barridos axiales de la referencia.

Las principales limitaciones de esta técnica provienen del instrumental utilizado para adquirir el interferograma espectral y la digitalización del mismo ya que estos tienen una resolución espectral finita $\delta_r k$ [77] que también puede ser expresada en términos de longitudes de onda como $\delta_r \lambda$. En particular, la resolución espectral del espectrómetro está determinada por la cantidad y el tamaño de cada pixel, esta geometría espacial en conjunto a la separación angular del espectro generada

en la red de difracción determinan la cantidad de espectro mínima que cada pixel puede adquirir [58]. El efecto de la resolución espectral finita puede modelarse [3] convolucionando el interferograma ideal con una función gaussiana con un ancho a mitad de altura de $\delta_r k$, simulando un pixel. El “A-scan” se encuentra multiplicado entonces por un factor de disminución (o conocido también como “fall-off”) cuya forma está dada por la transformada inversa de la forma gaussiana de la resolución, que también es gaussiana:

$$i_D(z') \exp\left(-\frac{z'^2 \delta_r k^2}{4 \ln(2)}\right) \xleftrightarrow{\mathcal{F}} I_D(k) * \exp\left(\frac{-4 \ln(2) k^2}{\delta_r k^2}\right) \quad (2.14)$$

Donde se usó la variable reescalada $z' = 2z$ y $*$ hace referencia a la operación matemática de convolución. El decaimiento de la sensibilidad con la profundidad puede entenderse como el decrecimiento en la visibilidad de las franjas de mayor frecuencia que corresponden a muestras con mayor profundidad. Este decaimiento suele caracterizarse a partir de la profundidad a la cual la sensibilidad decae a la mitad o $6dB$ en unidades de SNR:

$$z'_{6dB} = \frac{2 \ln(2)}{\delta_r k} = \frac{2 \ln(2)}{\pi} \frac{\lambda_0^2}{\delta_r \lambda} \quad (2.15)$$

Otra consideración importante es el muestro del interferograma espectral. Para un intervalo de muestreo $\delta_s k$ en M canales linealmente espaciados en k el rango total de frecuencias espaciales adquiridos es $\Delta k = M \delta_s k$ lo cual resulta en un intervalo en el dominio espacial z como $\delta_s z' = \frac{2\pi}{2\Delta k}$. Siguiendo el criterio de Nyquist, la profundidad máxima estará dada por:

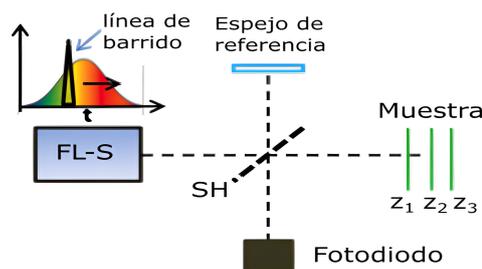


Figure 2.10: Esquema del dispositivo experimental correspondiente a la técnica de interferometría de baja coherencia con fuente sintonizable. Imagen adaptada de [74].

$$z_{max} = \frac{\pi}{2\delta_s k} = \frac{\lambda_0^2}{4\delta_s \lambda} \quad (2.16)$$

Interferometría de baja coherencia con fuente sintonizable

Existe otra variación de la técnica de FD-LCI que el cual el proceso de adquisición es ligeramente distinta debido a los componentes utilizados en el dispositivo experimental. Esta utiliza una fuente de barrido "swept-source" de alta velocidad por lo cual se la denomina Interferometría de baja coherencia de fuente sintonizable (SS-LCI). En este caso las componentes espectrales de $I_D(k)$ son capturadas secuencialmente mediante un fotodiodo mientras se sintonizan las distintas longitudes de onda en la fuente láser [78]. En la Figura 2.10 se puede observar un esquema de su configuración experimental. En esta técnica la $\delta_r k$ está dada por el ancho de línea de la fuente de barrido

Las fuentes de luz sintonizables son dispositivos ópticos que pueden ajustarse para emitir diferentes longitudes de onda de luz. Una de las tecnologías más comunes para lograr esto es mediante el uso de una cavidad Fabry-Perot. Para sintonizar la fuente de luz, se puede cambiar el ancho de la cavidad [79].

Las mejoras en la sensibilidad y la velocidad en sus inicios se vieron limitadas por la tecnología de los láseres disponibles. Sin embargo, ya existen láseres de barrido que han logrado alcanzar velocidades ampliamente mayores, a 370,000 “A-scan” por segundo [80], aproximadamente cien veces más rápido que la técnica tradicional en sus comienzos. Aparejado con el uso de estas nuevas tecnologías estos equipos presentan un costo elevado ya que además se necesitan placas digitalizadores y detectores de alta velocidad, lo cual puede resultar en una desventaja en aplicaciones industriales de la técnica. En este sentido, la técnica FD-LCI presenta la ventaja de utilizar fuentes de menor costo y espectrómetros que son de más fácil acceso en el mercado.

Transformada de Fourier

La transformada de Fourier es una herramienta matemática utilizada para analizar señales en el dominio de la frecuencia. Esta técnica permite descomponer una señal en sus componentes de frecuencia y analizar su contenido espectral. En este sentido, la transformada de Fourier es una herramienta fundamental para el análisis de señales y sistemas en áreas como la ingeniería, la física y las ciencias de la computación.

La transformada de Fourier se define matemáticamente como una integral compleja que relaciona sus dos variables conjugadas u y v que pueden ser por ejemplo; tiempo y frecuencia temporal o posición y frecuencia espacial. La expresión matemática de la transformada de Fourier se muestra a continuación:

$$\mathcal{F}(f(u)) = \int_{-\infty}^{\infty} f(u)e^{-ivu} du \quad (2.17)$$

donde $f(u)$ es la función a la que se desea transformar, $\mathcal{F}(f(u))$ es la transformada de Fourier de la función $f(u)$, i es la unidad imaginaria y v es la frecuencia angular.

Transformada Coseno

La Transformada Coseno \mathcal{F}_c se desprende de la Transformada de Fourier y suele ser utilizada para analizar señales periódicas, como las señales de audio o de imágenes [81]. Se basa en la expansión de una señal periódica en funciones coseno:

$$\mathcal{F}_c(f(u)) = \int_{-\infty}^{\infty} f(u)\cos(vu)du \quad (2.18)$$

teniendo en cuenta que $e^{-ivu} = \cos(uv) + i\text{sen}(uv)$, vale destacar que si $f(u)$ es real la parte real de la transformada de Fourier es la transformada Coseno:

$$\text{Re}[\mathcal{F}] = \mathcal{F}_c \quad (2.19)$$

2.2 Luz viajando a través de cavidades

2.2.1 Haces gaussianos

Para modelar un haz de luz propagándose en el espacio se tomó la descripción de un haz gaussiano complejo Ψ , ver Ecuación 2.20. Dejando de lado la parte temporal, el campo eléctrico asociado se propaga en la dirección z con una cintura $w(z)$ que representa el radio del haz, donde w_0 es el valor de la cintura cuando se encuentra enfocado ($z = 0$), y con radio de curvatura $C(z)$ [82].

$$\Psi(r, z) = \frac{w_0}{w(z)} e^{-\frac{r^2}{w(z)^2}} e^{-i(kz - \arctan(\frac{\lambda z}{\pi w_0^2}) + \frac{kr^2}{2C(z)})} \quad (2.20)$$

con

$$w(z) = \sqrt{w_0^2 \left(1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi w_0^2}\right)^2\right)} \quad (2.21)$$

y

$$C(z) = z \left(1 + \left(\frac{\pi w_0^2}{\lambda z}\right)^2\right) \quad (2.22)$$

Esta descripción matemática del haz modela el perfil de la amplitud y el de la fase de la onda. La fase está conformada por el término kz característico de una onda plana con frecuencia espacial $k = 2\pi/\lambda$, el término del arco tangente, también denominado fase de Gouy (ϕ_G) y el término de $kr^2/2C(z)$, el cual depende

de las direcciones perpendiculares, x e y , a la dirección de propagación del haz con $r^2 = x^2 + y^2$. Este último factor tiende a desarrollar un frente de onda plano para z tendiendo a cero como también cuando tiende a infinito, para z intermedios se asemeja una onda esférica, pero con curvatura del frente de onda variable. Este último término de fase tiene gran relevancia para la formación del patrón de anillos, si el frente de onda fuese siempre plano nunca se los podría observar.

2.2.2 Cavity Fabry Perot

Una cavidad Fabry Perot (FP) consta de dos interfases enfrentadas que generan varias reflexiones superpuestas donde sus amplitudes van a depender de los coeficientes de transmisión y reflexión de las interfases. Si los coeficientes de reflexión $R_{1,2}$ son elevados, se suele denominarlo Etalón [83]. Una manera sencilla de conseguir este tipo de cavidad es colocando dos espejos paralelos separados cierta distancia d , también llamada ancho de la cavidad. La peculiaridad de este sistema es que las múltiples reflexiones internas, dependiendo de las características de la cavidad, interfieren de manera constructiva y/o destructiva generando cierto comportamiento selectivo o resonante en el espectro de salida.

Las cavidades FP generaron un impacto muy grande en diversas áreas de la Ciencia e Ingeniería como Astronomía, Fotónica, Metrología, Telecomunicaciones, Electrodinámica Cuántica, Espectroscopia, etc [84]. Su simpleza de funcionamiento y su gran potencialidad de resonancia, han llevado a diversas y efectivas aplicaciones tecnológicas como: desarrollos de nuevos tipos de láseres [85], elementos seleccionadores de frecuencias [86], Sensores en imágenes biomédicas [87],

detectores de ultrasonido [88], intensificadores de Campos electromagnéticos ultra localizados [89] e incluso ser parte de detectores de ondas gravitacionales [90], entre otras.

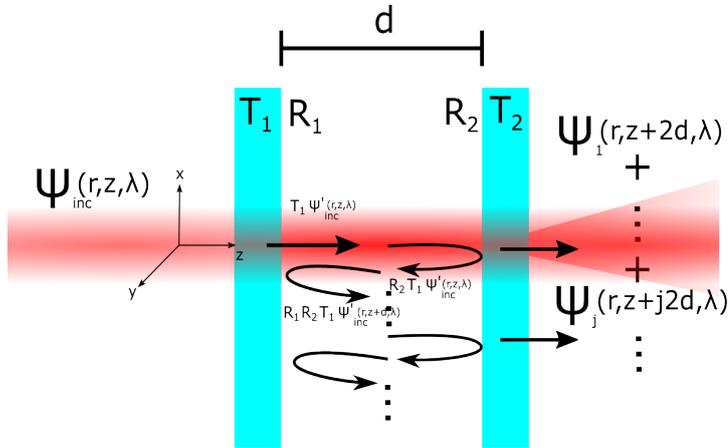


Figure 2.11: Esquema de una cavidad Fabry Perot de ancho d siendo iluminada por un haz Gaussiano, se detallan las múltiples reflexiones y sus distancias recorridas.

En la Figura 2.11 se muestra un esquema de una cavidad FP a la cual se la ilumina con una onda electromagnética Ψ_{inc} y en la cual se puede observar que las múltiples reflexiones Ψ_j a la salida acumulan una distancia extra de $j2d$ con $j = 0, 1, 2, 3, \dots$

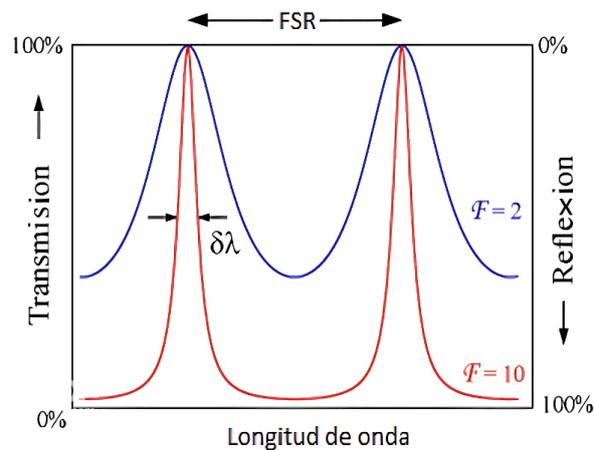


Figure 2.12: Esquema de la reflexión/transmisión total de una cavidad Fabry Perot para dos fineszas (F) en función de la longitud de onda. Se detallan los conceptos de rango espectral libre (FSR) y resolución espectral ($\delta\lambda$).

Dos características importantes en las cavidades son la fineza F y el rango espectral libre FSR (por sus siglas en ingles). La fineza es el ancho característico de la resonancia, cuantas más reflexiones existan dentro de la cavidad mayor será la fineza y más concentrada se encontrará la energía. Por el otro lado, el FSR es la cantidad de longitudes de onda que pueden existir sin superponerse entre dos órdenes consecutivos de resonancia, permite saber cuántas longitudes de onda puede resolver el sistema. Por último, estas dos magnitudes están íntimamente relacionadas con el ancho del pico de resonancia el cual se lo denomina resolución espectral ($\delta\lambda$) de la cavidad FP. En la Figura 2.12 se puede observar un esquema de estos conceptos.

2.3 Redes Neuronales Artificiales

Las redes neuronales artificiales (RN) son un tipo de modelo computacional inspirado en el funcionamiento del cerebro humano, Figura 2.13. Estas redes están compuestas por unidades de procesamiento llamadas neuronas artificiales, que están interconectadas y trabajan en conjunto para resolver problemas complejos de manera eficiente.

Una neurona artificial consta de tres componentes principales: entradas, pesos y función de activación [91].

- Entradas: Una neurona artificial recibe múltiples entradas numéricas. Cada entrada representa una característica o atributo del problema que se está abordando.

- Pesos: Cada entrada está asociada con un peso que representa la importancia relativa de esa entrada para la neurona. Indican si la entrada tiene un efecto excitatorio o inhibitorio en la neurona.
- Función de activación: luego de calcular la suma ponderada de las entradas y de agregar un termino constante (bias o sesgo), se aplica una función de activación para determinar la salida de la neurona. La función de activación puede ser lineal, sigmoide, ReLU (Rectified Linear Unit), entre otras, y ayuda a introducir la no linealidad en la neurona, permitiendo que la red pueda aprender relaciones y patrones más complejos.

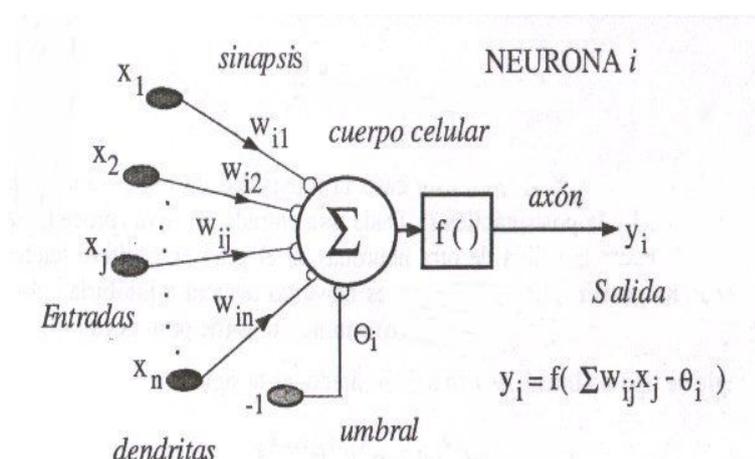


Figure 2.13: Esquema de una neurona artificial, mostrando la analogía con una neurona biológica y detallando las entradas x_i , pesos w_{ij} , el sesgo θ_i , la función de activación f y la salida y_i .

En una red neuronal artificial, las neuronas están organizadas en capas, que generalmente se dividen en una capa de entrada, una o varias capas ocultas y una capa de salida. Si las neuronas de una capa están conectada con todas neuronas de la capa anterior y de la capa siguiente, se suele denominar que es una capa densamente conectada o fully connected network (FCN), Figura 2.14. Esta es una de las configuraciones más frecuentes y altamente utilizadas.

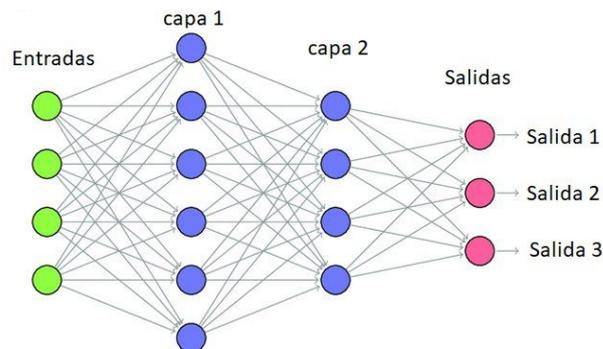


Figure 2.14: Esquema de una red neuronal densamente conectada, identificando la capa de entrada, capas ocultas y capa de salida.

Cada conexión entre neuronas tiene asociado un peso, que determina la influencia que una neurona tiene sobre otra. Durante el proceso de entrenamiento de una red neuronal, estos pesos se ajustan de forma iterativa para minimizar el error entre las salidas producidas por la red y las salidas deseadas, definiendo para eso una función de costo a optimizar. Los algoritmos de retropropagación (back-propagation) trabajan en conjunto con los algoritmos de optimización para ajustar los pesos de la red y minimizar el error de la función de costo. Los algoritmos de retropropagación calculan los gradientes de los pesos, propagando el error desde la capa de salida hacia las capas ocultas. Estos gradientes indican la dirección en la que deben ajustarse los pesos para mejorar el rendimiento de la red. Por otro lado, los algoritmos de optimización determinan cómo se actualizan los pesos de acuerdo con los gradientes calculados, Figura 2.15. Algunos ejemplos populares de estos algoritmos son el descenso de gradiente estocástico con Momento (SGDM), Adam, RMSprop y Adadelta [92]. Estos algoritmos de optimización buscan encontrar un equilibrio entre la velocidad de convergencia y evitar quedar atrapados en mínimos locales. Cada algoritmo tiene sus propias características y parámetros, por lo que la elección adecuada dependerá del problema y de la red neuronal específica.

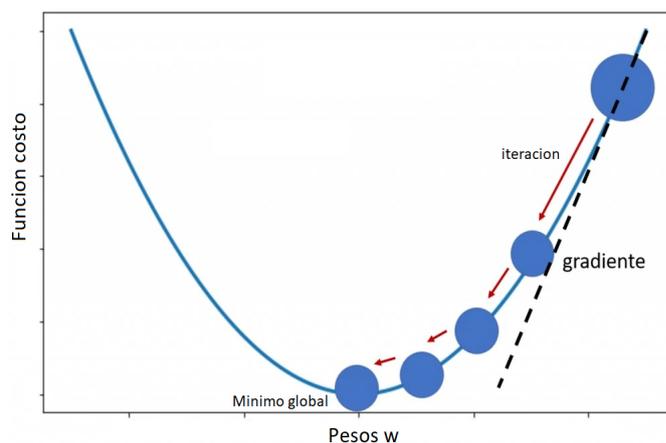


Figure 2.15: Esquema de la función de costo en función de los pesos de la red. En cada iteración los valores de los pesos se acercan al conjunto que optimiza la función.

La capacidad de las redes neuronales para aprender y generalizar a partir de datos de entrenamiento las hace especialmente útiles en tareas como reconocimiento de patrones, clasificación, predicción y procesamiento de lenguaje natural, entre otras.

2.3.1 Redes Convolucionales

Las redes neuronales convolucionales son un tipo de RN diseñado originalmente para procesar datos de imágenes, pero las mismas propiedades que las hacen propicias para problemas de visión también las hacen muy beneficiosas para procesar señales unidimensionales. Esta línea ha nacido recientemente y es denominada redes convolucionales en 1D, trabajos actuales han demostrado que para ciertas aplicaciones se pueden obtener resultados similares que usando convoluciones en 2D [93]. La gran ventaja es que la configuración simple y compacta, debido a sus operaciones unidimensionales, permite implementaciones en tiempo real y con menores requerimientos del hardware. Las capas de convolución en una dimensión obtienen nuevas secuencias a través de filtros que interpretan ciertas car-

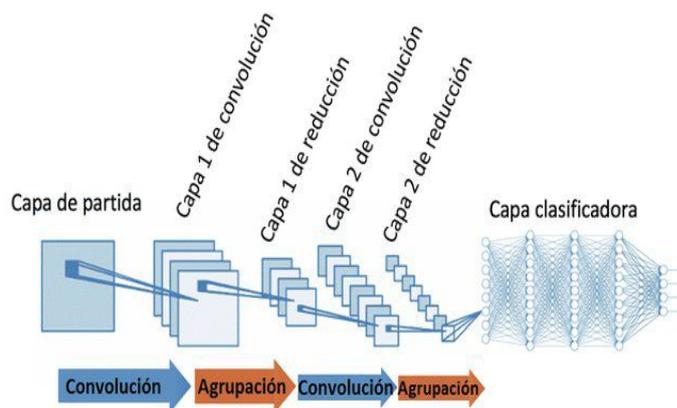


Figure 2.16: Esquema de las capas presentes en una red convolucional.

acterísticas de las secuencias originales que permiten reconocer patrones locales en la misma. Son altamente utilizadas en aplicaciones como clasificación de datos biomédicos y diagnóstico temprano, detección e identificación de anomalías en señales electrónicas, detección de fallas en motores eléctricos, etc.

En este sentido la capa convolucional es, tal vez, la capa más significativa de este tipo de RNs. La diferencia fundamental entre una capa densamente conectada y una capa convolucional es que las capas densas aprenden patrones globales de sus entradas, mientras que las convolucionales aprenden filtros (o llamados también kernels) que modifican la señal original, generando descriptores o mapas de características 2.16. Esta arquitectura le permite a la red concentrarse en características más simples en las primeras capas y agruparlas luego en características más complejas en las capas siguientes. Las capas convolucionales se componen de estructuras, filtros y mapas de características. Durante el entrenamiento, la red neuronal convolucional encuentra los filtros más útiles para su tarea. La salida de la RN convolucional es el mapa de características [94]. Es en este punto en donde la RN determina las características más relevantes, se puede decir que los

parámetros antes seleccionados por el usuario ahora los determina la RN convolucional [95]. Otra capa importante en las redes convolucionales es la de pooling o de agrupación que tiene como objetivo reducir la muestra anteriormente procesada, lo que disminuye la carga computacional, utilización de memoria y número de parámetros, extrayendo subsecuencias de una entrada y devolviendo el valor máximo o promedio.

Otra capa interesante que puede tener una RN convolucional es la de batch-normalization. Esta capa normaliza el valor medio y la varianza de la salida de activación. Hay grandes discusiones en torno a las consecuencias estrictas de esta capa [96] pero es innegable su capacidad de mejora de la velocidad de convergencia y estabilidad frente a la elección de hiperparámetros o a la inicialización de los pesos.

Utilizando una red convolucional es posible generar análisis de señales de mayor complejidad. El aprendizaje en los coeficientes del kernel sumado a las sucesivas capas como de activación por ejemplo de rectificación lineal (ReLU), extracción de promedios o máximos (MaxPooling), las mejoras aportadas por la capa de batchnormalization y las ya conocidas Fully-connected permiten una identificación de patrones más profunda 2.17.

2.3.2 Estimación de frecuencias

La determinación de la posición del pico de la transformada de Fourier de la señal de FD-LCI indica la información deseada que normalmente es la DCO. Esta también puede ser obtenida al medir los periodos de la señal en el espacio k , por

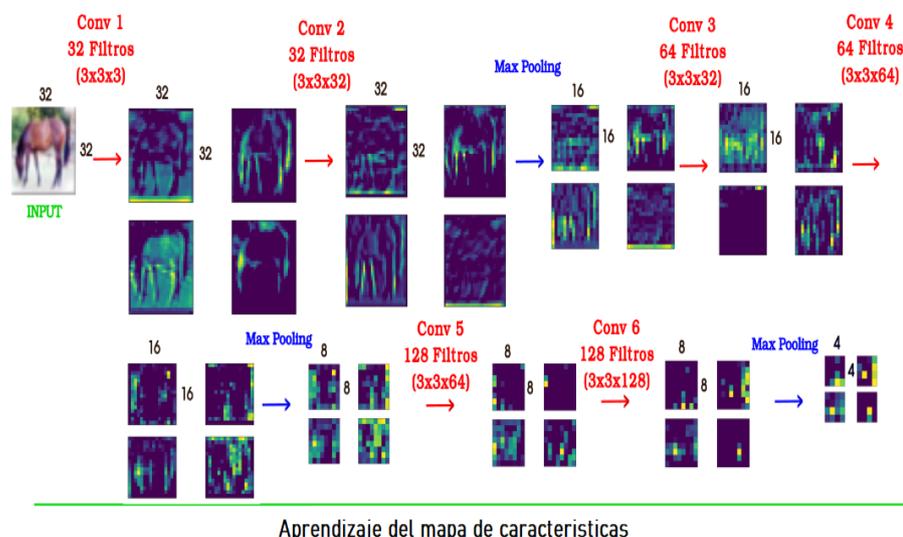


Figure 2.17: Esquema mostrando diferentes mapas de características extraídos de una imagen en una red convolucional de varias capas.

lo cual el problema central que se desea resolver es la estimación de frecuencias.

La estimación de la frecuencia de una onda sinusoidal ruidosa con precisión ha sido uno de los principales problemas en el campo del procesamiento de señales y las comunicaciones. Se pueden encontrar aplicaciones variadas como: sistemas de energía [97], comunicaciones, radar [98], vibraciones mecánicas [99], acústica, ultra sonido, medicina, entre los más destacados. Se han propuesto muchas técnicas teóricas para resolver este problema; los ejemplos incluyen la transformada discreta de Fourier [100], los métodos de mínimos cuadrados [101] y los lazos de fase bloqueada [102]. Todos los métodos propuestos se centran en la velocidad y precisión de la estimación. El uso de redes neuronales ya se ha introducido en el campo del procesamiento de señales [103] y en temáticas asociadas a frecuencias. Por ejemplo, para encontrar la estimación de una máscara de relación ideal para filtrar el ruido de un espectrograma [104], monitoreo de frecuencia en tiempo real [105], detección de canal en sistemas de multiplicación por división de frecuencia

ortogonal [106], entre otros. Pero hasta la actualidad, son pocos y recientes los trabajos que se centraron en estimar directamente la frecuencia de señales mediante redes neuronales. En [107] se encuentra que mediante una red neuronal sencilla densamente conectada se pueden estimar frecuencias de señales sinusoidales con presencia de ruido. Esta técnica se analiza en mayor profundidad en [108] y se hace una comparación con los trabajos existentes tales como [109] en el cual se estima la frecuencia fundamental de una señal y en [110] donde se estiman señales linealmente moduladas en frecuencias mediante redes convolucionales. Finalmente, en [111] se estima la frecuencia de señales sinusoidales en presencia de pérdidas.

”La experiencia histórica permite, pues, inducir esta imagen simplificada de las relaciones entre gobierno, ciencia-tecnología y estructura productiva.” [112].

Jorge Alberto Sabato

3

FD-LCI para la Sociedad

La razón de ser de este capítulo es evidenciar, mostrar y potenciar las posibles vínculos existentes entre la ciencia y la sociedad, entre las tecnologías y las industrias, entre el laboratorio y empresas, entre el doctorado y el rol social.

En primer lugar se cuenta un poco sobre mi experiencia personal, pensando mi accionar social a través del doctorado, en este entrecruce de la ciencia con la sociedad. Se amplía con más argumentos presentes en bibliografía de por qué la ciencia junto con la tecnología deben tener el foco en la sociedad.

Luego se presentan mediciones realizadas durante el trabajo de la tesis con la técnica convencional de FD-LCI en aplicaciones concretas. Las mediciones aquí

mostradas fueron parte de procesos de vinculación con empresas, industrias o instituciones dentro de un marco de servicio, investigación y desarrollo, prueba de factibilidad y/o transferencia en problemáticas presentes en el sector productivo.

A su vez se realiza una breve descripción de cómo se fue dando el vínculo entre el laboratorio y la contraparte. Detallando el rubro de la empresa o institución, la necesidad concreta y las experiencias más significativas de la vinculación. A partir de estas experiencias se buscó identificar aprendizajes y moralejas.

Por último se muestra un resumen de un plan de negocios realizado a lo largo del doctorado donde se toma como base una empresa de base tecnológica que se dedica a la fabricación y comercialización de equipamiento basado en la técnica de interferencia de baja coherencia.

3.1 Caminando de la Ciencia a la Sociedad y viceversa

3.1.1 Mi proceso

Tomar la decisión de arrancar el doctorado me llevó un tiempo. No quería simplemente continuar con la inercia promedio de un licenciado en Ciencias Físicas, quien antes de terminar su carrera de grado ya está inscripto en el Doctorado. Es un hecho real que el funcionamiento del sistema científico-tecnológico de Argentina y la escasez de lugares para insertarse laboralmente en el mercado operan fuertemente para que esto suceda. Si bien es una profesión donde hay muchas personas con vocación por investigar, muchxs terminan eligiendo este camino por supervivencia. Además, tenía temor que por interiorizarme tanto en un tema y

volverme un experto "mundial" sobre una técnica puntual, y por eso perder perspectiva e intuición de la ciencia en general. Esta técnica que utiliza a la luz, se encuentra dentro de la fotónica y habita como un área dentro de la física, la cual pertenece al mundo de las ciencias naturales que con la suma de las ciencias humanas y formales engloban a "toda" la Ciencia.

Por otro lado, considero que realizar el doctorado es un acto noble y altruista. Para quienes creemos, confiamos, validamos y trabajamos en ciencia, el doctorado representa llegar hasta la frontera del conocimiento de la humanidad y expandirlo sumándole un granito de arena. Aunque sea un poco, con el objetivo de darle una base sólida al próximo que desee seguir explorando esa porción de playa. Doctorarse es darle a la sociedad una nueva y pequeña certeza del inmenso y desconocido universo que habitamos.

Indefectiblemente ambas caras del doctorado coexisten, y en cierta manera dado el lugar y el momento en que vivimos, son necesarias. Lo que me di cuenta durante ese comienzo y que hoy en día veo más claramente, es el balance entre esas dos caras. Hay que conquistar el área de expertiz donde uno se desenvuelve. A través de cuentas, simulaciones, armando experimentos, acudiendo a congresos y debatiendo con argumentos sólidos con otros expertos del tema. Pero de vez en cuando frenar esa inercia de movimiento, abstraerse para ganar perspectiva amplia y recordar(se/nos) cual es la razón mayor por el cual uno lo está haciendo:

...Quiero hacer ciencia para las personas que conforman la sociedad al mismo tiempo que quiero que la sociedad me diga qué ciencia necesita....

Ahí encontré mi respuesta, estaba oculta en mi propia pregunta. De aquí se

desprende una de las causas de mi demora en comenzar el doctorado. Pero como quien ha trabajado en ciencia sabe, vale la pena tomarse un tiempo necesario para pensar la hipótesis de partida antes de arrancar con el experimento.

Al fin y al cabo de eso se trata un poco elpensar, medir, vivir, disfrutar, volver a pensar y volver a medir, etc.

3.1.2 Ciencia, Tecnología y Sociedad

Si bien *sociedad* se puede definir de diferentes maneras según el contexto en el que se utilice, se refiere a una grupo de individuos que comparten una interacción social y se relacionan entre sí dentro de un determinado ámbito geográfico o estructural. Estas interacciones pueden estar basadas en aspectos como la cultura, la economía, la política, la educación, la religión, entre otros. Sin lugar a dudas la ciencia opera sobre estos e incluso podría ser agregada como un aspecto más en el que se basan las interacciones [113]. Poniéndolo en otras palabras, se puede pensar a la ciencia como la forma en que el ser humano interpreta a la naturaleza donde vive, y que con cierta rigurosidad y sistematicidad le permite describir, modelar e intervenirla. En esa interacción ser humano/naturaleza es donde surge la sociedad. Por este motivo la ciencia esta inherentemente relacionada con ella.

Hoy en día vivimos en un mundo altamente conectado, donde la globalización es un hecho, donde la instantaneidad es demandada día a día, minuto a minuto, e incluso microsegundo a microsegundo. Donde se ve que el crecimiento exponencial no solo corresponde a la complejidad de los circuitos semiconductores integrados, conocida como Ley de Moore, si no también al crecimiento demográfico y a los

procesos tecnológicos, ley de Kurzweil [114]. Considerando a la tecnología como la aplicación práctica de la ciencia y la ingeniería para transformar ideas y conceptos en realidades tangibles, es innegable que la sociedad y tecnología también se encuentran conectadas.

Vivimos en un mundo donde la desigualdad económica se continua acentuando. El 10% de la población concentra aproximadamente el 80% de las riquezas mundiales [115]. Esta concentración hace que ciertas empresas o incluso algunas personas tengan ingerencia directa en el accionar de los Estados. Lo político ya es inseparable de lo económico y viceversa. Otro dato interesante es que de las 10 empresas más ricas y capitalizadas del mundo, 5 tienen su actividad centrada dentro de lo tecnológico. Lo económico también ya es inseparable de lo tecnológico.

Este fenómeno también se puede observar en cómo se dirige la inversión destinada la ciencia en diferentes países. En la Figura 3.1 se pueden observar los porcentajes dentro de su presupuesto total destinados a investigación básica, investigación aplicada y desarrollo experimental. Los países industrializados (o también denominados de centrales) como Estados Unidos, Japón, Israel y China destinan un porcentaje mayor para el desarrollo experimental [116]. Donde a su vez, tanto las universidades como los laboratorios de investigación de países comenzaron a desarrollar y transferir tecnología a empresas estatales y luego a firmas privadas. En cambio, en la mayoría de los países en desarrollo (o periféricos) se destina un mayor porcentaje de inversión de la ciencia a la investigación básica o aplicada. Con esto se quiere mostrar que el énfasis de los países industrializados esta puesto en la tecnología, y no tanto en la ciencia, ya que esta es la que tiene la capacidad de generar un mayor valor agregado inmediato.

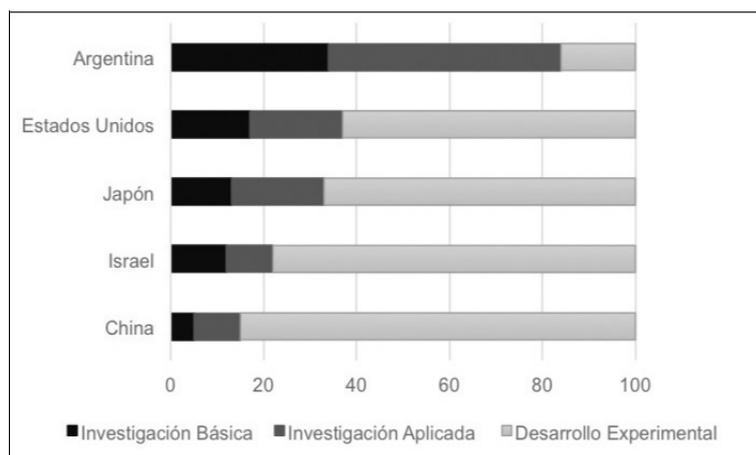


Figure 3.1: Inversión en investigación y desarrollo según tipo de actividad de diferentes países

Entendiendo a la tecnología como la aplicación práctica del conocimiento científico y el uso de herramientas, métodos y técnicas específicas para resolver problemas y satisfacer necesidades humanas. "Las tecnologías, *todas las tecnologías*, desempeñan un papel central en los procesos de cambio social. Demarcan posiciones y conductas de los actores; condicionan estructuras de distribución social, costos de producción, acceso a bienes y servicios; generan problemas sociales y ambientales; facilitan o dificultan su resolución. Las tecnologías son construcciones sociales tanto como las sociedades son construcciones tecnológicas" [117].

Teniendo este espacio, vale siempre la pena explicitar ciertas afirmaciones sobre las tecnologías. No son universales, son locales. No son neutrales, como ya se mencionó, generan diferencias. No son autónomas, funcionan en alianzas socio-técnicas. Y no evolucionan en un sentido positivista, solo cambian.

Retomando el tema anterior, un mecanismo protector posible pueda suavizar la desigualdad mundial es construir una Argentina soberana, desarrollada y sustentable. Como se mencionó previamente, la ciencia y la tecnología tienen cualidades para alcanzar estas metas. Específicamente quien lleva adelante ese ac-

cionar es el sistema científico-tecnológico nacional [118]. El cual esta constituido por universidades, el CONICET (Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas), institutos de investigación, organismos gubernamentales, empresas y sector privado, investigadorxs, científicxs, estudiantes y técnicxs. Donde su objetivo es impulsar el desarrollo económico, social y cultural de la nación mediante la ciencia, tecnología e innovación. Otro dato que no se puede dejar pasar es que Argentina tiene un gran potencial en investigación básica que puede convertirse en desarrollo tecnológica, pero falta decisión, políticas y recursos para que esto suceda. De los aproximadamente 250 trabajos de mayor impacto publicados en Argentina durante el periodo 2004 a 2015, el 37,5% fue citado en 341 patentes internacionales. Esta potencialidad es aprovechada por los países centrales (Estados Unidos, Gran Bretaña, China, etc) acrecentando el llamado *proceso de transferencia tecnológica ciega de Argentina* [119].

Concebir un sistema científico-tecnológico basado en un modelo lineal o secuencial atrasa y confunde al vinculo actual necesario entre tecnología y desarrollo. Ya no sirve pensar que el conocimiento científico se genera únicamente a través de la investigación básica, que luego se aplica en la investigación aplicada para resolver problemas específicos y, que a partir de esta, se desarrollan tecnologías y productos, que luego se producen y difunden en la sociedad.

Desde mi perspectiva, la tecnología y desarrollo tienen que poder vincularse de tal manera de generar aplicaciones prácticas de la ciencia junto con herramientas, métodos y técnicas para un desarrollo inclusivo y sustentable de la sociedad. Concierto un sistema científico-tecnológico-*social* en donde la ciencia, la tecnología, la innovación, el desarrollo, la inclusión y la sustentabilidad estén interrelacionadas

[120]. Donde el modelo de los actores intervinientes coloque en el centro a las personas (o desde un punto de vista económico al “Usuario Final”) y el resto de los actores como las Empresas, Universidades, Organizaciones Publicas, ONGs, cooperativas se encuentren armando redes colaborativas en donde intercambien conocimientos, aprendizajes, capacidades, problemáticas y soluciones.

3.2 Descripción de las aplicaciones realizadas

En esta sección, se presentan diferentes mediciones realizadas durante el trabajo de la tesis con la técnica convencional de FD-LCI en aplicaciones concretas de vinculación con empresas, industrias o instituciones dentro de un marco de servicio, investigación y desarrollo, prueba de factibilidad y/o transferencia en problemáticas presentes en el sector productivo. Con el objetivo de analizar y comprender los procesos de transferencia y vinculación del laboratorio Grupo de Fotónica Aplicada (GFA), ex Laboratorio de Metrología Aplicada (LOMA).

Se eligieron ciertos aspectos comunes para describir los procesos de las aplicaciones realizadas. a) La descripción de la empresa o institución: se realiza para poder mostrar los rubros y/o nichos de mercado y además en que instancia o momento del proceso de diseño o fabricación del producto o servicio en donde esta tecnología pueda ser utilizada. b) La necesidad identificada: es una de las bases indispensables para lograr un proceso exitoso, y que por lo general llevó un par de reuniones poder definirla. Finalmente, c) la descripción del vínculo: donde se comentan las acciones realizadas junto con los avances, observaciones significativas y desenlaces de cada experiencia.

3.2.1 Medición de espesores de placas alveolares de policarbonato

Empresa/institución: Dayplast SA es una distribuidora de plásticos semielaborados de Argentina, tanto a nivel minorista como mayorista para la industria, comunicación visual, construcción y arquitectura.

Necesidad identificada: Medición en línea de producción y/o transporte del espesor total y de las capas internas (Figura 3.3) de placas alveolares de policarbonato. En especial de una capa de protección UV que estimaban de unos micrones.



Figure 3.2: Imagen de diferentes placas alveolares de policarbonato.

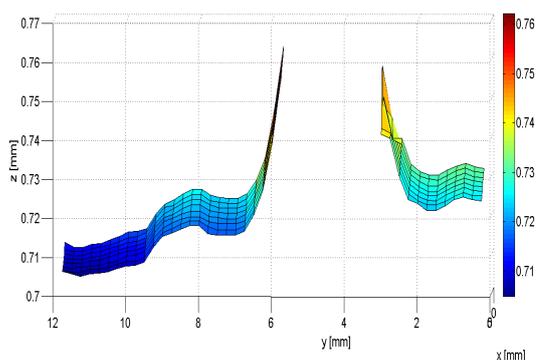


Figure 3.3: Barrido en área de la diferencia de camino óptico del espesor inferior de una placa en presencia de una de las costillas.

Descripción del vínculo: En primera instancia se realizó una prueba de factibilidad para medir los espesores presentes en las placas de policarbonato con el equipamiento presente en el laboratorio. Se pudieron medir los espesores de

las caras superior e inferior. No se pudo medir el espesor total (ya que estaban separados más del rango máximo de medición del equipo utilizado) pero se propusieron formas indirectas de realizarlo. No se pudo identificar la capa UV ya que su índice de refracción era similar al del policarbonato y a su vez su ancho estaba cerca del límite de resolución. Se realizó un informe detallando las mediciones de 10 muestras de placas de policarbonato de diferentes espesores y tonalidades. Se presentó el informe en una reunión en la Empresa.

A pesar de haberles interesado lo presentado en la reunión, no nos volvieron a contactar para continuar con el próximo paso. Como aprendizaje detectamos la importancia de generar un lenguaje común entre laboratorio y empresa, la necesidad de conseguir mediciones de rangos mayores y la importancia de ir a ver la empresa y a las personas en su ambiente laboral. En función de esto, pensamos que hubiese resultado beneficioso la intervención de un vinculador tecnológico. Ya que este hubiese podido darle mayor seguimiento al tema, comprendido mejor la importancia para la empresa, aportando su experiencia en la elaboración de convenios. Incluso dentro de las tareas, hubiese podido buscar otras empresas con necesidades similares y pensar en proyecto de mayor impacto.

3.2.2 Medición de altura de canales en microchips

Empresa/institución: MZP tecnología es una empresa de base tecnológica que se dedica a desarrollar nuevas metodologías y aplicaciones para la hemostasia.

Necesidad identificada: Para el análisis de la viscosidad de la sangre la empresa construye chips con ciertos diseños de microcanales. Estos están compuestos

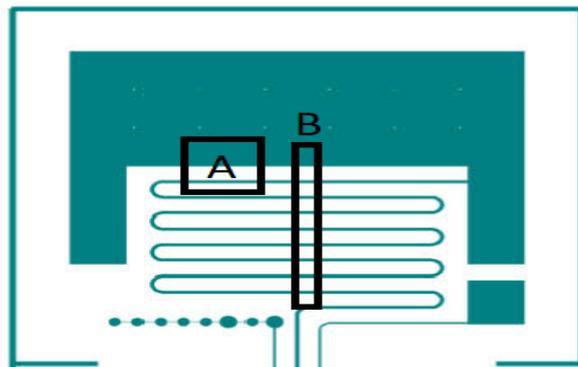


Figure 3.4: Esquema del chips a caracterizar, detallando el área A y el área B de interés.

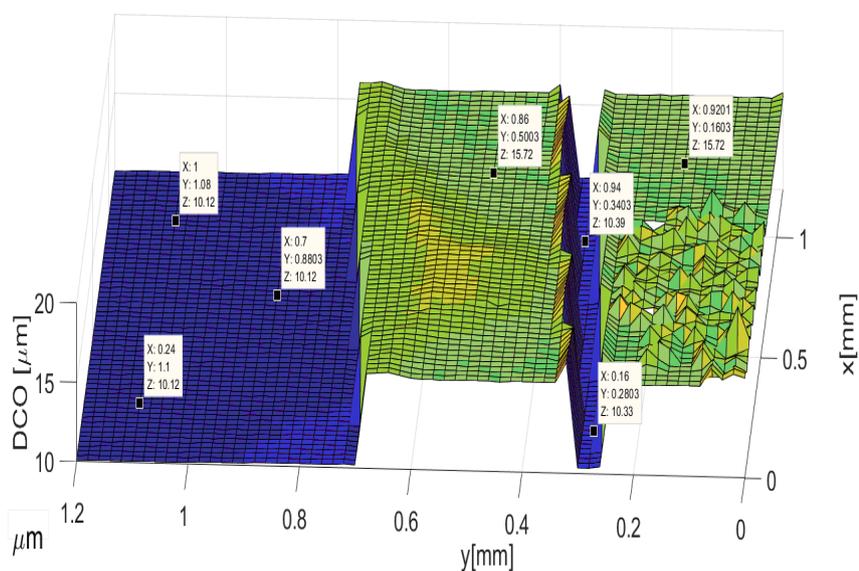


Figure 3.5: Relevamiento del área A mediante la técnica de FD-LCI

por una base de silicio, a la cual se le deposita una resina a través del método de litografía, y una tapa de vidrio (Borosilicato). Esta resina tiene un espesor aproximado de 10 micrones. El diseño comprende un canal de aire al cual queremos medir su espesor.

Descripción del vínculo: La empresa envió muestras a las cuales se le realizaron imágenes en 3D de la topografía de los chips permitiendo identificar no solo el espesor si no también el ancho y largo de los canales. Debido la reflectividad, forma y construcción de las muestras las mediciones fueron realizadas sin

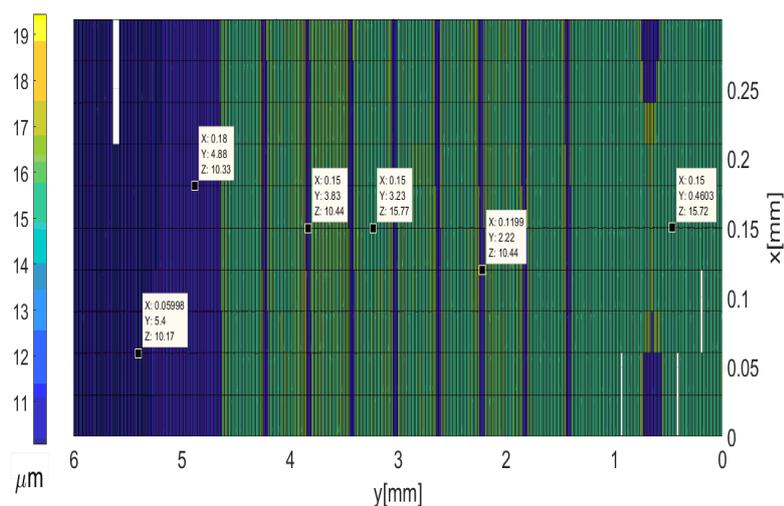


Figure 3.6: Relevamiento del área B mediante la técnica de FD-LCI

demasiadas dificultades, siendo la técnica altamente efectiva para esta necesidad. La empresa quedó satisfecha y con intención de adquirir un equipo de medición para realizar un control de calidad constante en el proceso. La limitación de esta transferencia fue económica, el valor del equipo representaba un costo que la empresa no podía afrontar ya que era una empresa nacional que nació como un Start Up que estaba dando sus primeros pasos en el mercado.

De esta situación, se desprende la importancia y necesidad de realizar un estudio de costos del equipo y a cuanto (y cómo) reducirlo para poder entrar en este tipo de mercados. Y la facilidad de la técnica en medir muestras reflectantes.

3.2.3 Caracterización de rugosidades en muestras metálicas

Empresa/institución: DEMEQL SRL es una empresa que desarrolla, fabrica y comercializa una amplia línea de instrumentos para Ensayos No Destructivos que se usan para medición y control. Si bien este análisis fue realizado para esta empresa, ya teníamos detectado que varias empresas de autopartes y metalmecánica que se

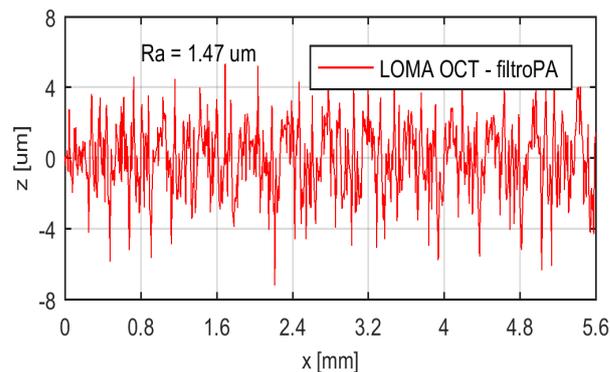


Figure 3.7: Perfil de rugosidad obtenida de una muestra patrón mediante la técnica de FD-LCI.

encuentran ubicadas dentro del polo industrial de Campana estarían interesadas.

Necesidad identificada: Estudio de factibilidad en la medición de rugosidad por medición de perfiles de superficies en muestras patrón utilizando la técnica de reflectometría óptica de baja coherencia, el cálculo de parámetros de rugosidad R_a utilizando procesado propio a partir del perfil medido y la comparación con valores obtenidos con instrumentos convencionales (rugosímetro mecánico con palpador).

Descripción del vínculo: Se presentó un informe dentro del marco del convenio entre la empresa DEMEQ S.R.L y el Laboratorio del Grupo de Fotónica Aplicada, de la Facultad Regional Delta de la UTN. Este convenio se estableció con el propósito de realizar un estudio de factibilidad en la aplicación de la técnica de reflectometría óptica de baja coherencia (ROBC) para el estudio de topografía de superficies y estudios de rugosidad sin contacto y en tiempo real, ver Figura [3.7](#).

En este trabajo se decidió realizar mediciones en dos muestras. La primera es una muestra metálica fabricada por la Facultad Regional Pacheco-UTN y medida con un rugosímetro mecánico certificado por INTI. La segunda es una muestra

patrón con distintos tipos de rugosidad, suministrada por la empresa DEMEQ SRL.

Se obtuvieron muy buenos resultados mostrando la potencialidad de la técnica para generar un instrumento que pueda ser fabricado y comercializado por DEMEQ SRL. Por cuestiones de prioridades de la empresa sumado a inestabilidades económicas del país el proyecto no continuó.

Otro dato interesante de la experiencia con otras empresas que estaban interesadas en el análisis de la rugosidad fue que como la norma asociada al control de la rugosidad materiales usa palpadores de contacto el hecho de usar instrumentos que sean sin contacto genera cierta “desconfianza” o “rareza” a pesar de que los resultados obtenidos puedan ser más precisos y eficientes. Se observó cierta barrera a la innovación por parte de las empresas. Nuevamente el rol de un o una vinculator/a tecnológico/a hubiese sido interesante para llevar el seguimiento del caso y mostrar las nuevas normas para los instrumentos ópticos.

3.2.4 Identificación de elementos contaminantes e impurezas internas presentes en parabrisas

Empresa/institución: La empresa Saint Gobain S.A. desarrolla, fabrica y comercializa materiales y soluciones relacionadas con el hábitat de la vida cotidiana de las personas. Se encuentra en Argentina hace más de 80 años a través de varias marcas como Weber, Isover, Sekurit, etc. En especial una de sus marcas, que una de sus plantas industriales se ubica cerca de Campana, es líder mundial en cristales originales para el automóvil.

Necesidad identificada: En los parabrisas de vehículos que fabricaban encontraban ciertos contaminantes e impurezas que dependiendo en la región que se ubicaban podían comprometer la visión del conductor, razón por la cual tenían que descartar el parabrisas por completo. Por lo tanto, su necesidad era identificar el contaminante o impureza y saber en qué parte de la línea de producción se originó para poder corregirlo y optimizar el proceso. Por lo que el análisis de factibilidad tuvo como objetivo medir la topografía de muestras representativas de contaminantes e impurezas presentes en el interior de parabrisas fabricados por la empresa. Como también, determinar la localización de los contaminantes e impurezas dentro del sistema de tres capas que compone el parabrisas (vidrio-polímero-vidrio).

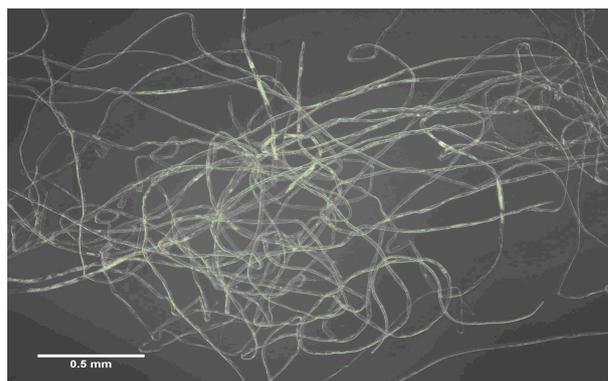


Figure 3.8: Imagen de campo oscuro 5X de la muestra 2. Fibra sintética de diámetro variable entre 5 y 20 μm .

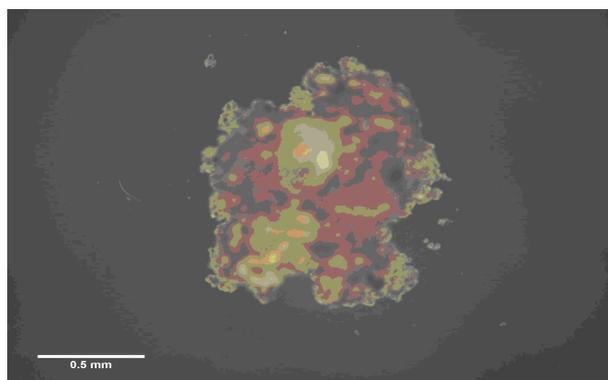


Figure 3.9: Imagen de campo oscuro de 5X de la muestra 11.

Descripción del vínculo: Se recibieron 13 muestras representativas de las

impurezas y contaminantes presentes en los parabrisas. Se firmó un contrato, se presentó un presupuesto del servicio a realizar que fue pagado al presentar el informe final.

Se tomaron fotografías de campo oscuro y de campo claro de las 13 muestras acercadas por la empresa obtenidas mediante un microscopio óptico con diferentes aumentos 5X, 10X, 20X y 50X. Lo que permitió clasificar las muestras en 4 categorías: fibras sintéticas, arena/piedras, astilla y pelo.

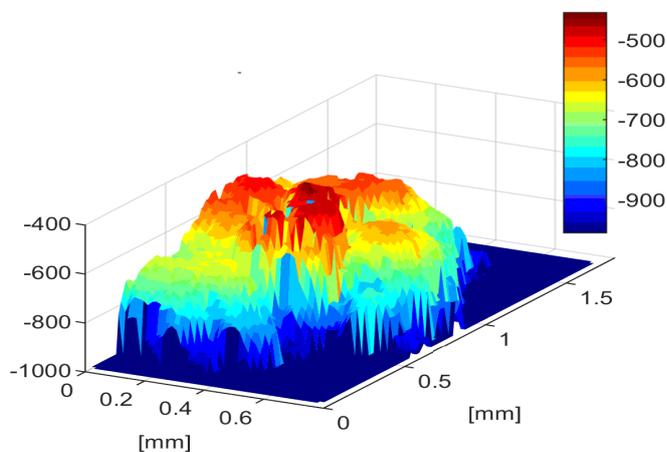


Figure 3.10: Imagen 3D mediante la técnica de FD-LCI, del espesor del polímero en μm , de la muestra 13 tomando pasos de $5 \mu m$. Notar que se observa la topografía de la suciedad

Se realizaron barridos punto a punto de las muestras mediante la técnica de interferencia de baja coherencia con pasos de unos micrómetros para extraer la información del ancho, del relieve y de la textura de las impurezas.

Finalmente presento una tabla indicando en que capa del parabrisas se presentaba la impureza o contaminante, aclarando su ancho y espesor. Se agregaron como complemento, los espesores de cada capa ya que es información que la técnica permite medir muy fácilmente y se consideró que a la empresa le podía interesar.

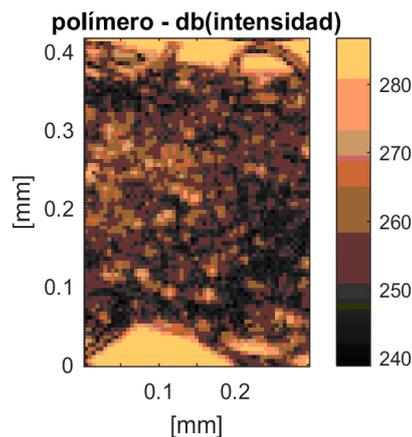


Figure 3.11: Imagen 2D mediante la técnica de FD-LCI haciendo incapie en la intensidad de la reflexión de la muestra 13. Notar que se puede apreciar detalles de la textura. Pasos de $5 \mu\text{m}$.

Fue una de las pocas experiencias en donde se pudo completar el ciclo. Es decir, se logró identificar la necesidad concreta de la empresa, se firmó un convenio con su correspondiente presupuesto, se realizó el estudio, se presentó el informe y se recibió el pago por el servicio realizado.

3.2.5 Caracterización por métodos ópticos de polvos contaminantes en muestras de parabrisas

Empresa/institución: La empresa Saint Gobain S.A. desarrolla, fabrica y comercializa materiales y soluciones relacionadas con el hábitat de la vida cotidiana de las personas. Se encuentra en Argentina hace más de 80 años a través de varias marcas como Weber, Isover, Sekurit, etc. En especial una de sus marcas, que una de sus plantas industriales se ubica cerca Campana, es líder mundial en cristales originales para el automóvil.

Necesidad identificada: Comparar mediante métodos ópticos 4 grupos de muestras de polvo con contaminantes donde se conoce su origen ((PMG, SC, PP y



Figure 3.12: Imagen 2D de microscopio con 5x de aumento de una de las muestras del grupo PMG.

PGP) con respecto a muestras donde el contaminante no se encuentra identificado (MD).

Descripción del vínculo: Se caracterizaron muestras de parabrisas aportadas por la empresa Saint Gobain, que presentaban impurezas y elementos contaminantes del tipo polvo grafex, mediante técnicas de tomografía y microscopía óptica, Ver Figura 3.12. Se pudo determinar posición, tamaño y patrones de agrupamiento de las impurezas presentes en las muestras contaminadas de manera controlada (PMG, SC, PP y PGP): tamaño de grano entre $15\text{-}30\ \mu\text{m}$, agrupaciones peculiares (en forma de líneas equiespaciadas, en agregados grandes o pequeños), presencia de polvos distintos y posición de la cara en que se encontraba. Así mismo se determinaron características y patrones de las muestras contaminadas sin controlar (MD) como tamaño de grano de menor a $10\ \mu\text{m}$, posición del polvo en ambas caras del polímero, agrupaciones en forma de secado de gotas y densidades menores a las encontradas en las muestras de contaminación controlada.

En este caso, como ya se habían realizado trabajos previos con la empresa, la necesidad llegó al laboratorio de una manera bien concreta y delimitada. Eso ayudó a que se le presenten los resultados muy rápidamente. Mostrando que

completar ciclos exitos ayuda a construir un vinculo de confianza entre la empres y el laboratorio. Debido a una discontinuación de la actividad de la empresa en esta área, se suspendieron el resto de trabajos similares que estaban empezando a suceder.

3.2.6 Espesor recubrimiento de barniz en maquinas agrícolas

Empresa/institución: King Agro es una empresa con planta industrial en Campana, Buenos Aires, dedicada a la producción de botalones de fibra de carbono para pulverización. Pertenece a Deere & Co.

Necesidad identificada: Para el óptimo desempeño de las maquinas agrícolas se construyen utilizando fibras de carbono debido a su resistencia, flexibilidad y bajo peso. Para aumentar la durabilidad de este material debido a la exposición solar y altas temperaturas se la recubre con un barniz/laca para protegerlas. La necesidad de la empresa fue determinar los espesores del barniz en diferentes puntos de la muestra con la finalidad de poder realizar un control de calidad del recubrimiento. A su vez la empresa sugirió que la medición se realice con un cabezal que pueda ser manipulado por un operario.

Descripción del vinculo: Se armó un prototipo de laboratorio de un cabezal óptico conectado a través de una fibra óptica al equipo de FD-LCI y se realizaron pruebas de factibilidad para demostrar que era viable la medición de los espesores. Se midieron los espesores del recubrimiento en puntos al azar a lo ancho de una columna utilizada como muestra, ver figura 3.13. También con el dispositivo presente en el laboratorio, se realizo un barrido de un área pequeña para obtener

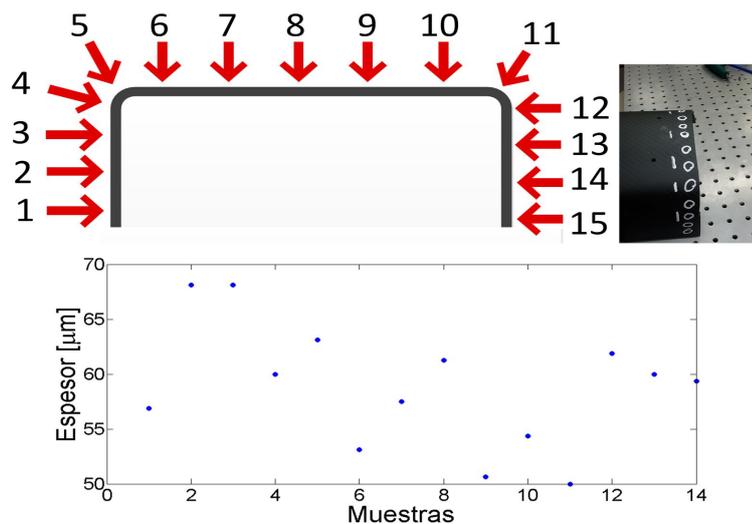


Figure 3.13: Parte representativa de una columna de fibra de carbono junto con un esquema de los puntos de medición (arriba). Espesor del recubrimiento a lo largo de la muestra (abajo).

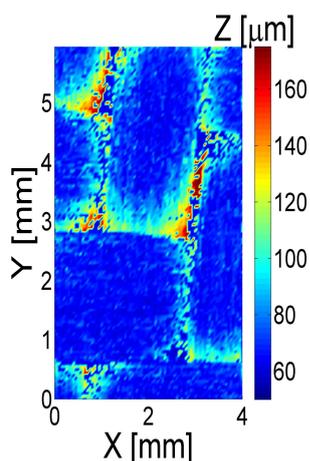


Figure 3.14: Barrido de un área de 4 mm x 6 mm con pasos de 50 μm del espesor de recubrimiento.

mayor información de la composición del recubrimiento y de la superficie de las columnas, se observó la estructura de las fibras de carbono, ver Figura 3.14.

Debido a las características de la técnica para la medición de este tipo de recubrimiento se obtuvieron resultados altamente positivos, la empresa quedó muy interesada en esta tecnología. Ayudó el hecho que al principio participó un graduado de la Universidad que se encontraba trabajando en la empresa. Se tuvieron varias reuniones con personas de distintas áreas de la empresa con el objetivo de

desarrollar un equipo transferible. A tal punto que a partir de un momento participaron presencialmente representantes internacionales de Deere & Co. Se firmaron convenios, se presentaron presupuestos del equipo, plan de trabajo anual para el desarrollo del equipo, etc.

Lamentablemente y a pesar de todo el trabajo realizado no se pudo concretar la transferencia tecnológica. La justificación de la empresa para la no concreción del proyecto eran los altos costos del equipo. Desde nuestra perspectiva esa no fue la causa real. Consideramos que faltó experiencia de negociación y estructura operativa por parte del laboratorio para afrontar una empresa internacional, a pesar de que se contó con el apoyo del sector de Vinculación tecnológica de la Facultad Regional Delta.

3.3 Plan de negocios

Una de las formas que mundialmente se utilizan para que la ciencia llegue finalmente a la sociedad es a través de las empresas de base tecnológicas, también llamadas "Start Ups". Estas estrategias son ampliamente utilizadas en países industrializados en donde existe un sistema científico-tecnológico-social que las acompaña haciendo que logren generar nuevas formas de gran valor agregado en la actividad industrial.

Se realizó el ejercicio de pensar a una empresa de base tecnológica que ofrezca equipamiento de alta tecnología, para la medición de distancias con alta precisión. Esta tecnología, ofrecida a través de un producto basado en la técnica de FDL-LCI, permite realizar tomografías, determinación de espesores de materiales semi-

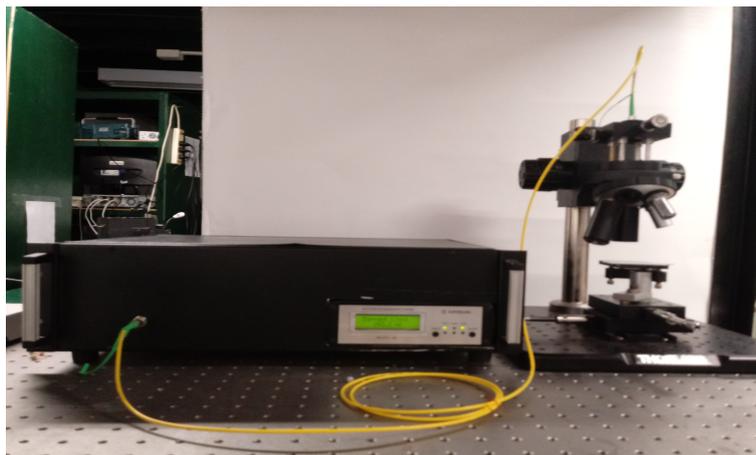


Figure 3.15: Primer prototipo trasladable de un tomógrafo óptico desarrollado en el Doctorado por el Grupo de Fotónica Aplicada, basado en la técnica de FD-LCI

transparentes, análisis de características estructurales, topografías, perfilometrías y procesos resueltos en el tiempo como secado, polimerizado, evaporación, homogeneidad, etc. Su uso puede ser orientado a diversas aplicaciones industriales.

El plan de negocios fue realizado durante el doctorado en actividades durante cursos de emprendedurismo, talleres científico-tecnológico y/o presentación de proyectos donde se propone como producto base un tomógrafo óptico ensamblado, el primer prototipo fue ensamblado en el laboratorio del Grupo de Fotónica Aplicada ver Figura 3.15. De ser necesario se puede facilitar el acceso al plan de negocios completo. A continuación, se muestran algunos puntos a modo resumen.

En la Figura 3.16 se puede observar el análisis Canvas [121] pensado para la empresa de base tecnológica propuesta. Este es una metodología que ayuda a las startups a comprender y visualizar de manera clara los elementos esenciales de su modelo de negocio. A su vez, también se muestra en la Figura 3.17 el análisis de las fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas (FODA) que tendría la empresa.

SOCIOS CLAVE	ACTIVIDADES CLAVE	PROPUESTA DE VALOR	RELACIONES CON CLIENTES	SEGMENTOS DE CLIENTE
LOMA ¹ FRD, UTN CONICET INTI SeCyT Proveedores de insumos.	Investigación y desarrollo. Capacitación de vinculadores tecnológicos (contacto con el cliente). Fabricación de dispositivos.	Equipamiento nacional que permite determinar espesores y defectos superficiales con alta precisión, en la línea de producción, en tiempo real y a valor competitivo.	Trato personalizado. Lenguaje común y planificación conjunta mediante un vinculador tecnológico: comunicación fluida y feedback constante. Confianza basada en relación a mediano plazo e instituciones que nos respaldan.	PyMEs y grandes empresas, que quieran optimizar sus procesos productivos, de la industria del vidrio, plástico, metalmecánica recubrimientos y pinturas.
	RECURSOS CLAVE		CANALES	
	Personal altamente calificado. Laboratorio equipado.		Comunicación y visitas al entorno de producción y a nuestros laboratorios. Ferias, conferencias y congresos	
ESTRUCTURA DE COSTOS			FUENTES DE INGRESOS	
Costos variables: insumos de fabricación. Costos fijos: sueldos, infraestructura y servicios. Gastos de visitas a clientes y participación en congresos/ferias/conferencias. Pago de créditos.			Ventas de productos. Subsidios y aportes no reembolsables para desarrollo tecnológico.	

Figure 3.16: Análisis Canvas explicitando los 9 componentes de la empresa de base tecnológico propuesta.

	FORTALEZAS	DEBILIDADES
Aspecto interno	<ol style="list-style-type: none"> 1. Producto robusto y compacto que se incorpora a la línea productiva y permite una adquisición continua de datos. 2. Fuerte solidez técnica. 3. Producto nacional: rapidez en la distribución y entrega de los productos y cercanía con los clientes (trato directo). 4. Producto accesible para pequeñas empresas. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Empresa sin trayectoria que debe ganar la confianza del cliente. 2. No se cuenta con experiencia de fabricación a gran escala.
	OPORTUNIDADES	AMENAZAS
Aspecto externo	<ol style="list-style-type: none"> 1. Tendencia mundial del cliente de optimizar los procesos productivos y garantizar su control de calidad de sus productos (trazabilidad). 2. Precio competitivo. 3. Apoyo a la industria nacional. 4. Diversidad de aplicaciones y rubros. 5. Barrera alta de ingreso de nueva competencia. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Importante capacidad de desarrollo de nuevos productos y mejores prestaciones de las grandes empresas competidoras del rubro con costos reducidos. 2. Crisis económica local. 3. Reducción de subsidios para CyT. 4. Cultura de baja inversión en I&D de las PyMEs. 5. Bloqueo de importaciones.

Figure 3.17: Análisis FODA de la empresa de base tecnológico propuesta.

Además, se realizaron análisis tanto de la competencia como de los proveedores y planes económicos y de financiamiento.

Por último se quiere evidenciar el análisis de mercado a nivel local (nacional) realizado, por que más allá de ser necesario para el éxito del startups, el hecho que quede el registro de posibles nichos dentro del mercado en donde se puedan encontrar necesidad y/o problemáticas donde la tecnología asociada a la técnica de FD-LCI pueda colaborar para solucionarlas. El análisis de mercado es esencial para realizar una transferencia tecnológica porque proporciona información detallada sobre el mercado potencial y las oportunidades de negocio en un determinado sector o industria. Este análisis puede ayudar a identificar las necesidades y preferencias de los consumidores, las tendencias del mercado, la competencia y los posibles obstáculos que puedan afectar la adopción de la tecnología. Se han analizado posibles demandantes dentro del área industrial de un posible equipo de tomografía óptico.

Se identifican puntualmente las industrias de:

Industria del plástico

- Semiterminados: Placas, láminas y hojas. Preformas. Films protectores y de embalaje. Film para agro.
- Envases y embalajes: Cajas. Envases para cosmética y alimentos. Bolsas.
- Tuberías y sanitarios.

Existen en el país alrededor de 2680 empresas de manufacturas plásticas. Entre ellas se pueden nombrar: Vitopel, Klockner, Pentaplast, celomat, Sigdopack, Ipesa.

Industria del vidrio

- Vidrio hueco: Envases de alimentos, perfumes, medicamentos, botellas.
- Vidrio plano: Vidrios (comunes, templados, de seguridad). Cristales. Tubos de luz, aberturas, artefactos de iluminación, pantallas, porta objetos.

En Argentina hay varias empresas fabricantes de vidrio hueco (botellas y envases) que se han establecido y desarrollado localmente. Entre ellas se destacan Cattorini, Rigolleau, Durax, Cristalerías Rosario, Saint Gobain. Además, existe un amplio universo de pequeñas y medianas cristalerías que abastecen a los productores de bebidas, alimentos de toda clase y a la industria cosmética. Por otro lado, en el país hay importantes fabricantes de vidrios planos, de los cuales 69 se encuentran asociados a la Cámara argentina del vidrio plano, entre las que se destaca VASA. Según información recopilada de la Guía de la Industria en Argentina se encuentran registradas 325 empresas relacionadas con la fabricación de vidrios.

Pinturas y recubrimientos

- Empresas de pinturas. En Argentina existen 430 empresas registradas.
- Empresas asociadas a productos que deben ser pintados/recubiertos/protegidos, como por ejemplo en la industria automotriz.

Industria metalmecánica

Industria metalmecánica en general, centros de maquinado y fresado, fundición,

industria metalmecánica de precisión. En donde hay un gran número de empresas de diferentes rubros que entran como:

- Maquinarias agrícolas (1608)
- Mecánica (621)
- Metalúrgica (140)
- Ferretería industrial (1940)

La cantidad de empresas registradas en este rubro en Argentina asciende a aproximadamente 4300.

3.4 Aprendizajes y conclusiones

Este capítulo es la justificación ideológica de todo el trabajo científico y de investigación realizado. Se hace un pasaje de la decisión de por qué realizar un doctorado, de por qué la Ciencia y la Sociedad deben estar interconectadas, seguido de descripciones de aplicaciones realizadas con la técnica de FD-LCI con empresas e instituciones. Y finalmente se muestran partes del plan de negocios de pensar una posible empresa de base tecnológica asociada a los trabajos realizados durante la tesis.

Se intenta mostrar el poder que tiene la Ciencia y Tecnología en la organización mundial y en el entramado socio-político-económico de un país.

Se entendió el camino a transitar necesario de una técnica científica para que sea adoptada por el mercado. Luego de que la tecnología se convierta en un producto

y/o servicio adaptado para solucionar una problemática previamente identificada debe existir un comprador dispuesto a pagar su valor económico. Esto hizo muy notorio que el/la científicox muchas veces no puede acompañar activamente este proceso hasta el final y que los roles de vinculator tecnológico, inversionista y organismos intervinientes son de vital importancia para una transferencia tecnológica exitosa.

El haber podido vivenciar procesos de servicios, pruebas de factibilidad, desarrollos y transferencias tecnológicas permitió identificar cualidades y características de la técnica de FD-LCI que se deberían mejorar. Estas se convirtieron en la base y el objetivo buscado en esta Tesis. Como por ejemplo, la necesidad de extender el rango máximo de medición, proponer nuevas maneras de post-procesar las señales, diseñar equipos personalizados y compactos y reducir el costo total del equipo. Por otro lado, también se identificaron elementos no necesariamente técnicos pero igual de importantes para generar ecosistemas exitosos para la transferencia de tecnología: a) generar un lenguaje común entre las partes lleva tiempo y es de vital importancia para identificar la necesidad concreta y llevar adelante el proceso. El rol indispensable del vinculator tecnológico. b) La necesidad de repensar los incentivos que llevan a lxs científicoxs a participar en la transferencia tecnológica (considerar en evaluaciones, reconocimiento local, porcentajes económicos, etc). c) Promover y divulgar el trabajo de los laboratorios dentro de la Facultad ya que los procesos que más avanzaron fueron los que tenían involucrado a un estudiante graduado de la institución o alguna persona con cultura científica insertada en la industria. d) Comprender que estos procesos son llevados adelante por personas, y que la confianza entre ellas genera la tierra fértil para el éxito de la transferencia.

”Todo se ve puro si se lo mira desde lejos”

Jorge Drexler

4

Espectrómetro personalizado

En este capítulo se estudia el funcionamiento del espectrómetro como detector de las señales de la técnica de FD-LCI. Se desea comprender y describir la funciones de cada componente del espectrómetro en la conformación de la señal de interferencia a ser detectada. Ya que, conociendo en profundidad su funcionamiento, se podrá diseñar y/o modificar en función de las características de la muestra de interés sin la necesidad de usar diseños comerciales permitiendo personalizar diseños e inclusive extender el rango de medición.

4.1 Funcionamiento del espectrómetro para FD-LCI

Para comenzar se describen brevemente los componentes genéricos presentes en un espectrómetro. A la entrada se encuentra una ranura que actúa como filtro espacial de la luz que se desea analizar. A continuación se encuentra el primer elemento óptico que permite colimar la luz de entrada, seguido por el elemento dispersivo que separa angularmente las distintas longitudes de onda de la luz incidente y luego el segundo elemento óptico que se encarga de enfocar la luz dispersada. Finalmente, se utiliza un arreglo de detectores para medir la intensidad a lo largo de diferentes posiciones espaciales que corresponden a distintas longitudes de onda. Una de las configuraciones más utilizadas en espectrómetros para FD-LCI es la de Czerny-Turner, Figura 4.1.

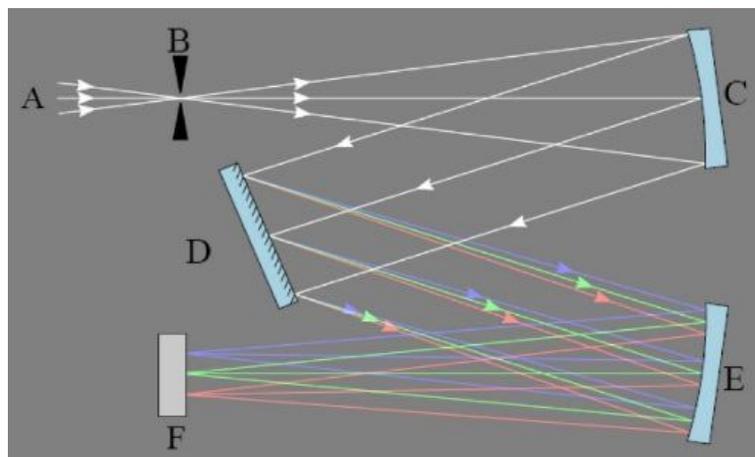


Figure 4.1: Esquema de una configuración de espectrómetro del tipo Czerny-Turner. Donde A hace referencia al haz incidente, B a la ranura, C al primer elemento óptico (espejo concavo en este caso), D al elemento dispersivo, E al segundo elemento óptico y F al dispositivo de detección de luz

El tamaño de la ranura en general varía entre unos 5 a 200 μm . Usar ranuras pequeñas ayuda a evitar señales de fondo que no son de interés y mejora la resolución. A la vez, disminuye la intensidad de luz de entrada, es por esta razón que el tamaño de ranura óptimo está limitado por una relación de compromiso por la

reflectividad de la muestra y el ruido presente en la medición. La función de la ranura puede ser realizada por un pinhole o por el núcleo de una fibra óptica en caso de que se introduzca la luz al espectrómetro de esta manera. Esto sucede a menudo en equipos de FD-LCI ya que emplean interferómetros en fibras ópticas por su robustez y practicidad.

Los elementos ópticos están distribuidos en dos bloques. Por un lado, está la óptica de entrada que tiene como función colimar la luz que pasa por la ranura o salida de fibra. Para eso la apertura numérica de la lente tiene que ser igual o mayor a la apertura de la fibra óptica (considerando que se emplea fibra para introducir la luz al espectrómetro). Lentes con mayor distancia focal f_{in} generan cinturas de haces D mas grandes, aumentando la cantidad de líneas iluminadas en la red de difracción. Por otro lado, está la óptica que se encuentra a continuación del elemento dispersivo la cual va a enfocar la luz en su distancia focal f_{out} , lugar en donde se debe colocar el detector. Esta óptica, también es responsable del valor del diámetro de la cintura del haz sobre el detector (tamaño del foco o spot), parámetro determinante para el Fall-off [37], por lo general se busca que el tamaño del pixel sea levemente mayor que el diámetro de la cintura en su foco. A menor f_{out} y a mayor D menor será el tamaño del haz enfocado en el detector, Ecuación 4.2. Además, la f_{out} junto con el tamaño total del detector (cámara o array) van a influir en el espectro total efectivamente detectado 4.1.2.

El elemento dispersivo es el encargado de separar espacialmente las distintas componentes espectrales. Pueden ser prismas o redes de difracción. Existen redes realizadas por holografía o por tallado. También de transmisión o de reflexión. La separación espectral depende de la dispersión angular de la red y no es lineal con

respecto a la longitud de onda. Como se puede ver en la Ecuación 4.1 depende de la cantidad de líneas por unidad de distancia G y del orden de la red que se emplee m [122]:

$$Gm\lambda = \text{sen}(\alpha) + \text{sen}(\beta) \quad (4.1)$$

En esta ecuación α es el ángulo incidente respecto a la normal y β el ángulo de salida para una longitud de onda λ . Por lo general en espectrómetros para FD-LCI se utilizan redes entre 1200 y 2400 líneas por milímetro siendo más fácil conseguir esta cantidad de líneas empleando redes de difracción por reflexión.

Por último el dispositivo de detección de luz, el cual suele ser una cámara o un arreglo lineal conformado por una cierta cantidad de píxeles. En principio la información necesaria se encuentra en una línea de píxeles. Si se tiene una cámara se dispone de varias líneas lo que da la posibilidad de procesamiento mediante las sumas y/o promedios entre ellas. Es importante considerar el tamaño de píxel y la cantidad de píxeles que tenga la cámara ya que estos determinan características importantes como el mínimo ancho espectral detectable, el ancho espectral total y el Fall-off del espectrómetro. Otro parámetro importante del detector es su tiempo de integración mínimo (o también tiempo denominado tiempo de respuesta) ya que va a determinar la máxima velocidad de muestreo del espectrómetro y por ende el tiempo para realizar un A-scan de FD-LCI. Este va a depender del diseño y tecnología empleada en la fabricación de la cámara. Cámaras CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) suelen responder más rápido pero generar imágenes de menor calidad que cámaras CCD (charge-coupled device). En

un espectrómetro comercial convencional para FD-LCI el tiempo de respuesta se encuentra en el orden de los milisegundos. Por otro lado, en casos de tener señales de baja intensidad y bajo ruido, se puede aumentar el tiempo de integración para mejorar la intensidad detectada. Para FD-LCI se suelen usar detectores lineales de no más de 5000 píxeles y con tamaño de pixel de algunos micrones.

El análisis del rol de cada componente presente en el espectrómetro fue realizado no solo para comprender el funcionamiento en su totalidad permitiendo intervenir en su diseño, si no también para entender qué características de éste afectan directamente el desempeño en la técnica de FD-LCI [36, 123]. En consecuencia, se pueden identificar tres puntos a tener en cuenta:

- **Resolución del espectrómetro:** este va a determinar la máxima DCO medible. Se describe como $\delta_s \lambda$ en la Ecuación 2.16, a los fines prácticos de este capítulo la denominaremos simplemente $\delta \lambda$. La cantidad de líneas iluminadas en la red de difracción en conjunto con el orden m elegido, la f_{out} y el tamaño de pixel son los parámetros del espectrómetro que afectarán al $\delta \lambda$.
- **Relación de tamaño del spot y del pixel:** El tamaño de la cintura del haz al ser enfocado (spot) considerando una única longitud de onda en comparación con el tamaño de un pixel definirán el parámetro $\delta_r \lambda$ presente en la ecuación 2.14. Este parámetro determina un atenuamiento que se produce en la señal interferométrica denominado Fall-off. En [37] se encuentra un desarrollo más detallado, pero de manera simplificada se puede modelar a este atenuamiento como una función de seno cardinal (sinc) en función de

la DCO. Esto deviene de realizar la transformada de Fourier de una función cuadrada (pixel). En este trabajo citado se demuestra que el efecto del Fall-off aumenta si el spot es mayor que el tamaño del pixel. Este parámetro definirá el decaimiento de la visibilidad de la señal de interferencia para DCO crecientes y por ende la amplitud del pico de la transformada de Fourier generando un decrecimiento de la sensibilidad para DCO grandes, Ecuación 2.15. La red de difracción, f_{out} , D y el tamaño de pixel son los elementos del espectrómetro que definirán a $\delta_r\lambda$.

- **Rango espectral del espectrómetro:** Esto va a delimitar el máximo ancho espectral medible, su solapamiento con el ancho espectral de la fuente de iluminación definirán la resolución de la técnica de FD-LCI, Ecuación 2.10. Al ancho espectral medido se lo describe como $\Delta\lambda$. La cantidad y el tamaño de los píxeles, la cantidad de líneas de la red de difracción y f_{out} determinaran el valor de $\Delta\lambda$.

4.1.1 Simulaciones y cuentas

Se consideró el diseño de un espectrómetro prestando atención a los parámetros detallados como muestra la figura 4.2, se buscó optimizar el espacio total ocupado por todas las componentes que conforman el espectrómetro para que sea un diseño compacto.

Se simuló el funcionamiento de los elementos ópticos y dispersivos al ser atravesados por un haz de cierto ancho espectral. Analizando por separado el compartimiento de cada longitud de onda a lo largo de todo el espectrómetro. Se

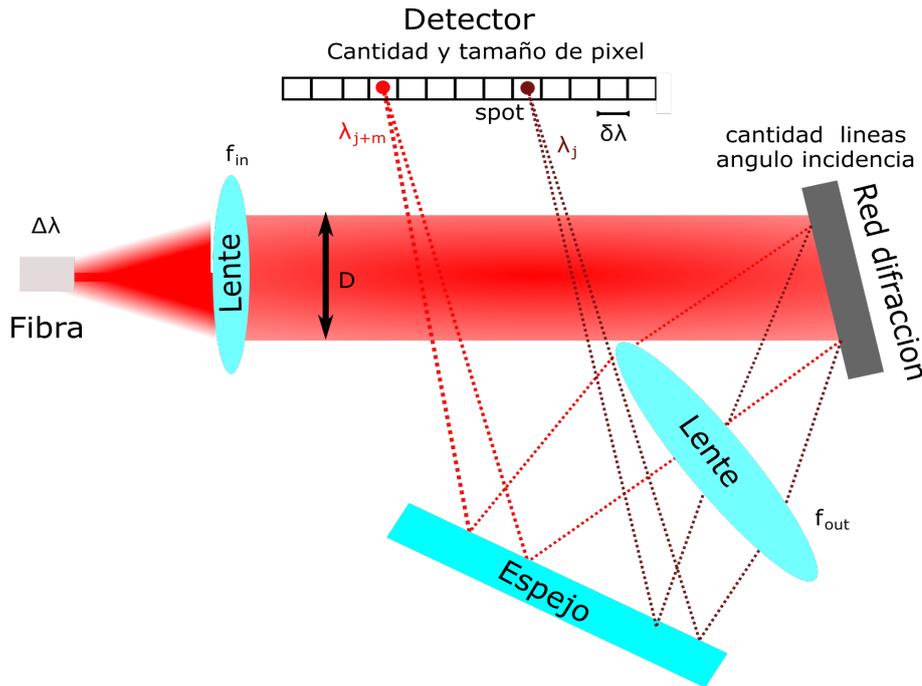


Figure 4.2: Esquema del espectrómetro personalizado, donde se detallan los elementos que lo componen y los parámetros relevantes a tener en cuenta.

contemplaron los siguientes parámetros: el ancho de la cintura colimada del haz D , la longitud de onda central λ_0 y el ancho espectral de la fuente de iluminación, el ángulo de incidencia sobre la red de difracción junto con su cantidad de líneas y el orden deseado, la distancia focal de la lente de salida f_{out} , el tamaño y cantidad de píxeles del detector. Se definió un paso de longitud de onda y se iteró para todas las longitudes de onda comprendidas dentro del ancho espectral, fijando el ángulo de incidencia y la cantidad de líneas se determinó, a través de la Ecuación 4.1, el ángulo de salida. A su vez mediante el trazado de rayos y sabiendo f_{out} se determinó la posición exacta (tanto en el eje axial como en el transversal) de la cintura del haz en el punto focal para cada longitud de onda. Considerando que la cintura del haz gaussiano, al que llamaremos spot, tiene un diámetro en el foco d_0 , dado por:

$$d_0 = \frac{2f_{out}\lambda}{D}; \quad (4.2)$$

Se realizó un calculo de esta magnitud para cada longitud de onda λ y para diferentes distancias focales. Observar que a mayor D menor tamaño del spot.

Las primeras simulaciones fueron destinadas para al elemento central del espectrómetro: la red de difracción [124]. Se calcularon los órdenes existentes y sus ángulos de salida para redes de reflexión de diferentes densidades de lineas, para longitudes de onda de interés y para distintos ángulos de incidencia, ver Figura 4.13. A mayor cantidad de lineas mayor separación angular de las longitudes de onda. A su vez, para ordenes mas grandes mayor la separación. Además pensando en características de diseño, se consideró que el ángulo de salida de todas las longitudes de onda sea funcional al resto de la configuración del espectrómetro.

Para eso se simularon los ángulos de las longitudes de onda de fuentes de luz típicamente utilizadas en la técnica de FD-LCI (770 a 890 nm), Figura 4.13. Como se puede observar en la Ecuación 4.1 esto depende de la cantidad de lineas, de las longitudes de onda, orden difractado y del ángulo incidente. Se trabajó con una red de 1200 l/mm y se buscó el ángulo incidente para el cual solo exista el primer orden, para evitar la perdida de energía en otros ordenes.

A partir de la dispersión generada por una red de difracción presente en la Ecuación 4.1, se obtuvieron los posibles valores (Tabla 4.1) de las distancias $d_{r,l}$ máximas a la cual habría que colocar la lente de salida respecto a la red de difracción, Figura 4.4. La idea de esto es asegurarse que la lente no recorte parte

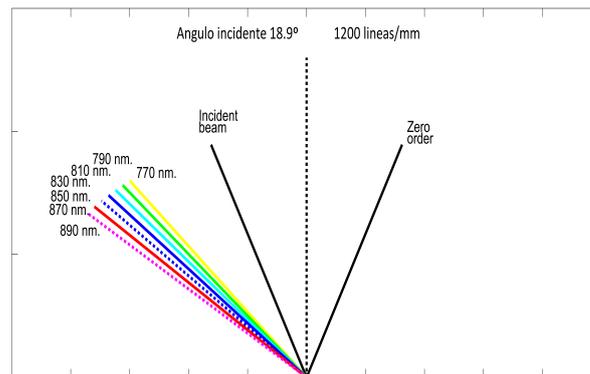


Figure 4.3: Esquema de la dispersión de una red de difracción de 1200 líneas/mm para un ángulo incidente de 18.9 grados y un ancho espectral $\Delta\lambda = 130$ nm .

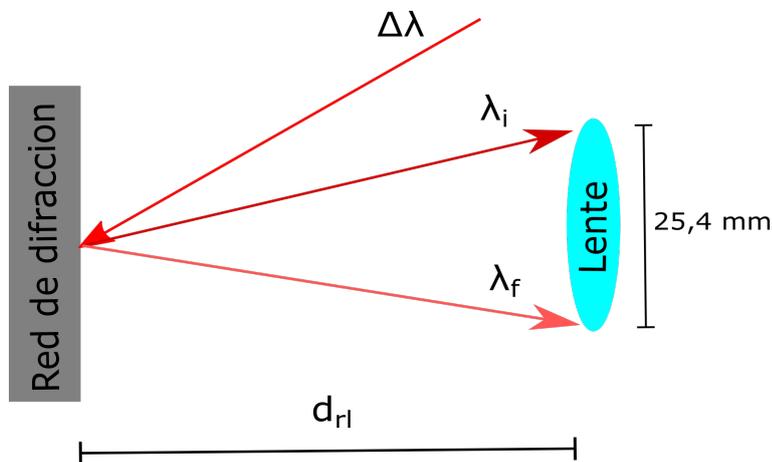


Figure 4.4: Esquema de la distancia a la cual hay que ubicar la lente de salida respecto a la red de difracción d_{rl} contemplando la separación de la longitud de onda inicial y final.

del ancho espectral de iluminación, se consideró la dispersión correspondiente al orden uno y por separado por el orden dos. Este análisis se realizó para una red de 600 l/mm y una lente de una 25.5 mm de diámetro. Notar que para una longitud de onda central de $\lambda_0 = 850$ nm y $\Delta\lambda = 60$ nm la dispersión entre la longitud de onda inicial y final a 70 cm (d_{rl}) de la red de difracción genera una separación en distancia de 25,4 mm. Se observa que se mantiene una relación del doble de separación tanto si se pasa del orden 2 al orden 1 como si se divide a la mitad el ancho espectral incidente. No se observan grandes restricciones en esta distancia

$\Delta\lambda[nm]$	Orden 1 [cm]	Orden 2 [cm]
60	70	35
30	140	70
15	280	140

Table 4.1: Distancias a la cual una red de difracción de 600 líneas/mm separa la longitud de onda inicial y final al ancho de una lente de 25,4 mm.

máxima, es decir que hay que colocar la lente demasiado lejos para que comience a recortar longitudes de onda, por eso mismo se pueden usar redes de mayor cantidad de líneas y colocar a algunos centímetros de distancia la lente de salida. Para el diseño se debe tener en cuenta el diámetro del haz incidente, ya que cada longitud de onda se va a propagar con ese mismo diámetro pero con un ángulo de salida distinta.

Otro parámetro que se analizó de la red de difracción fue su resolución. Para eso se modeló a la red como un sistema de N fuentes puntuales, coherentes, en fase y equiespaciadas entre ellas una distancia a . Se observa la figura de interferencia a una distancia bastante mayor que el tamaño de todas las fuentes [69]. En la Ecuación 4.3 se obtiene la intensidad resultante en función del ángulo de observación θ .

$$I = I_0 \frac{\text{sen}^2(kN a \text{sen}\theta)}{\text{sen}^2(k a \text{sen}\theta)} \quad (4.3)$$

Donde I_0 es la intensidad de cada fuente. La intensidad I tiene picos cada vez que el denominador se anula. Los sucesivos picos hacen referencias a los ordenes de una red de difracción previamente mencionados. En función de esta información se analizó el ancho mitad de altura de los picos (FWHM) el cual determina la

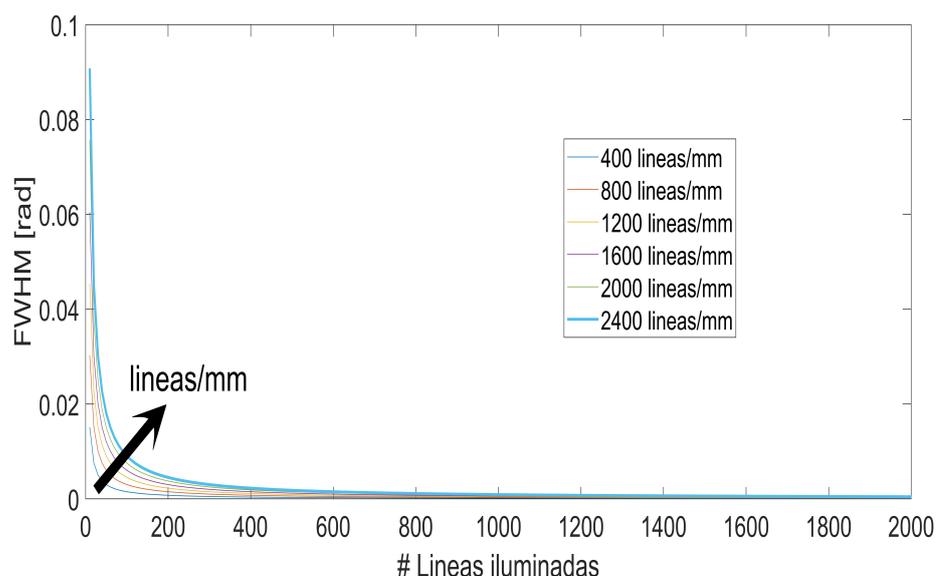


Figure 4.5: Ancho mitad de altura FWHM del pico de la señal de interferencia en función de la cantidad de líneas iluminadas para diferentes redes.

resolución de la red de difracción.

Como se observa en la Figura 4.5, a medida que aumentan la cantidad de líneas iluminadas N el FWHM de estos picos se achica, mejorando de esta manera la resolución de la red. Para tener referencia, usando la relación trigonométrica a 10 cm de la red y para una diferencia entre ángulos de observación de $\Delta\theta = 0,0001$ rad se obtiene $10 \text{ cm} \sin(\Delta\theta) = 10 \mu\text{m}$, es decir que el FWHM ocupa un espacio de $10 \mu\text{m}$ valor comparable a la resolución de la técnica de FD-LCI. Valores menores a $\Delta\theta = 0,0001$ rad se obtienen prácticamente para todas las redes con mas de 2000 líneas iluminadas. En el esquema experimental utilizado los haces están colimados con una cintura de varios milímetros y redes de difracción de miles de líneas por milímetro. Por lo tanto, se iluminan decenas de miles de líneas haciendo que el FWHM tome valores despreciables en comparación con la resolución de la técnica de FD-LCI.

También se realizaron simulaciones para analizar el rol de la lente de salida.

Mediante la Ecuación 4.2, se calculó el tamaño del spot para las diferentes λ dada una $f_{out} = 100 \text{ mm}$ y para un diámetro de haz $D = 12 \text{ mm}$, Figura 4.6.

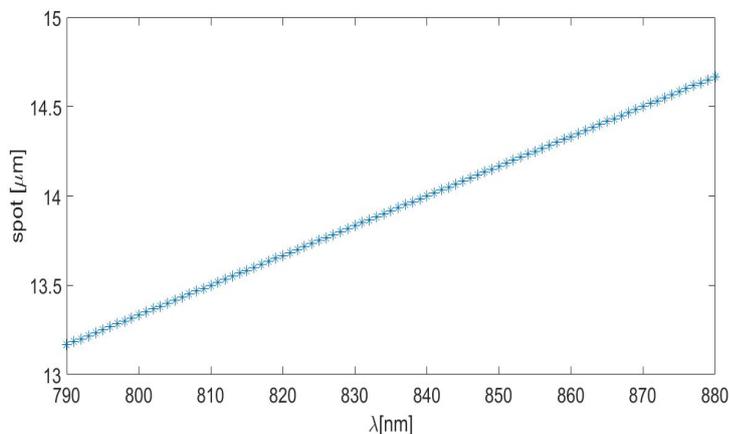


Figure 4.6: Tamaño del spot sobre detector en función de las longitudes de onda para $f_{out} = 100 \text{ mm}$ y para un diámetro de haz $D = 12 \text{ mm}$.

Es importante conocer esta información para el diseño de un espectrómetro ya que la relación entre el tamaño del spot respecto al tamaño del pixel del detector va a determinar el efecto del Fall-off como se comentó anteriormente. A su vez se observa que dentro de este rango de longitudes de onda la variación del spot es cercana al 10% de su valor, efecto que puede afectar a la resolución del espectrómetro. Otra causa que puede generar efectos similares sobre el plano focal son las aberraciones cromáticas, por eso se buscó usar lentes dobles o tripletes. Muchas configuraciones de espectrómetros emplean espejos cóncavos por estos mismos fines.

Por otro lado, la distancia focal de la lente de salida en conjunto con el ángulo con que incide cada longitud de onda sobre la lente van a determinar la posición adecuada para colocar el detector. Como se considera un haz colimado, se puede aproximar una onda plana para cada longitud de onda. Notar que la distancia a la cual se coloca la lente respecto a la red de difracción no influye en el tamaño

del spot en su foco. Por lo tanto, la distancia axial a la cual hay que colocar el detector respecto de la lente de salida es f_{out} . La posición transversal en donde incide una determinada longitud de onda λ en la superficie del detector x_{foco} se puede calcular como:

$$x_{foco} = f_{out} \text{sen}(\beta(\lambda)); \quad (4.4)$$

De esta manera se puede calcular la posición para cada longitud de onda y las dimensiones que ocupa el espectro completo de la fuente de luz pudiendo adaptarlas a los condicionamientos del detector, Figura 4.7.

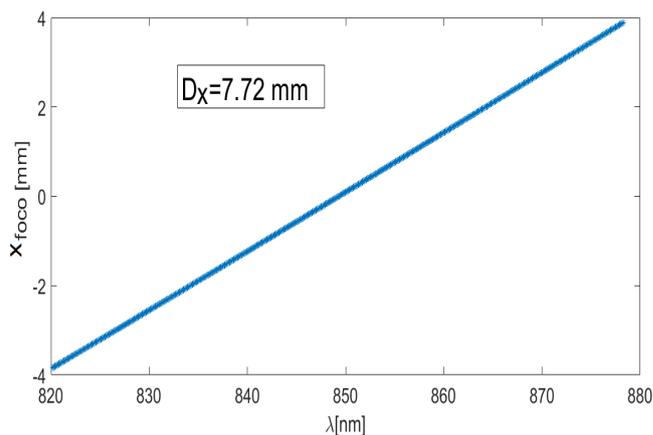


Figure 4.7: Posición transversal x_{foco} del foco de cada longitud de onda para $\Delta\lambda = 60$ nm, para el orden 1 de una red de 1200 l/m y $f_{out} = 100$ mm. Ocupando un espacio total $D_x = 7,72$ mm, para un diámetro de haz $D = 12$ mm

Finalmente, unificando las simulaciones previamente comentadas se pudo construir una representación general del comportamiento de un espectrómetro. Esta simulación sirve para obtener información de su funcionamiento dado un diseño específico. En particular se utilizó para calcular la resolución de cada pixel. Para eso se calculó la posición de foco para cada longitud de onda λ_j tomando un paso de 0.005 nm entre 790 nm a 880 nm, se realizó para un tamaño de pixel de $7 \mu m$

y para 3000 píxeles uno al lado del otro. Se consideró un $D = 22$ mm, una red de 1200 l/mm y una $f_{out} = 150$ mm. De esta manera iterando sobre todas las longitudes de onda se puede obtener la información de "con cuántas λ_j " es iluminado cada pixel, obteniendo así la resolución espectral de cada pixel por separado, Figura 4.8. Se definió un criterio para calcular la resolución de cada pixel, este consta de sumar el valor correspondiente al paso (0.005 nm) al pixel en donde se encuentre el centro de su foco de esa λ_j . Además si parte del FWHM de esa λ_j ilumina el/los píxeles vecinos también se le suma el valor del paso a ese/os píxeles correspondientes. Se observa como existe una leve variación de la resolución para los diferentes píxeles donde el salto es el prácticamente el paso de la longitud de onda utilizado. Esta es una manera mucho mas realista de calcular la resolución del espectrómetro, no como la mayoría de las marcas comerciales que lo calculan como el ancho espectral de entrada dividido la cantidad de píxeles del detector.

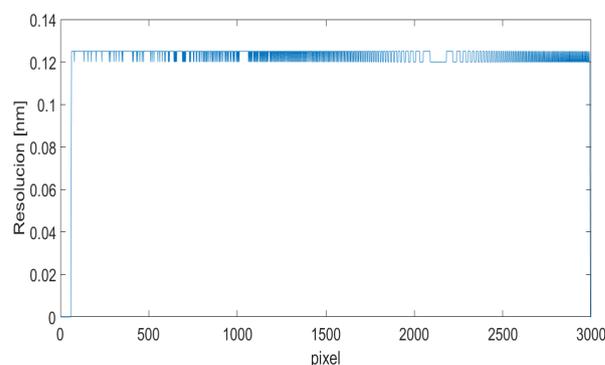


Figure 4.8: Cálculo de la resolución espectral de cada pixel mediante una simulación integral del espectrómetro

Vale destacar que para el diseño del espectrómetro se buscó que el ancho espectral de la fuente ilumine la mayoría de los píxeles de la cámara, también se agrandó el ancho del haz antes de la lente de enfoque para conseguir spots mas pequeños. Como se puede observar en la Figura 4.9 con los parámetros selecciona-

dos indicados en el párrafo anterior, se obtiene una resolución de espectrómetro de $\delta\lambda = (0.08 \pm 0.005)$ nm, comparable a la de espectrómetros comerciales.

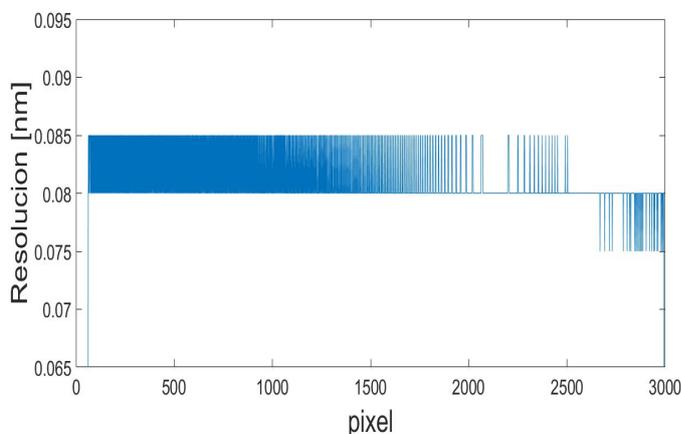


Figure 4.9: Cálculo de la resolución espectral de cada pixel modificando solo el ancho de haz a $D = 22$ mm

4.1.2 Propuesta de extensión de rango

A partir de comprender el funcionamiento general del espectrómetro y de los elementos en particular que lo componen orientado para su uso en la técnica de FD-LCI se analizó la posibilidad de extender el rango máximo de medición. Dada un detector fijo, su cantidad y tamaño de píxeles, determinaran el tamaño total de detección. A su vez dada la fuente de iluminación con su correspondiente λ_0 y $\Delta\lambda$ se puede elegir la f_{out} para definir el ancho espectral finalmente detectado, Figura 4.10. De esta manera es posible personalizar el espectrómetro para que con la misma cantidad de píxeles se detecte la porción deseada del espectro, achicando la $\delta\lambda$ y aumentando el z_{max} , Ecuación 2.16. Básicamente se cambia la relación entre la frecuencia de oscilación de la señal de interferencia respecto a los píxeles para detectar frecuencias mas altas (DCO mayores), Figura 2.6. El inconveniente que tiene esto es que si ya se encuentran todos los píxeles iluminados al usar f_{out}

mas grandes se pierde ancho espectral y disminuye así la resolución de FD-LCI, generando una relación de compromiso a tener en cuenta para la aplicación deseada.

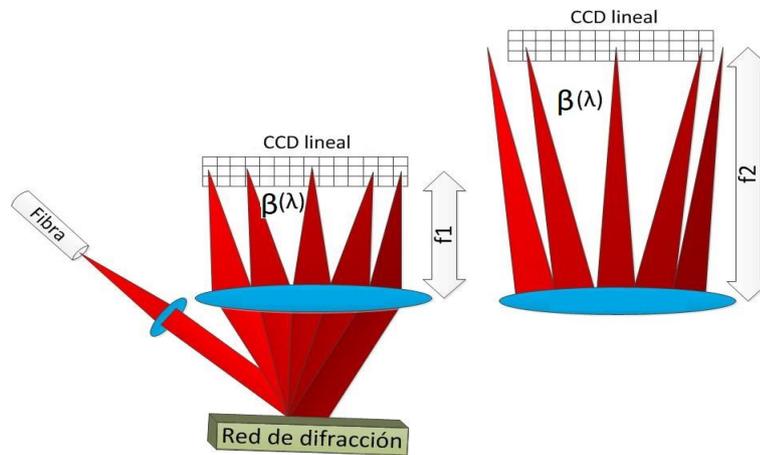


Figure 4.10: Esquema de la extensión del rango de medición de un espectrómetro para FD-LCI, para mismos anchos espectrales de iluminación con lentes de mayor distancia se puede sobrellenar la cámara

Por lo tanto, modificando f_{out} se puede seleccionar el $\Delta\lambda$ detectado por la cámara y a su vez jugando con la cantidad de píxeles iluminados se puede buscar diferentes combinaciones para lograr la z_{max} deseada. En la Figura 4.11, se muestra un esquema de esto marcando con líneas punteadas las cámaras o arreglos lineales disponibles en el laboratorio pensando en la posible necesidad de construir espectrómetros personalizados. Recordar que sobre este valor va a operar el efecto de atenuamiento Fall-off.

4.2 Espectrómetro personalizado

Se monto un espectrómetro basándose en el esquema de la Figura 4.2 con los elementos que se encontraban disponibles en el laboratorio, basándonos en los aprendizajes obtenidos de las simulaciones de la Sección 4.1.1. En la configuración

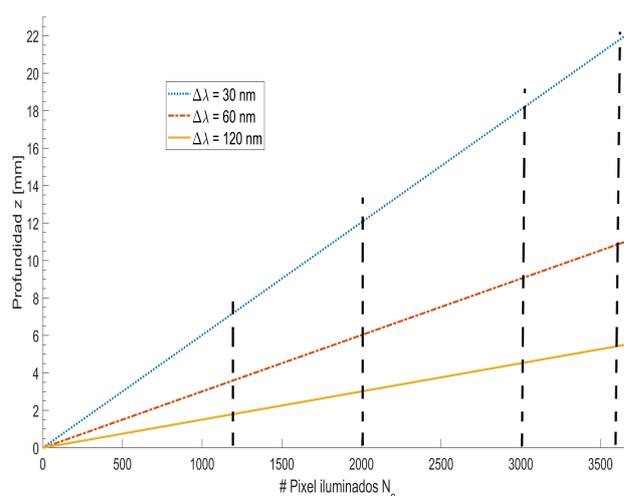


Figure 4.11: Esquema para las máximas profundidades medida en función de la cantidad de píxeles iluminados para diferentes anchos espectrales

experimental utilizada la iluminación se realizó con un diodo superluminescente Superlum SLD-CS no gaussiano con longitud de onda central $\lambda_0 = 850$ nm y $\Delta\lambda = 80$ nm. La entrada al espectrómetro estaba dada por una fibra óptica de 0.22 de apertura numérica, a continuación se colocó una lente de entrada que definió un diámetro de haz de $D = 22$ mm logrando prácticamente iluminar toda la red de difracción de 25 mm de ancho, de 1200 l/mm y con un ángulo incidente adecuado para utilizar el orden 1 de la red de difracción. Se eligió la $f_{out} = 15$ cm de la lente de salida para iluminar con el ancho espectral de la fuente de luz la mayor cantidad de píxeles del detector y que a su vez tenga un relación de spot d_0 con tamaño de pixel aceptable para reducir el efecto del Fall-off. Por último se usó un detector CCD lineal de 3000 píxeles con cada uno un tamaño de 7 μ m. Se prosiguió a realizar mediciones.

En la Figura 4.12 se puede observar una señal de interferencia correspondiente al espesor de un cubre objetos utilizando un interferómetro de una única rama detectada con el espectrómetro personalizado.

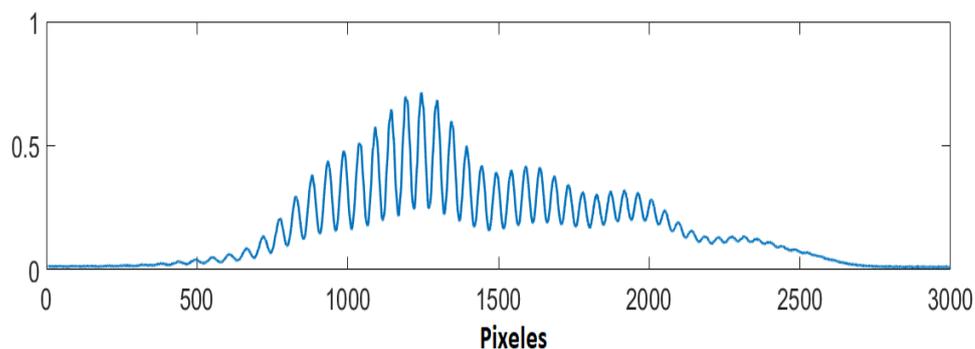


Figure 4.12: Medición de la intensidad en cada píxel de la señal interferométrica de un cubre objetos con el espectrómetro personalizado con los elementos disponibles en el laboratorio.

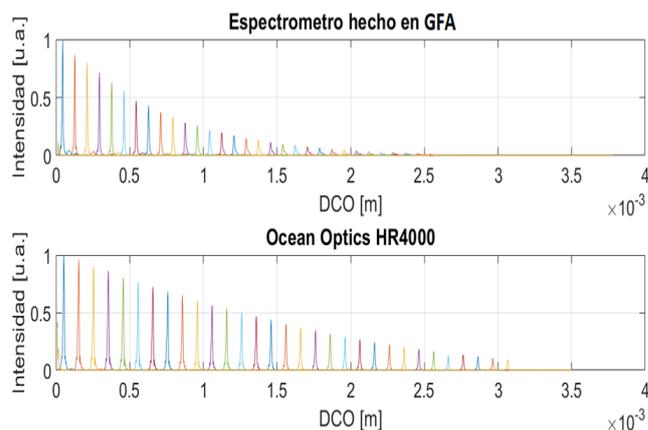


Figure 4.13: Comparación de 32 mediciones espaciadas cada $100 \mu m$ (cada una con un color distinto) entre el espectrómetro personalizado y un espectrómetro comercial Ocean Optics 4000.

Se montó un interferómetro de Michelson en aire donde en una rama se colocó un actuador para modificar controladamente la DCO. La salida se dividió para que vaya en paralelo al espectrómetro personalizado y a un espectrómetro comercial Ocean Optics HR-4000. Midiendo con ambos espectrómetros en simultaneo, poder comparar los datos obtenidos. Se tomaron 32 mediciones modificando la DCO con incrementos de $100 \mu m$ a partir de un valor inicial de $DCO = 50 \mu m$ para abarcar todo el rango de medición del espectrómetro comercial y a continuación se realizó su transformada de Fourier. Para el uso final del espectrómetro

personalizado faltó realizar la calibración de la distribución no lineal de las frecuencias espaciales k sobre el detector debido a la falta de un fuente de luz calibrada dentro del rango espectral deseado. Esto corregiría la posición de cada pico de la transformada de Fourier y angostaría los anchos de cada pico, mejorando su sensibilidad de detección [37]. En la practica es posible realizar un ajuste lineal para corregir por lo menos la posición de los picos ya que se tiene tanto la información del desplazamiento del actuador como la medición del espectrómetro comercial. Si bien hay elementos que pueden ser mejorados, el objetivo de esta medición es mostrar que con elementos disponibles en el laboratorio (lentes, red de difracción y cámara/detector lineal) que suman un valor de 1000 USD se puede obtener mediciones comparables (con la correspondiente calibración) a las de un espectrómetro comercial de un valor de USD 6000.

4.3 Conclusiones

Se estudió el funcionamiento de un espectrómetro pensado como el detector de la técnica de FD-LCI. Identificando a la resolución del espectrómetro, la relación de tamaño spot-pixel y al rango espectral del espectrómetro como parámetros clave a tener en cuenta para su diseño. Se realizaron simulaciones para caracterizar y cuantificar el rol de cada uno de los elementos que lo componen y cómo estos inciden en el desempeño de la técnica. Se integraron todos estos cálculos para conseguir una simulación completa del espectrómetro. A partir del análisis realizado se propuso una manera de extender el rango de medición y también de diseñar espectrómetros en función de la muestra de interés (rango máximo de

medición, Fall-off, diseño compacto, resolución de FD-LCI deseada, etc). Con este conocimiento se armó un espectrómetro personalizado y se lo comparó con uno comercial. Si bien falta el proceso de calibración, a partir de las mediciones realizadas se puede observar que se logra un desempeño similar con un costo económico aproximado del 15% del valor del espectrómetro comercial.

Sin lugar a dudas, comprender el funcionamiento de un espectrómetro es un muy buen ejercicio para ganar experiencia y conocimiento en el mundo de la fotónica ya que integra varios conceptos troncales: propagación de haces, dispersión en redes, posiciones focales, etc.

”Si buscas resultados distintos, no hagas siempre lo mismo”

Albert Einstein

5

Interferómetro Heterodino

Uno de los objetivos de esta tesis es extender el rango de medición de la técnica de FD-LCI 1.2 pensando alternativas no convencionales, Sección 1.1.1. Para eso, en este capítulo, se propone un agregado a la configuración típica de FD-LCI que consta de colocar un interferómetro adicional antes del espectrómetro para evadir la limitación convencional de la máxima DCO medible. Si bien el detector continua siendo un espectrómetro con su red de difracción, tamaño y cantidad de pixel finito, el interferómetro extra permite sintonizar las DCO de varios centímetros y traerlas dentro del rango de medición del espectrómetro. Como así también sortear el efecto de atenuación para DCO grandes producidos por el Fall-off, Sección 2.1.3.

Este trabajo [39, 62] sirvió para comenzar a dar los primeros pasos en los

conceptos de interferómetro y espectrómetro heterodinos [38, 125] llevados adelante en la tesis doctoral dentro del Grupo de Fotónica Aplicada titulada "Sistema de expansión de rango dinámico para interferometría de baja coherencia" de Leslie Cusato. Y que a su vez sembró las ideas iniciales para la nueva técnica propuesta en el Capítulo 8 de esta tesis.

5.1 Descripción teórica

En la Figura 5.1, se puede observar un esquema del dispositivo experimental propuesto en esta sección. Es una configuración experimental típica de FD-LCI iluminada por una fuente de luz (FL) pero en donde se agrega un interferómetro extra a continuación del interferómetro de la rama de muestra y referencia y antes del espectrómetro, que llamaremos interferómetro heterodino tipo Michelson (HMI). En el primer interferómetro se acumula una DCO de $\Delta d = d_2 - d_1$ y a los fines del modelado teórico se puede suponer que posee un índice de refracción n_g , mientras que en el HMI se acumula una DCO de $\Delta R = R_2 - R_1$. Una manera de interpretar el funcionamiento de dos interferómetros en serie o también llamados en tandem, es pensar que el campo eléctrico E_1 que se refleja en la primer rama del primer interferómetro con coeficiente de reflectividad r_1 se divide en dos nuevos campos eléctricos E'_1 y E''_1 al pasar por el HMI. Con la peculiaridad que E'_1 recorrió una distancia R_1 y su intensidad depende del coeficiente de reflectividad r' y E''_1 recorrió una distancia R_2 y su intensidad depende del coeficiente de reflectividad r'' . De manera similar sucede con el campo eléctrico E_2 que es el que se refleja en la segunda rama del primer interferómetro.

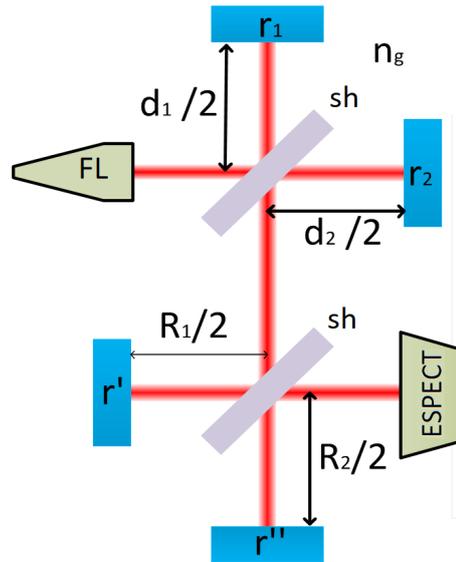


Figure 5.1: Esquema de dos interferómetros tipo Michelson en serie iluminados con un Fuente de luz (FL), detallando los separadores de haces (sh), las distancias de cada rama, los coeficientes de reflectividad de cada espejo y usando un espectrómetro como detector.

Por lo tanto la intensidad $i(k)$ generada por la superposición de estos cuatro campos E'_1 , E''_1 , E'_2 y E''_2 sobre el espectrómetro se puede expresar como:

$$i(k) = \langle (E'_1 + E'_2 + E''_1 + E''_2)^2 \rangle \quad (5.1)$$

Se considera que las reflectividades de los espejos del HMI son iguales y por ende que $|E'_1| = |E''_1|$ y $|E'_2| = |E''_2|$. Escribiendo la expresión de cada campo mediante la Ecuación 2.5, integrando en el tiempo y desarrollando se obtiene:

$$\begin{aligned}
i(k) = s(k) & [2(|E'_1|^2 + |E'_2|^2) \\
& + 4|E'_1||E'_2|\cos(kn_g\Delta d) + 2(|E'_1|^2 + |E'_2|^2)\cos(k\Delta R) \\
& + 2|E'_1||E'_2|\cos(k[\Delta R - n_g\Delta d]) + 2|E'_1||E'_2|\cos(k[\Delta R + n_g\Delta d])] \quad (5.2)
\end{aligned}$$

Realizando la transformada de Fourier de la Ecuación anterior, usando propiedades de multiplicación de la transformada, se obtiene una expresión en el espacio de las distancias dada por:

$$\begin{aligned}
I(z) = S(z) * & [2(|E'_1|^2 + |E'_2|^2)\delta(z) \\
& + 4|E'_1||E'_2|(\delta(z + n_g\Delta d) + \delta(z - n_g\Delta d)) \\
& + 2(|E'_1|^2 + |E'_2|^2)(\delta(z + \Delta R) + \delta(z - \Delta R)) \\
& + 2|E'_1||E'_2|(\delta(z + (\Delta R - n_g\Delta d)) + \delta(z - (\Delta R - n_g\Delta d))) \\
& + 2|E'_1||E'_2|(\delta(z + (\Delta R + n_g\Delta d)) + \delta(z - (\Delta R + n_g\Delta d)))] \quad (5.3)
\end{aligned}$$

Donde la variable z representa la profundidad, $S(z)$ es la transformada de Fourier del espectro del haz incidente, "*" representa la operación de convolución y δ es la función delta la cual se anula para todos valores de z salvo para cuando su argumento es nulo. Cada delta en la Ecuación 5.3 al convolucionarla con $S(z)$ va a generar un "pico" centrado en el valor de las distintas DCOs generadas en el sistema. La primer delta, centrada en $z = 0$, es la componente de continua, las deltas centradas en $n_g\Delta d$ y en ΔR corresponden a la DCO del primer interferómetro y DCO del interferómetro de HMI. Estos picos se obtienen también realizando FD-

LCI de manera convencional. Como ya es sabido, cada pico tiene su contraparte negativa para $z = -DCO$ debido al resultado de la transformada de Fourier de la función coseno. Lo novedoso de agregar el interferómetro extra es que surgen nuevos “picos” centrados en valores dados por la siguiente expresión:

$$p(P_{s,r}) = \Delta R \pm n_g \Delta d \quad (5.4)$$

Donde P_s hace referencia al pico suma el cual se obtiene a partir del término $\delta(z - (\Delta R + n_g \Delta d))$ de la Ecuación 5.3, P_r al pico resta correspondiente al término $\delta(z - (\Delta R - n_g \Delta d))$ y el símbolo $p(P_{s,r})$ hace referencia a la posición en el eje z , donde se ubican cada uno de estos picos.

Sintonizando el valor de ΔR cerca del valor de $n_g \Delta d$ de tal manera que el pico $P_{r,s}$ se encuentre dentro del rango de medición permitido por el espectrómetro y sabiendo el valor de ΔR es posible inferir el valor de la DCO deseada $n_g \Delta d$ mediante 5.4, a pesar inclusive de que este sea mayor que el z_{max} determinado por la técnica convencional de FD-LCI, Ecuación 2.16. El único requisito es que el centro de los picos P_r y P_s se encuentren dentro del rango dinámico del espectrómetro. Con un valor de ΔR fijo y un rango dinámico dado del espectrómetro, es posible llevar a cabo la medición simultánea de cualquier DCO dentro del rectángulo punteado rojo y el rectángulo verde utilizando el P_r , como se muestra en la Figura 5.2. A su vez modificando el valor ΔR , se pueden medir DCOs más cortos y/o más grandes. Es decir de esta manera se puede tener información de dos rangos de medición del espectrómetro, uno real de 0 a z_{max} (rojo) midiendo el pico de la DCO correspondiente y otro virtual de igual rango pero sintonizado en ΔR (verde)

a través del pico P_r .

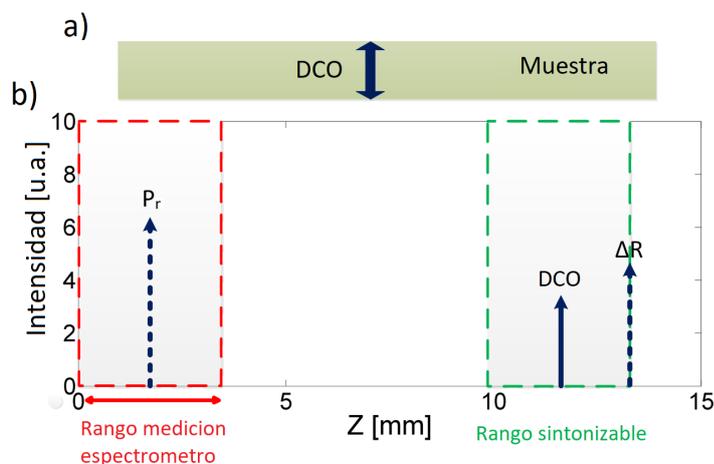


Figure 5.2: a) Diagrama esquemático de una muestra monocapa con un DCO mayor el rango de medición del espectrómetro. b) Esquema de los picos experimentales de la señal de la transformada de Fourier, utilizando el interferómetro en tándem. Ajustando ΔR es posible ubicar el pico resta (P_r) dentro del rango dinámico del espectrómetro.

Vale destacar que es necesario controlar los valores de R_1 y R_2 para mantener el mismo signo de ΔR a lo largo de toda la medición para evitar errores en la determinación del pico medido. También prestar atención al modificar el valor de ΔR para no confundir los picos positivos y los negativos.

La Ecuación 5.3 posee términos donde los argumentos se anulan para $z < 0$, denominados picos negativos, a partir de los cuales también se puede encontrar la información deseada. Estos pueden ser utilizados si $\Delta R < n_g \Delta d$. Bajo esta condición $p(P_s)$ toma valores negativos y se encuentra fuera del rango de medición (0 a z_{max}). Al mismo tiempo, el pico resta negativo que denominaremos P'_s , el cual proviene del término $\delta(z + (\Delta R - n_g \Delta d))$ de la Ecuación 5.3, se vuelve visible para el rango de medición del espectrómetro. Bajo estas condiciones, la fórmula matemática para calcular $n_g \Delta d$ propuesta en 5.4 es ligeramente diferente $n_g \Delta d = \Delta R + p(P'_s)$. Un consejo práctico para identificar qué pico se está midi-

endo es analizar la dirección del movimiento del pico en cuestión con respecto a una variación conocida de ΔR desplazando una de las ramas del segundo interferómetro.

El error de medición en este nuevo sistema cambia para valores de DCO mayores que z_{max} mientras que la resolución permanece igual (es decir, el ancho del pico es el mismo). El error del sistema es la suma del error del desplazamiento del motor micrométrico con que se sintoniza ΔR y el error convencional de FD-LCI.

Otra consecuencia interesante del uso del HMI es que al modificar ΔR se puede colocar el P_r en cualquier posición dentro del rango del espectrómetro, por ende en caso de querer ganar sensibilidad se puede sintonizar ΔR muy próximo de $N_g \Delta d$ para que P_r tome valores cercanos a cero evitando que el Fall-off atenué su intensidad.

5.2 Mediciones

En la Figura 5.3 se muestra el dispositivo experimental utilizado, se usó una fuente de luz (FL) supercontinua (modelo NKT SuperK Extreme IR) y se limitó, utilizando un filtro óptico, su ancho espectral a 130 nm centrados en 850 nm con una potencia efectiva de 37 mW. El cual, después de filtrado se acopla a una fibra óptica, se transmite a un circulador (PIOC-3-85-P-1-21-1 de AC Photonics), que actúa como un interferómetro de fibra de un solo brazo y utiliza colimadores de fibra (CF) (TC06APC-780 de Thorlabs) para iluminar la muestra. Las reflexiones producidas en las interfaces de la muestra son recogidas por la misma fibra óptica y llevadas al HMI. Este es un interferómetro de tipo Michelson con dos espejos

(PF10-03-P01 de Thorlabs) al final de cada brazo. Uno de ellos se montó sobre un posicionador micrométrico manual, lo que permitió conocer y ajustar el valor de ΔR . Finalmente se utiliza un espectrómetro Ocean Optics HR 4000 para detectar la señal. Este posee una red de difracción de 1200 l/mm, 3648 pixeles y cada uno de un tamaño horizontal de $8 \mu\text{m}$. Utilizando la configuración tradicional de solo un interferómetro es posible medir valores de DCO máximos de $z_{max} = (3.480 \pm 0.008)$ mm.

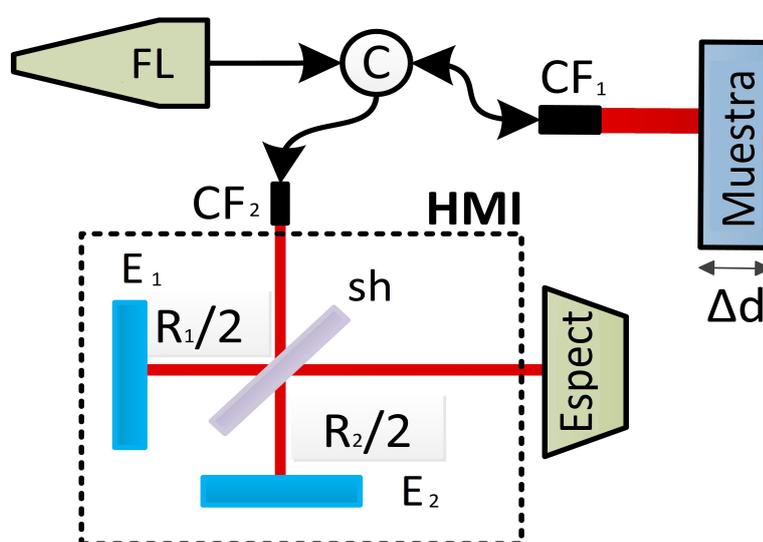


Figure 5.3: Diseño de la configuración experimental. Típico montaje de interferometría de baja coherencia en fibra óptica con un segundo interferómetro añadido antes del espectrómetro.

Se realizaron mediciones de diferentes muestras para testear el funcionamiento del HMI, Tabla 5.1.

Muestra	Espesor nominal [mm]	n_g
Cubre-objetos	$0,140 \pm 0,020$	$1,515 \pm 0,001$
Lamina Acrílico	$5,960 \pm 0,020$	$1,511 \pm 0,001$
Dos placas paralelas de vidrio	$1,077 \pm 0,020$ (placa) $16,023 \pm 0,020$ (separación)	$1,515 \pm 0,001$ $1,000 \pm 0,001$

Table 5.1: Valores nominales de las muestras medidas. Los espesores fueron medidos con un micrómetro y los índices de refracción (n_g) fueron proporcionados por los fabricantes.

Se comenzó realizando una medición del espesor de un cubre-objetos de valor

nominal de $(0,144 \pm 0,020)$ mm y un índice de refracción $n_g = 1,5150 \pm 0,001$. ΔR se ajustó de manera que todos los picos predichos por la Ecuación 5.3, para $z \geq 0$, se encuentren dentro del rango dinámico del espectrómetro para observar de manera mas sencilla el funcionamiento del interferómetro heterodino. Las DCO del cubre-objetos se muestran en la Figura 5.4, donde $n_g \Delta d = (0,220 \pm 0,008)$ mm, una segunda reflexión en $(0,440 \pm 0,008)$ mm, P_r en $(2,793 \pm 0,008)$ mm, ΔR en $(3,014 \pm 0,008)$ mm y P_s en $(3,234 \pm 0,008)$ mm.

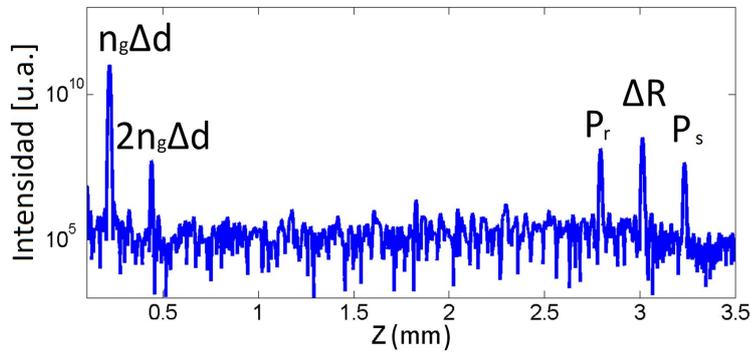


Figure 5.4: Medición de un cubre-objetos con ΔR sintonizado dentro del rango dinámico del espectrómetro. Se identifican las DCO de la muestra ($n_g \Delta d$), del segundo interferómetro (ΔR) y los picos suma (P_s) y resta (P_r).

A partir de la medición de ΔR mediante un actuador micrométrico y la posición de P_r referida como $p(P_r)$, podemos estimar el valor de $n_g \Delta d = \Delta R - p(P_r)$. Esta expresión muestra que sintonizando convenientemente el valor de ΔR , es posible obtener valores de $n_g \Delta d$ para DCO que superen el rango dinámico del espectrómetro. Teniendo esto en cuenta, se midió una lámina de acrílico con un espesor nominal de $(5,960 \pm 0,020)$ mm, un valor mayor que el z_{max} . ΔR se ajustó para ser ligeramente mayor que la DCO de la muestra hasta que se encontrara P_r y se posicionó convenientemente para que la amplitud de P_r no se viera afectada significativamente por el efecto del Fall-off. Las mediciones mostraron que $DCO_{acril} = (9.011 \pm 0.020)$ mm y para $n_{gacril} = 1,511 \pm 0.001$, se obtuvo

un valor de $\Delta d_{acril} = (5,964 \pm 0,013)$ mm. Estas mediciones incluyen el error debido al desplazamiento mecánico asociado con ΔR , de $\pm 0,012$ mm y al error de la técnica de FD-LCI de $\pm 0,08$ mm.

Por ultimo, se midió una muestra conformada por dos láminas de vidrio paralelas con $n_g = 1.515 \pm 0.001$, separadas por un amplio espacio de aire de 16 mm. En la Figura 5.5.a) se puede observar un esquema en donde se indican las DCOs presentes en la muestra. Se tienen estos 6 valores indicados como Δd_1 , Δd_2 , Δd_3 , Δd_4 , Δd_5 y Δd_6 . A su vez, se suman los 6 valores de P_r y P_s , así como el pico en ΔR . Dado que las distancias entre las dos laminas de vidrio es mayor a un centímetro, todos los picos se encuentran relativamente separados.

Para un valor de ΔR sintonizado en $(2,017 \pm 0,008)$ mm, se observaron cinco picos, como se muestra en la Figura 5.5.b): el pico en ΔR , las dos DCO de cada lámina para $n_g \Delta d_1 = (1,627 \pm 0,008)$ mm y $n_g \Delta d_2 = (1,646 \pm 0,008)$ mm, y las dos posiciones de los picos resta $P_{s1,2}$ en $(0,388 \pm 0,008)$ mm y $(0,372 \pm 0,008)$ mm.

En una segunda medición para la misma muestra, el valor de ΔR se aumentó varios milímetros excediendo el rango máximo de medición del espectrómetro a $(15,951 \pm 0,012)$ mm, donde se pudieron detectar más picos. A partir de estos resultados, se pudieron calcular el resto de los espesores. Notar que en este caso, el valor de ΔR es menor que la DCO a medir por lo tanto los picos resta que se observan son los negativos, denominados P'_r . La máxima DCO medida fue (19.283 ± 0.020) mm. Se obtuvieron los espesores $\Delta d_3 = (16,027 \pm 0,013)$ mm, $\Delta d_4 = (17.082 \pm 0,013)$ mm, $\Delta d_5 = (17,126 \pm 0,013)$ mm y $\Delta d_6 = (18,185 \pm 0,013)$

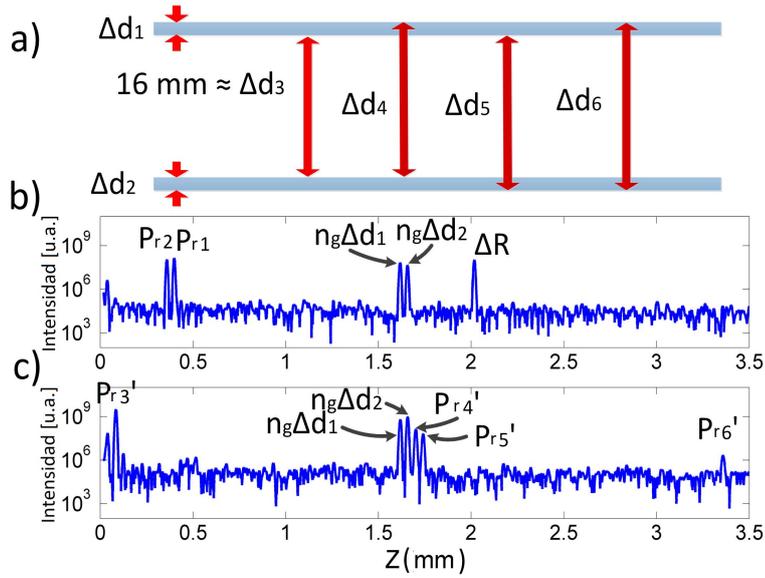


Figure 5.5: a) Esquema de una muestra conformada por dos cubre-objetos paralelos separados 16 mm, en el cual se indican todas las distancias características. Se realizaron mediciones para sintonizaciones de b) $\Delta R = (2,017 \pm 0,008) \text{ mm}$ y c) $\Delta R = (15,951 \pm 0,012) \text{ mm}$.

mm. Las DCO de las dos láminas continúan siendo observadas, ya que sus posiciones no dependen de la sintonización de ΔR . La adición del HMI ofrece la ventaja considerable de medir una DCO dentro del rango de medición del espectrómetro y simultáneamente medir una DCO mayor.

5.3 Conclusiones

Se demostró tanto teóricamente como experimentalmente el uso de un sistema basado en la técnica de FD-LCI con un interferómetro adicional el cual permite la medición de muestras con espesores mayores que el máximo rango determinado convencional espectrómetro. Este nuevo sistema permite sintonizar las DCO del orden de centímetros y traerlas dentro del rango de medición del espectrómetro, manteniendo la resolución e incrementando el rango de medición con un costo

económico bajo. Al mismo tiempo, esta configuración puede ser utilizado para reducir los efectos de atenuación producidos por el Fall-off. Se realizaron mediciones de una lámina de acrílico y de los espesores internos y totales de una muestra multicapa. Esta propuesta posee características interesante para problemáticas existentes en la industria, como por ejemplo la planteada en subsección 3.2.1.

Mas allá de usar el interferómetro extra para medir espesores de muestras que excedan el z_{max} también puede resultar especialmente útil para medir variaciones de espesores de muestras de manera dinámica. En donde esta variación sea más pequeña que el rango dinámico del espectrómetro y el espesor de la muestra sea de varios centímetros, ya que estas variaciones se determinarán con el error de FD-LCI. Por ejemplo, se podría usar para medir la dilatación del orden de los micrómetros o milímetros de una varilla plástica de varios centímetros de espesor. Además, podría resultar útil para muestras de múltiples capas donde las capas tienen espesores delgados pero se encuentran separadas por distancias mucho mayores a su espesor, como el ejemplo de la la Figura 5.5.

El HMI podría implementarse como un accesorio a sistemas de FD-LCI comerciales existentes para extender y/o adaptar sus rangos de medición.

La implementación de este esquema permitió pensar y profundizar en el concepto de la "interferencia de la interferencia". Idea que generó cierta línea de trabajos desarrollados en esta misma tesis Capítulo 8, en otra Tesis doctoral, publicaciones y premios A.1.

”Enseñar no es transferir conocimiento, sino crear las posibilidades para su propia producción o construcción.”

”No hay enseñanza sin investigación ni investigación sin enseñanza.”

Paulo Freire

6

Procesado de señales de FD-LCI con Redes Neuronales

Las Redes Neuronales Artificiales (RNs) se han desarrollado y crecido de una manera considerable en los últimos años captando la atención no solo de la academia, sino también de disciplinas que van desde la medicina hasta las finanzas, interviniendo en problemáticas teóricas y también experimentales, que involucran a instituciones públicas como privadas y a nivel local como global. Estas no son técnicas nuevas, ya existen hace varias décadas, pero los avances progresivos en esta área sumado al aumento de la capacidad humana de generar, almacenar y transmitir grandes cantidades de información hicieron que en estos últimos años

se vuelva a realzar y valorizar su gran potencialidad. En los últimos años la cantidad de publicaciones y relevancia en Inteligencia Artificial (IA) ha aumentado a pasos agigantados. Sumado al uso masivo de nuevas tecnologías basadas en IA por gran parte de la población. Por estos motivos, considero que aprender de estas herramientas es de vital importancia en nuestra formación como científicos.

Una vez adquirida la señal interferométrica en la técnica de FD-LCI con el espectrómetro es necesario realizar un post procesado para calcular la transformada de Fourier, ver sección 2.1.3, para encontrar las DCOs relevantes en la muestra. Lo que se busca en este capítulo es justamente utilizar Redes Neuronales Artificiales para reemplazar herramientas convencionales del procesamiento de señales y en particular el cálculo de la Transformada de Fourier, ver sección 2.1.3, que se utiliza para estimar la frecuencia característica de la señal en la técnica de FD-LCI. Un desarrollo más amplio de lo aquí presentando se puede encontrar en el Capítulo 11 del libro [91].

6.1 Estimando frecuencias de señales topográficas de FD-LCI

Una de las aplicaciones de la técnica de FD-LCI es la realización de topografías o perfilometrías. En este tipo de situaciones la señal de interferencia tiene una única frecuencia de oscilación, ver Ecuación 2.11. Esto puede suceder cuando la reflexión en la muestra proviene de una sola interfase, su superficie. Una señal similar también puede obtenerse en caso de implementar un interferómetro de una única rama e iluminar una muestra de dos interfases [126]. En este caso se estaría

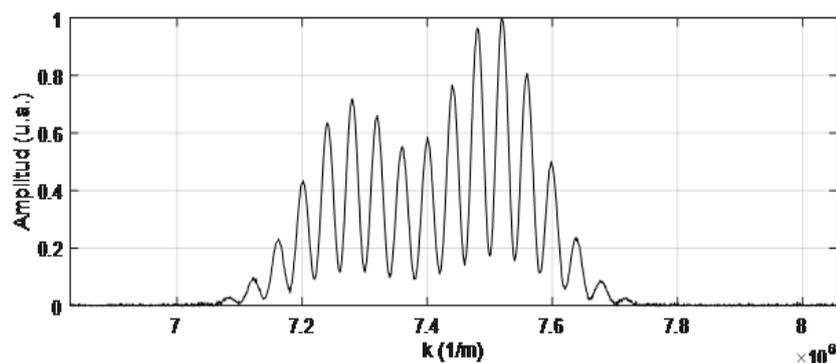


Figure 6.1: Señal típica de FD-LCI de una topografía, donde se puede apreciar la oscilación de la amplitud en función de k .

midiendo el espesor óptico de la muestra. Estas mediciones topográficas se pueden realizar sin contacto físico con la muestra bajo investigación, con una resolución de unos pocos micrómetros e incluso en muestras difusas [20, 25, 26, 57].

En la Figura 6.1 se puede observar una típica señal de FD-LCI adquirida con un espectrómetro, al realizar topografías. Se puede apreciar como la visibilidad o pico a pico de la señal no es máximo para todas las frecuencias espaciales. Esto se debe a la relación entre las reflectividades, a la óptica utilizada y a una posible respuesta distinta de los píxeles del detector. Además, se ve como la forma espectral de la fuente de luz utilizada $S(k)$ genera una envolvente sobre la señal, que en este caso se modeló la forma espectral de doble gaussiana, muy apropiada para fuente de iluminación como los diodos superluminiscente.

Una vez adquirida la señal en el espectrómetro es necesario realizar diferentes etapas de procesamiento antes de calcular su frecuencia. Como el espectrómetro realiza un muestreo no lineal en función de k , es necesario realizar un remuestreo en primera instancia. Seguido de un filtrado de la componente de continua, luego se determina la envolvente que representa la forma espectral de la fuente de luz, se procede a realizar una normalización, un recorte de la señal en función de los

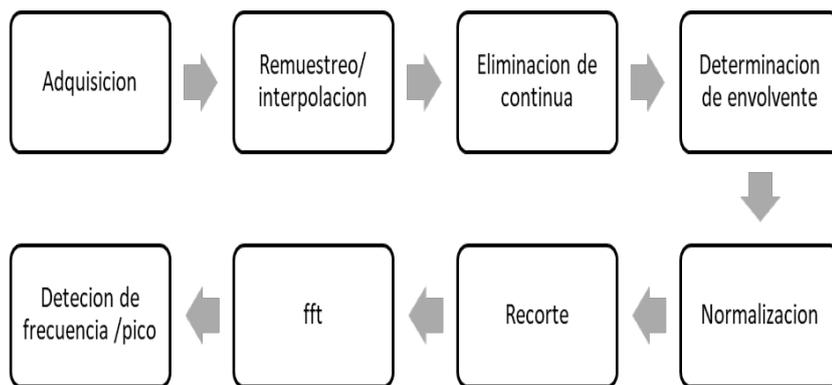


Figure 6.2: Esquema de las etapas de procesamiento necesario para obtener la DCO deseada.

puntos útiles, se realiza la transformada rápida de Fourier (fft) y finalmente la determinación de la frecuencia espacial o posición del pico. Un esquema de este procesamiento se puede ver en la Figura 6.2.

Como se puede observar en la Figura 6.3, la señal detectada va modificando su forma a medida que se van aplicando las diferentes etapas del procesado. Primero se detecta la señal de FD-LCI, luego se filtran las frecuencias bajas, se identifica la envolvente y divide para finalmente realizar la transformada rápida de Fourier de la señal oscilante. Este procesado [127] es necesario aplicarlo para poder calcular con mejor precisión la posición del máximo de la transformada de Fourier y así obtener la frecuencia de oscilación que es la información deseada. Esta información también se puede obtener al medir los periodos de la señal en el espacio k , por lo cual el problema central que se desea resolver es la estimación de frecuencias. Un desarrollo más amplio se puede encontrar en las Sección 2.3.2. Es evidente que se puede entrenar a una red neuronal para realizar la transformada de Fourier, como se destaca en [128], pero no sería el método más eficiente, ya que como se mencionó los algoritmos existentes tienen gran eficiencia y flexibilidad. La idea es entonces hacer que la red neuronal aprenda a estimar la frecuencia, generando a

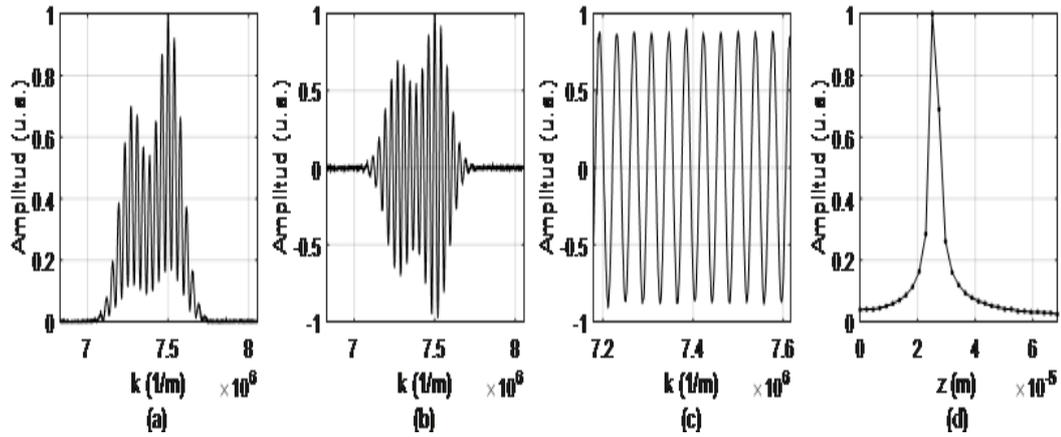


Figure 6.3: Ejemplos del procesado convencional. a) señal de FD-LCI detectada, b) señal con filtrado de las frecuencias bajas, c) señal anterior habiéndola dividido por la señal envolvente y d) Transformada rápida de Fourier de la señal anterior.

partir de su propio aprendizaje, su propio método de estimación.

6.2 Consideraciones generales

Se toma como elemento de análisis la señal descrita en la Ecuación 2.11 que describe la intensidad de la señal de interferencia detectada por el espectrómetro para la condición de topografía. A lo largo de este capítulo se trabajó sobre señales simuladas, dejando para trabajos a futuro la utilización de señales experimentales. Se simularon señales con distancias ópticas $\Delta d = z_s$ comprendidos entre $100 \mu m$ a $1000 \mu m$ y entre $30 \mu m$ a $500 \mu m$ dando exactamente el doble para las DCO (Ecuación 2.1), considerando la forma espectral de la fuente de luz gaussiana centrada en $850 nm$ y con un ancho de $50 nm$. Calculando mediante la Ecuación 2.10 se obtiene una resolución $\Delta z = 8 \mu m$.

Las operaciones presentes en este capítulo fueron realizados en una computadora de 2 núcleos y procesador de 2.20 GHz Intel(R) Core(TM) con 8 GB de RAM.

Los diseños y entrenamiento de las RN que se proponen a lo largo del capítulo fueron pensados para que puedan ser realizados en una computadora promedio personal y que el proceso no demande más de 24 hs. El diseño, entrenamiento y manipulación de las RNs que se presentan fueron realizados en Matlab. Fácilmente pueden ser extendidos a Python utilizando los paquetes de TensorFlow y Keras.

Para medir el desempeño de las RN implementadas se usó el error cuadrático medio (RMSE) del subconjunto de testeo entre los valores reales Y_{test} y los predichos Y_{pred} .

$$RMSE = \frac{1}{T_{test}} \sqrt{\sum_{i=1}^{T_{test}} (Y_{test_i} - Y_{pred_i})^2} \quad (6.1)$$

Vale la pena aclarar que al repetir el entrenamiento de una misma red con exactamente los mismos parámetros el valor de RMSE puede haber variaciones debido a que los valores elegidos de testeo Y_{test} varían de manera aleatoria dentro de todo el conjunto total de datos. Otro parámetro que se utilizó para caracterizar la efectividad de las redes fue el error con respecto al peor valor predicho RSE_{max} sobre todo el conjunto Y (entrenamiento, validación y testeo).

$$RSE_{max} = \max \left(\sqrt{(Y - Y_{pred})^2} \right) \quad (6.2)$$

Para poder comparar los tiempos de ejecución de las distintas RN con la forma convencional de procesar la señal se calcularon los tiempos que demora cada etapa, ver [Tabla 6.1](#).

Etapa de procesado	Tiempo [ms]*	Orden de magnitud
Eliminación de continua	1.10	ms
Determinación de envolvente	2.31	ms
Normalización	0.06	decenas de μs
Recorte	1.52	ms
FFT	0.08	decenas de μs
Detección de pico	0.01	decenas de μs

Table 6.1: Tiempo que demora cada etapa de preprocesado utilizando la estimación de frecuencia para la técnica de FD-LCI. Se marcan los órdenes de magnitud ya que el valor de los tiempos depende fuertemente del procesador. * El error en los tiempos es de redondeo ± 0.01 .

6.3 Estimación paramétrica de frecuencias con redes neuronales

La estimación paramétrica se caracteriza por utilizar como elementos de entrada a la RN un conjunto de parámetros característicos de la señal, de manera tal que la cantidad de entradas a la red es pequeña, la conformación de la red neuronal se dice que es sencilla en cuanto al diseño de la cantidad de neuronas por capa, cantidad de capas y tipos de las neuronas. Esto claramente no implica que necesariamente sea más simple en cuanto al procesado de la información. Esta propuesta consiste en obtener parámetros relevantes de nuestra señal de interés mediante un preprocesamiento de la señal. Cuanto más característicos y/o peculiares sean los parámetros elegidos de la señal mayor va a ser la efectividad en el entrenamiento de la red consiguiendo una óptima especificidad y selectividad en las predicciones.

Se utiliza para esta descripción la señal que se puede observar en la Figura 6.4-a y se tiene el cuenta el termino de Fall-off, ver Sección 2.1.3. Para el análisis se utilizaron 1000 señales para valores de z_s equiespaciados entre 100 a 1000 μm de las cuales se extraen cuatro parámetros de interés: La intensidad máxima global (I_{max}), el valor pico a pico (VPP) en las cercanías del máximo global, el promedio

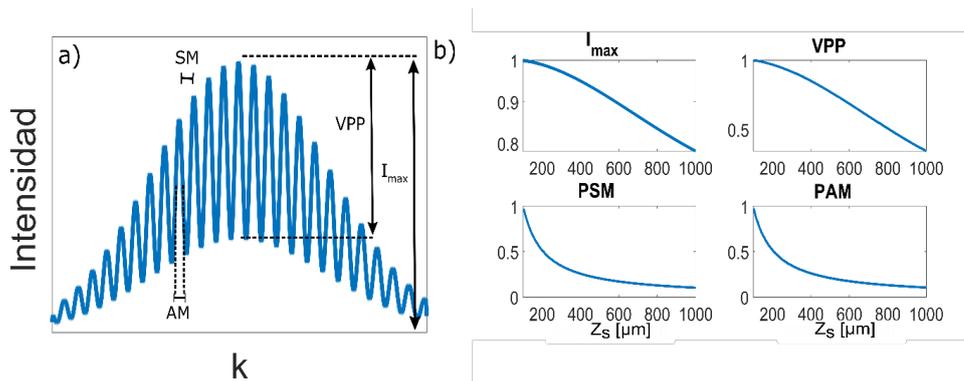


Figure 6.4: a) Esquema ilustrativo con los parámetros elegidos para caracterizar una señal típica de FD-LCI. b) Valores de los parámetros para las 1000 simulaciones realizadas variando la distancia z_s .

de separación entre dos máximos locales consecutivos (PSM), el promedio del ancho de cada uno de los máximos (PAM).

Se diseñó una RN sencilla del tipo feedforward conformada por una capa de entrada que cuenta con tantas neuronas como parámetros de entrada (Input) deseados, seguido de una capa interna de 8 neuronas y una capa de salida de una única neurona para obtener una respuesta del tipo regresiva, Figura 6.5. Esto permite no solo usar a la RN para clasificar conjuntos de entradas (inputs) dentro de ciertas categorías definidas, si no también obtener valores continuos como datos de salida (output) para cada conjunto de inputs. El cálculo del valor de salida lo termina realizando la función de activación de la neurona de la capa de salida.

Con un preprocesamiento se obtienen los 4 parámetros de las 1000 señales seleccionadas para realizar el entrenamiento de la RN. Esta RN luego de ser entrenada puede obtener una estimación de la frecuencia de oscilación con una alta precisión. El 72% de los datos se usó para el entrenamiento, el 18% para validación y el 10% para testeo. Se predijeron con la red entrenada los datos de testeo y se obtuvo un $RMSE = 0.10 \mu m$.

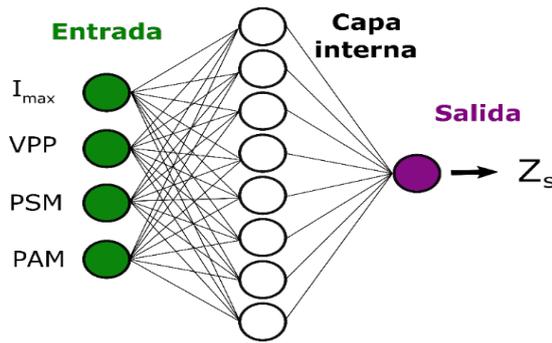


Figure 6.5: Estructura de la Red Neuronal de 8 neuronas densamente conectadas elegida para estimar frecuencia de señales parametrizadas. Se toman 4 valores de entrada y uno de salida.

Un análisis mediante RN para este caso puede resultar un poco redundante ya que parte del preprocesado es calcular la distancia entre máximos y la inversa de ese valor es la frecuencia en cuestión $z_s = 1/PSM$. En principio sería necesario predecirlo con una RN. Se coloca este ejemplo ilustrativo para comprender mejor la metodología de trabajo a desarrollar en este capítulo. Por otro lado, puede resultar interesante usar RN en un caso similar, si se desea ponderar el valor de la frecuencia con algún (o algunos) parámetro asociado como el VPP o si se desea calibrar el detector a partir de mediciones conocidas. En general en el caso de FD-LCI, y en otras aplicaciones también, la señal posee agregados y artefactos donde el uso de RN cobra una mayor utilidad. En una señal experimental de FD-LCI, tanto los dispositivos de detección como la muestra en estudio pueden generar efectos no deseados que modifican a la señal como por ejemplo:

- La dispersión angular distinta para cada longitud de onda en la red de difracción sumada a la llegada de un frente de onda esférico (o gaussiano) a un detector con geometría plana, genera un muestreo no uniforme de la señal de FD-LCI.

- Si el material en estudio tiene un índice de refracción $n(\lambda)$ que varía con la longitud de onda, genera un efecto dispersivo a la señal de FD-LCI.

La consecuencia de estos efectos particulares en la técnica de FD-LCI es similar, en ambos casos, distorsiona la señal de interferencia produciendo una deformación del pico en la transformada de Fourier, que genera errores en la detección de la frecuencia. Para probar el método paramétrico se utilizó la señal de FD-LCI con presencia de ruido. Teniendo en consideración que los métodos para corregir los efectos del muestro no uniforme no son costosos y se encuentran bien establecidos, se utiliza entonces una señal de FD-LCI considerando solo el efecto de índice de refracción $n(\lambda)$. Se generó un conjunto de señales de LCI con el índice de refracción $n(\lambda)$ de un vidrio BK7 y se amplificó por 5 para evidenciar el efecto dispersivo, se puede observar en la Figura 6.6.

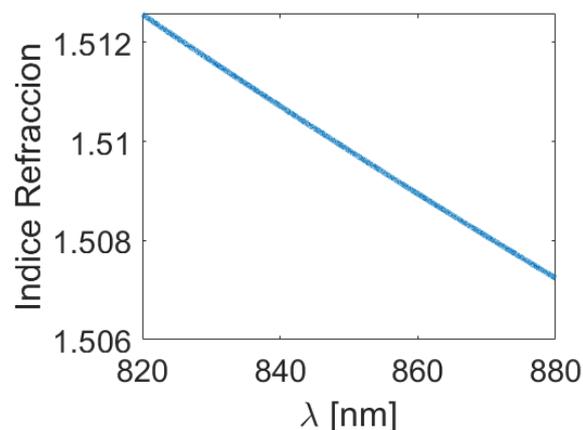


Figure 6.6: Índice de refracción en función de la longitud de onda utilizado en la simulación.

Como la DCO aumenta al tomar valores de n mayores para iguales z_s , se disminuyó el efecto del Fall-off para que las señales simuladas tengan un VPP apreciable. Al utilizar una señal más compleja, la obtención de los parámetros se vuelve más sofisticada al igual que el preprocesado de la señal de FD-LCI para

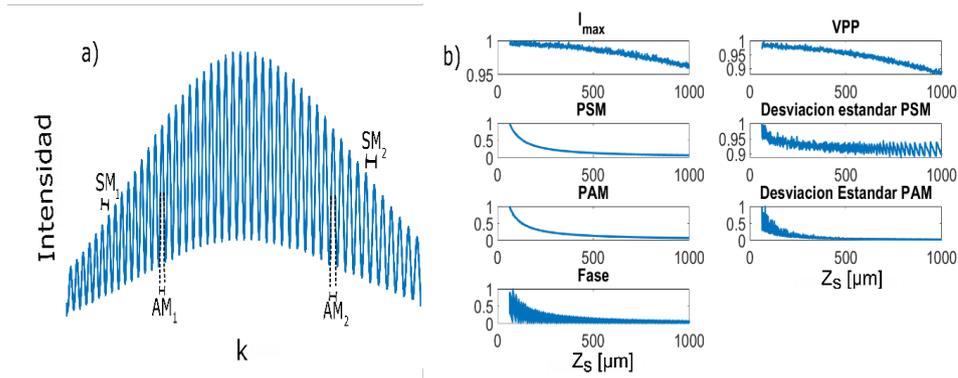


Figure 6.7: a) Esquema de una señal de LCI experimental con chirpeo, notar que $SM_1 < SM_2$ y $AM_1 < AM_2$ para una distancia z_s . b) Valores de los 7 parámetros para las 1000 simulaciones realizadas variando la Distancia z_s .

la obtención de los parámetros con precisión (filtrar espectralmente, calcular envolventes, agregar restricción para calcular mejor la posición de los máximos de las señales, etc). A diferencia del ejemplo anterior la señal de FD-LCI presenta el efecto de dispersión por lo cual se agregaron entradas adicionales: la desviación estándar del ancho promedio de los picos, la desviación estándar de la separación entre máximos y el valor de la fase promedio.

Como se observa en la Figura 6.7 los valores I_{max} y VPP tienen mayor variación debido a la incorporación de ruido. Por otro lado, los valores de los inputs se encuentran normalizados para el mejor funcionamiento de la RN.

Se utilizó la misma configuración de RN que en la Figura 6.5 y el mismo proceso de simulaciones, pero tomando ahora 7 valores de input.

Al entrenar la RN con las 1000 simulaciones se obtuvo un $RMSE = 1.1 \mu m$ probando que sigue siendo una buena manera de estimar la frecuencia. Los tiempos de las simulaciones y preprocesado dependen fuertemente del tamaño del vector k que queda definido por Δk y k_m . Considerando un tamaño de k de 1×10.000 , los tiempos de procesamiento son: 4.65 minutos para las simulaciones de la señal,

30 segundos para el preprocesado de todas las señales ($\frac{30s}{1000} = 30 \text{ ms}$ cada una), 16 segundos para el entrenamiento y 9 ms para la ejecución de un conjunto de entrada teniendo la red ya entrenada. Es evidente que a medida que las señales se tornan más complejas y/o se intenta que la RN permita resolver un conjunto más grande de problemas el preprocesado necesario para la obtención de los parámetros se vuelve cada vez más importante. Adicionalmente, se debe destacar que cada material tiene un índice de refracción particular, por lo cual se deberá tener un conjunto de señales de entrenamiento y preprocesado adecuado para cada material. Se pudo probar que con una RN simple se puede obtener una muy buena estimación de la frecuencia incluso en presencia de dispersión, logrando valores por debajo de la resolución esperada típica de FD-LCI.

6.4 Estimación de frecuencias a partir de la señal completa

En esta sección se analizaron diversas configuraciones de RNs para estimar la frecuencia de la señal e ir evitando en distintos grados las instancias de preprocesado de la señal original de FD-LCI completa.

La primera diferencia con respecto al caso analizado en la sección 6.3, es que ahora los datos de entrada a la RN serán los datos muestreados de la señal de FD-LCI. De esta manera se evita la elección de qué parámetros seleccionar y a su vez el procesamiento para extraerlos de la señal. En el caso de FD-LCI la señal es detectada utilizando un espectrómetro, donde el detector suele por lo general poseer unos miles de píxeles.

Las características del espectrómetro determinan entre otros parámetros la fre-

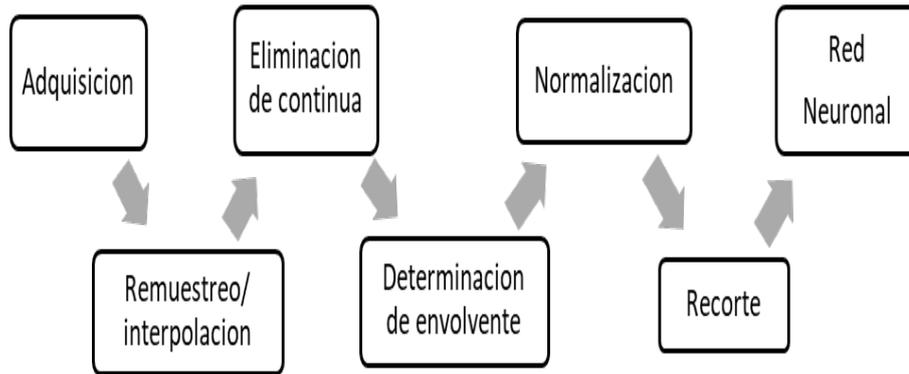


Figure 6.8: Esquema inicial de las etapas de preprocesado de una señal FD-LCI antes de ser introducida a la red neuronal.

cuencia de muestreo y la cantidad de muestras (ventana espacial). Se destaca que de acuerdo con el teorema de Nyquist-Shannon, la frecuencia máxima de la señal está determinada por:

$$f_m \geq 2f_{s_{max}} \quad (6.3)$$

En una primera aproximación y teniendo en cuenta que la estimación de la frecuencia la realizará la red neuronal, no es necesario realizar la transformada de Fourier como en 6.2. Por lo tanto se considera que la señal de entrada a la RN se encuentra preprocesada como indica la Figura 6.8.

Por lo tanto, la señal de FD-LCI a la entrada de la red neuronal queda definida como:

$$i(k) = \cos(kDCO) = \cos(k2z_s) \quad (6.4)$$

Donde z_s es el valor que se desea estimar, como $n = 1$ ya que se piensa en topografías, la DCO es el doble del valor de z_s . Una situación muy similar se encuentra estudiada en mayor profundidad en [107] pero considerando señales

temporales. Los autores luego de probar diferentes diseños de redes proponen uno asombrosamente sencillo capaz de estimar frecuencias, dentro de ciertos rangos. Una de las características más interesantes que se propone en el trabajo, es analizar un rango de frecuencias que estén comprendidas dentro de un orden de magnitud, toma como ejemplo señales entre 1 kHz a 10 kHz tomando 2000 muestras con una $f_m = 1MHz$. Esta selección permite, por un lado, visualizar por lo menos dos oscilaciones completas para la frecuencia más lenta y, por otro lado, muestrear 100 veces la oscilación para la frecuencia más rápida. También amplía el rango de señales para la cual RN ya entrenada puede utilizarse ya que en caso de tener señales en otros rangos de frecuencias hay que cambiar la escala y la relación de la figura de entrada a la red sea la misma. Sin embargo, también es posible entrenar la RN propuesta para estimar rangos de frecuencia mayores. En [107] se utilizó una RN con 2000 elementos en la capa de entrada, 3 capas densamente conectadas de 2, 2 y 3 neuronas cada una y una neurona como capa de salida para obtener un único resultado regresivo como valor de frecuencia. A lo largo de esta sección se trabajó con simulaciones de señales con z_s comprendidas entre 30 a 500 μm (es decir DCO de 60 a 1000 μm) tomando 30.000 o 60.000 o 100.000 valores equiespaciados en ese rango. Se utilizó una ventana espacial de 2000 muestras y una $f_m = 1/k_m = 9.3$ mm, esquema en Figura 6.9. Esto permite que para la frecuencia mínima ($DCO = 60 \mu m$) se observen dos ciclos completos de la señal y que la señal de mayor frecuencia tenga 60 muestras por ciclo ya que $f_{s_{max}} \ll f_m$. Esto permite generar datos de entrada significativos para el aprendizaje de la RN.

Para el entrenamiento de todas las RN presentes en esta sección, a cada conjunto de señales se las separó de modo aleatorio de la siguiente manera: el 72% para

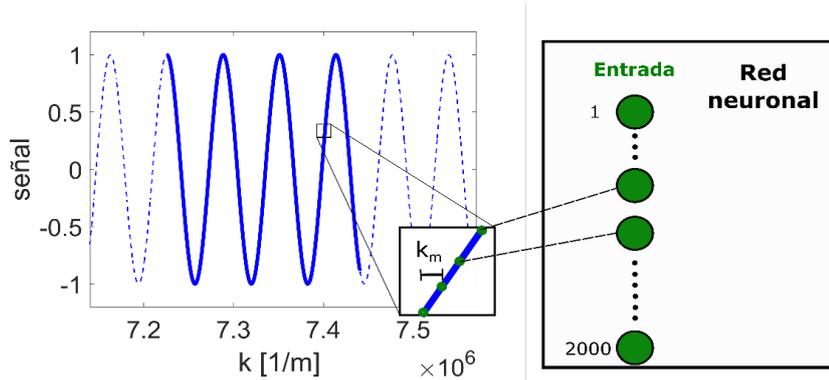


Figure 6.9: Muestreo de la señal a procesar para las diferentes redes neuronales. Los 2000 puntos seleccionados se encuentran separados una distancia k_m y son los valores de entrada a la red neuronal. El ejemplo en este caso es una señal cosenoidal con un z_s de $50 \mu m$.

entrenamiento, el 18% para validación y el 10% restante para testeo. Se utilizó en su mayoría el algoritmo de optimización Adam con un coeficiente de aprendizaje de 0.01 y el gradiente estocástico descendiente con momento (sgdm) se utilizó en dos casos, que se lo detalla explícitamente. De acuerdo a los buenos resultados obtenidos en [107] se decidió diseñar una RN igual, ver Figura 6.10, y probar su funcionamiento para la ecuación 6.4. Se utilizó un conjunto de 100.000 señales, se entrenó para 60 iteraciones del set de datos de entrenamiento (denominado comúnmente como epoch) con la función de entrenamiento *Adam* con coeficiente de entrenamiento inicial de 0.01. Como se puede observar en la Figura 6.11, se obtuvo un $RMSE = 2.3 \mu m$ y un $RSE_{max} = 14.8 \mu m$, el tiempo del entrenamiento demoró 7 minutos y la RN una vez ya entrenada tiene un tiempo de ejecución 2.0 ms para estimar el resultado. La simulación de las 100.000 señales demoró 40 minutos aproximadamente. Este es un muy buen resultado ya que se encuentra para la mayoría de los valores de z_s salvo los que se encuentran en los extremos por debajo de la resolución típica de la técnica de LCI. Este comportamiento suele suceder en los extremos debido a que no existen valores con los que se puedan

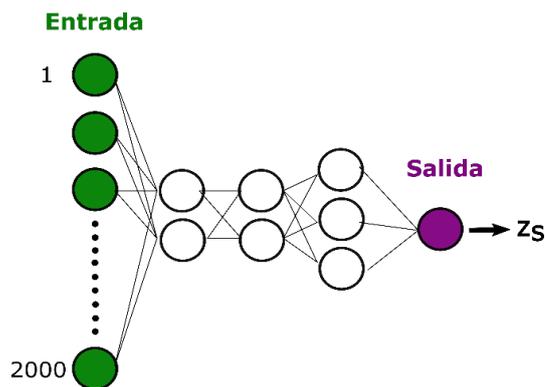


Figure 6.10: Esquema de una red neuronal de tres capas densamente conectadas de 2, 2 y 3 neuronas con salida regresiva.

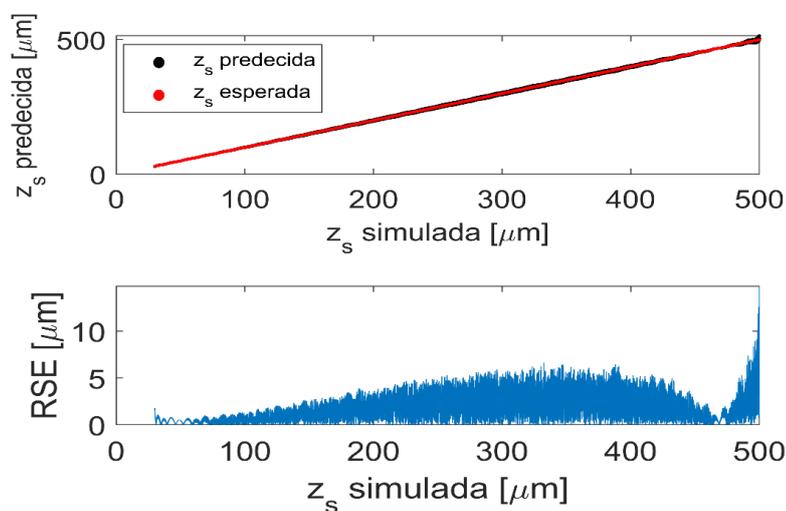


Figure 6.11: Predicción para 100.000 señales $\cos(kOPD)$ para la red 223 para 60 epoch. $RMSE = 2.3 \mu m$ y $RSE_{max} = 14.8 \mu m$.

seguir entrenando a la RN. Se podría solucionar agrandando el rango de valores de z_s para el entrenamiento y luego recortando los extremos. Un detalle que siempre ayuda al entrenamiento de las redes es normalizar los valores para que los outputs estén entre 0 y 1. Simplemente es dividir el valor de los outputs por su máximo y también recordar multiplicar por este mismo a los valores predichos.

Notar que no sirve usar la RN ya entrenada para estimar la frecuencia de otro tipo de señal. Por ejemplo, si se utiliza esta misma RN para predecir los valores de testeo, pero multiplicados por una amplitud de $A = 2$ o $A = 5$ se obtienen $RMSE$

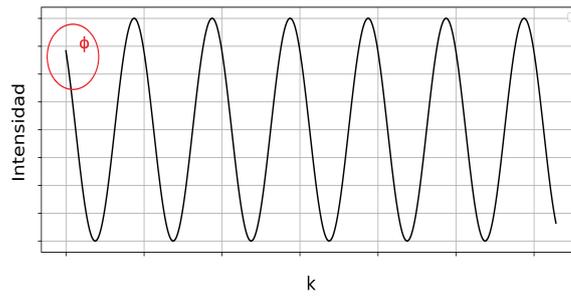


Figure 6.12: Esquema de una señal cosenoidal con la presencia de un desplazamiento debido a la fase extra.

mayores a $100 \mu m$. Es por este motivo que cada conjunto de señales requiere su entrenamiento apropiado. Evidenciando además que la normalización juega un rol importante.

Un problema que se logró identificar es que esta RN no funciona adecuadamente para el caso en que la señal de LCI presenta fase, en la Figura 6.12 se puede observar el gráfico de esta señal y en la ecuación 6.5 su expresión matemática:

$$i(k) = \cos(kDCO + \phi) \quad (6.5)$$

Si las señales están desfasadas por ϕ tanto aleatoriamente como con cierta relación constante entre sí la RN 223 no puede estimar la frecuencia con buena precisión.

El problema de la fase se puede solucionar con un preprocesamiento de la señal. En cuyo caso se utiliza una ventana deslizante con 2000 puntos que se ajusta su posición para que la señal de FD-LCI siempre inicie desde fase cero. En caso de querer evitar este pre-proceado, hay que recurrir a nuevos diseños de RN. Se pueden agregar más capas, más neuronas por capa del tipo densamente

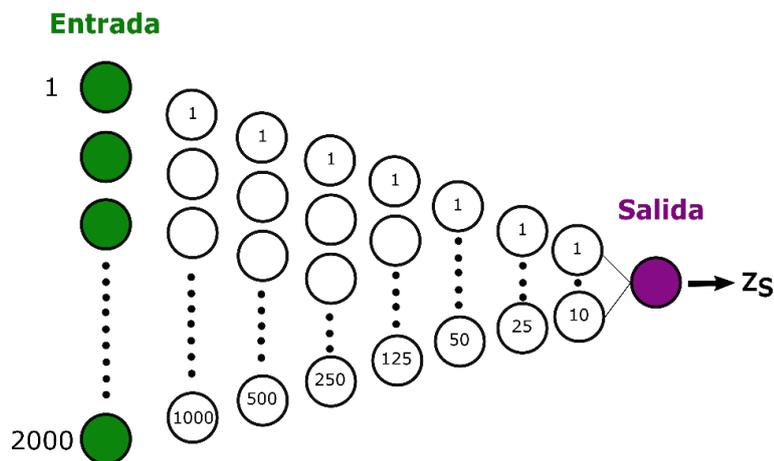


Figure 6.13: Esquema de la red densamente conectada 100-500-250-125-50-25-10.

conectadas [108] y capas de activación. Si bien esto incrementa el tiempo requerido para entrenamiento permite mejorar la precisión de la predicción de la red. Por lo tanto, se fue ampliando la arquitectura de la red hasta obtener una que tuviese buenos resultados. Se diseñó una red densamente conectada FCN de 7 capas con número decreciente de neuronas por capa 1000, 500, 250, 125, 50, 25 y 10. Como se puede observar en la Figura 6.13. Entre cada capa se colocaron funciones de activación del tipo tangente hiperbólica.

Para el entrenamiento de esta RN se usó el conjunto de 100.000 señales, 90 epoch, con función de entrenamiento se utilizó el *sgdm*, una tasa de aprendizaje de 0.1 y una frecuencia de validación de 100. Se obtuvo un $RMSE = 2.2 \mu m$ y $RSE_{MAX} = 16.5 \mu m$. El entrenamiento demoró 27 minutos y el tiempo de ejecución es de 4.8 ms. En la Figura 6.14, se pueden observar los resultados predichos y los valores esperados, claramente hay un gran nivel de coincidencia, además se puede observar que las variaciones más grandes se encuentran en los extremos, es decir para los valores de frecuencia más pequeños y valores de frecuencia más grandes. También se observa la variación del RSE para cada valor proporcionado

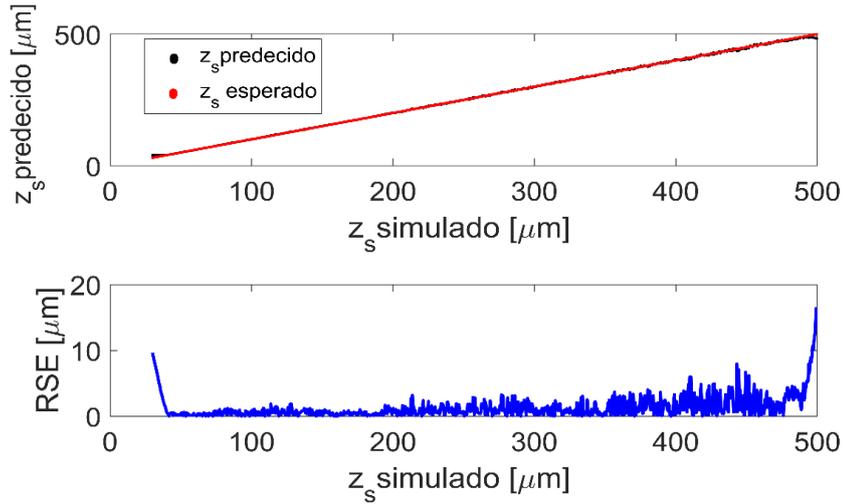


Figure 6.14: Predicción y error una red densamente conectada de 1000-500-250-125-50-25-10 neuronas para un entrenamiento con 100.000 señales del tipo $\cos(kDCO + \phi)$.

por la red. Esta RN ha demostrado poder determinar las frecuencias de las señales de FD-LCI con fase, por lo tanto ya no resulta necesaria la etapa de recorte en el preprocesado de la Figura 6.8 .

Siguiendo en esta línea, sería interesante eliminar la etapa de eliminación de envolvente, la señal antes de ingresar en esta etapa esta descrita por la Ecuación 6.6 donde por lo general $s(k)$ es una función gaussiana, se puede observar su gráfico en la Figura 6.15.

$$i(k) = s(k)\cos(kDCO + \phi) \quad (6.6)$$

Seguir agregando capas y neuronas densamente conectadas no consiguió solucionar el problema de estimar la frecuencia para señales en donde varía la amplitud para distintos valores de k . Por este motivo se utilizaron RNs que tengan capacidades de aprendizaje distintas, Redes Neuronales convolucionales, ver Sección 2.3.1.

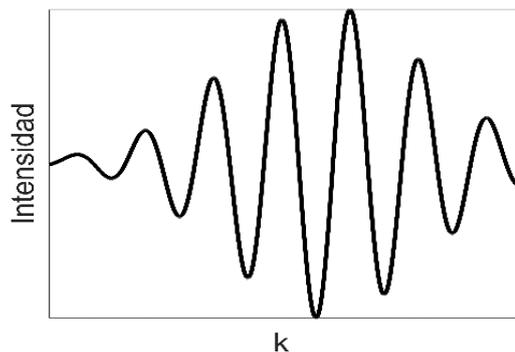


Figure 6.15: Esquema de una señal de FD-LCI sin la componente de baja frecuencia. La cual posee una oscilación cosenoidal con una envolvente de tipo gaussiana.

Se propuso una red conformada por una capa Convolutiva, ver Figura 6.16 y se fueron modificando los hiperparámetros para su funcionamiento óptimo. Se eligieron 10 filtros con una dimensión del kernel de 5x1 ya que es una señal unidimensional. A continuación, se colocó una capa ReLU seguida de una capa MaxPool que extrae el máximo valor dentro de los 5 lugares y se desplaza un *stride* de 5, finalmente dos capas fully-Connected de 10 neuronas para obtener el valor regresivo deseado. Se muestra el código de las capas pensado para Matlab:

```
Input([2000 1 1]);  
  
convolution2dLayer([5 1],10);  
  
reluLayer;  
  
maxPooling2dLayer([5 1], 'Stride', 5);  
  
fullyConnectedLayer(10);  
  
fullyConnectedLayer(10);  
  
fullyConnectedLayer(1);
```

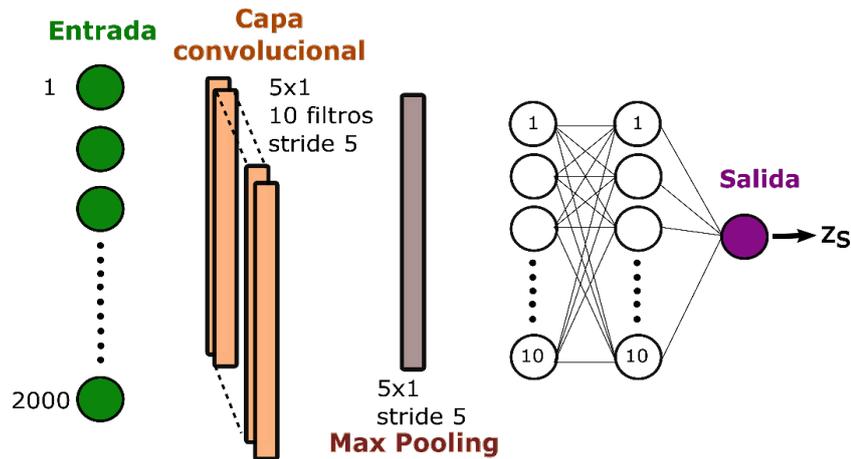


Figure 6.16: Esquema de la red neuronal que contiene una única capa convolucional, seguido de una capa max Pooling y dos capas densamente conectadas de 10 neuronas

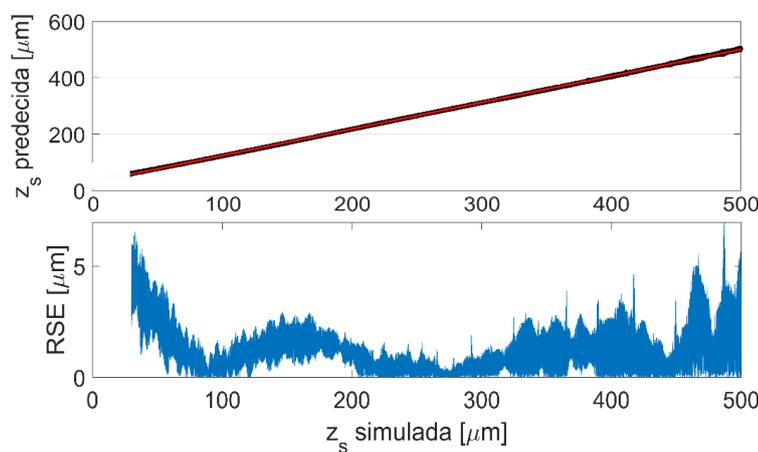


Figure 6.17: Predicciones y error absoluto de la red convolucional para señales oscilatorias con envoltura gaussiana.

regressionLayer

Se entrenó esta RN con 30.000 señales normalizadas descritas en la Figura 6.15 para 60 epoch. Se obtuvo un $RMSE = 2.5 \mu\text{m}$ y un $RME_{max} = 7.5$, un tiempo de entrenamiento de 18 minutos y un tiempo de ejecución de 2.4 ms. En la Figura 6.17 se muestran los valores de frecuencia esperados y los valores de frecuencias simulados y la curva de error estimados para esta RN. Los resultados obtenidos son altamente positivos ya que se encuentran por debajo de la resolución de la técnica de FD-LCI.

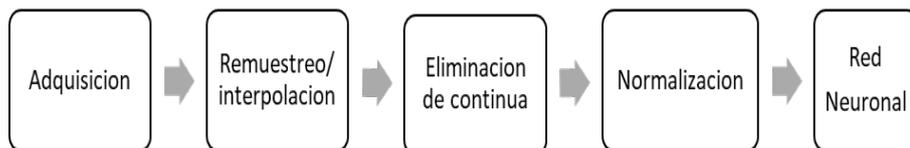


Figure 6.18: Esquema de las etapas de preprocesado, notar que empleando una red neuronal se puede evitar también la etapa de determinación de la envolvente

Bajo estas condiciones se puede acortar el preprocesamiento nuevamente, extrayendo la etapa del cálculo de la envolvente, dejando solo tres bloques de procesamiento que son el remuestreo, la eliminación de continua y la normalización necesaria.

A su vez para poder comparar con los resultados de las FCN anteriormente utilizadas se entrenó esta red convolucional con 30.000 señales de la ecuación 6.5 y 60 epochs. Se obtuvo un $RMSE = 1.5 \mu m$ y $RSE_{MAX} = 6.9 \mu m$. La precisión obtenida es mejor que para la red anterior propuesta y necesita de menos cantidad de señales para su entrenamiento evidenciando su mayor capacidad de aprendizaje. También se probó de entrenar a la red sumándole a estas señales amplitudes aleatorias comprendidas entre 0 y 1, obteniendo un valor de $RMSE = 37 \mu m$. Siempre que las señales no estén normalizadas la precisión de la estimación empeora. Esto nos permite de manera práctica, postular que es mejor que las señales que se utilicen se encuentren normalizadas. La normalización permite obtener una mejor aproximación sobre el mismo modelo de RN.

Por último se busca recrear señales simuladas como la descrita en la Ecuación 6.7, donde se contemplan todas las características típicas de una señal de perfilometría sin procesamiento previo, ver Sección 2.1. Es decir con la presencia de una componente continua A_{DC} y con la envolvente espectral Gaussiana $s(k)$. En las simulaciones, para cada valor de DCO se tomaron valores aleatorios para A_{DC} ,

A y ϕ :

$$i(k) = s(k)(A_{DC} + A\cos(kDCO + \phi)) \quad (6.7)$$

No se obtuvieron buenos resultados al entrenar la red convolucional anterior con este tipo de señales. Ya que no es simplemente agregar un valor continuo A_{DC} , si no que ese valor esta modulado para cada valor de k por $s(k)$. Por lo tanto, se probaron nuevos diseños de RN convolucionales. Se fue variando la cantidad de capas convolucionales, la cantidad de filtros por capa como su tamaño. Se buscaron configuraciones donde el número de filtros aumentaba por cada capa convolucional agregada y otras donde el número de filtros decrecía. Análogamente, se probó con tamaños de los filtros grandes (50x1) en la/s primera/s capas y también con filtros pequeños para todas las capas (5x1, 3x1, etc). También se investigaron diferentes configuraciones de elementos presentes en redes convolucionales Sección 2.3.1, como variar el paso del stride de los filtros y agregar “padding” ya que estos repercuten fuertemente en la dimensión de la salida de cada capa. Además, se agregaron capas de Bathnormalization y diferentes capas de activación después de cada capa convolucional, se fue modificando la cantidad de capas densamente conectadas y su número de neuronas en función de la dimensión de la salida de la última capa convolucional y/o de extracción (max pooling). Vale la pena notar dos cosas: 1) El aumento significativo del tiempo de entrenamiento al tomar más cantidad de capas convolucionales con gran cantidad de filtros y pasos de stride muy pequeños. 2) Como una modificación relativamente sutil en la señal generó grandes modificaciones en la arquitectura de la RN para que cumpla la misma

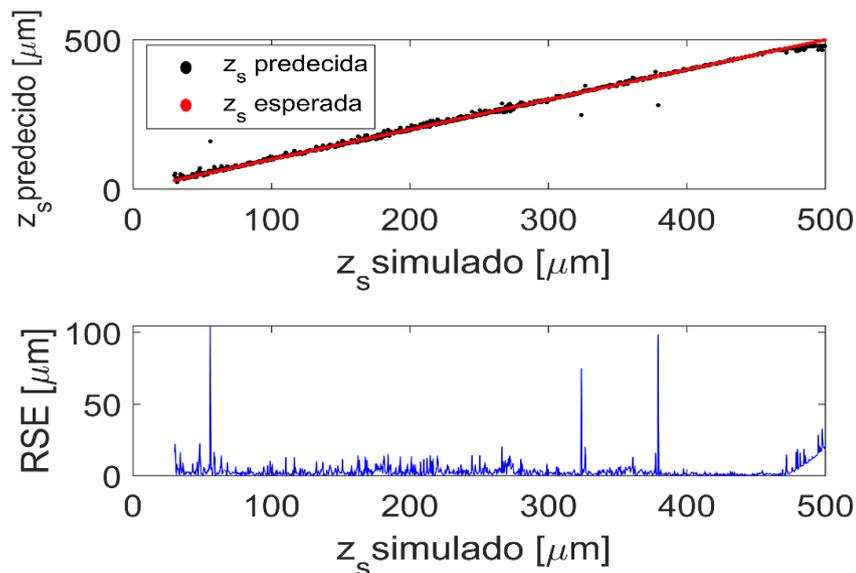


Figure 6.19: Predicciones y error absoluto de la red con 7 capas convolucionales para señales típicas de FD-LCI

función.

El diseño de red que mejor precisión logró fue para una RN de más de 40 capas. Esta configuración posee 7 capas convolucionales donde la cantidad de filtros fue duplicándose, con un tamaño de 2x1 para la primera capa, seguido de 4x1 para las intermedias y de 3x1 para las últimas dos, el paso de stride fue de 2x1 para la primera capa convolucional y de 3x1 para las restantes. Entre capa y capa se tomó la función de activación de tangente hiperbólica, se usó también etapas de batchnormalization y de dropout. Finalmente se colocaron capas densamente conectadas de 5000-5000-1000-1000-500-500-250-64-32-16-8-1. El detalle de todas las capas de esta RN se puede encontrar en el apartado de Apéndice A.1.

Se usó para el entrenamiento un conjunto de 100.000 señales, la función de optimización del sgd y se obtuvo un $RMSE = 3.3 \mu m$ y un $RSE_{max} = 104.4 \mu m$, un tiempo de ejecución de 18.3 ms y un tiempo de entrenamiento de 1218 minutos. Como se puede observar en la Figura 6.19, se obtienen en general valores

muy próximos a los esperados, salvo por 3 valores que se obtienen predicciones con un alto error y nuevamente se observa un incremento continuo del error para el extremo de mayores z_s pero que se encuentran dentro del error aceptable. Si bien la RN tiene un óptimo desempeño para la mayoría de los valores de DCO existe una muy baja probabilidad de predicción del z_s con gran error (3/100000). En general, cuando se realizan una perfilometría con la técnica de FD-LCI, una vez tomadas las mediciones se observa si hay puntos que se encuentran ampliamente fuera de la tendencia de la muestra y de manera aislada, de ser así pueden ser descartados ya que no representan información fiel de la superficie de la muestra. Esto sucedería para el caso de esta RN al predecir uno de los puntos de mayor error. Al tener una gran variación respecto de los valores de su alrededor, pueden no ser tenidos en cuenta para el análisis. Por otro lado, se observa como la red incrementa considerablemente su estructura, como así también los tiempos tanto para entrenamiento como de ejecución. En especial el tiempo de ejecución aumenta un orden de magnitud haciendo que pierda sentido reemplazar la etapa de preprocesado de eliminación de continua por esta RN. Se buscó aumentar la información (data augmentation) espejando las señales y/o se tomaron hasta 500.000 señales con diferentes DCO, pero esto no sirvió para corregir esas pequeñas estimaciones con alto grado de error.

En la Tabla 6.2 se recopilaron los datos de las distintas señales analizadas en esta Sección, considerando la cantidad de señales utilizadas para el entrenamiento, el diseño de las diversas redes, la precisión y los tiempos tanto de entrenamiento como de ejecución para poder evaluar y comparar de una manera rápida su desempeño. En general dada un diseño de RN establecido una manera de aumentar

la precisión es incrementando el número de señales con las que se entrena y también aumentando el número de epochs. Esto obviamente posee un límite que está dado por la capacidad de aprendizaje. Si se duplica la cantidad de epochs el tiempo de entrenamiento también se duplica mientras que si se duplica la cantidad de señales el tiempo de entrenamiento crece menos que el doble.

Para estimar la frecuencia de señales oscilante simples la mejor opción es usar una FCN 2-2-3 ya que se puede obtener una muy buena precisión con pocos minutos de entrenamiento y el tiempo de ejecución es el más bajo respecto a las otras redes. Si la señal a analizar tiene mayor grado de complejidad (presencia de desfase, señal continua, variación en la amplitud) conviene utilizar redes convolucionales ya que debido a su gran capacidad de aprendizaje requiere de menor cantidad de señales, epochs y tiempo para su entrenamiento, logrando una alta precisión y con bajo tiempo de ejecución. En particular para analizar las señales de FD-LCI lo mejor es implementar la opción híbrida entre redes neuronales y preprocesado que se observa en la Figura 6.18 ya que se logra una precisión por debajo del error característico de LCI y se reduce el tiempo de cómputo.

Señal	Señales	Epoch	Red Neuronal	RMSE [μm]	RSE_{max} [μm]	T. entren. [min]	T. ejec. [ms]
$\cos(kDCO)$	100,000	60	FCN 2-2-3	2.3	14.8	7	2.0
$\cos(kDCO + \phi)$	100,000	90	FCN 100-500-250-125-	2.2	16.5	27	4.8
$\cos(kDCO + \phi)$	30,000	60	Cnv-Rel-MP-FCN 10-10	1.5	6.9	18	2.3
$s(k) \cos(kDCO + \phi)$	30,000	60	Cnv-Rel-MP-FCN 10-10	2.5	7.5	18	2.4
$s(k)[A_{DC} + A \cos(kDCO + \phi)]$	100,000	60	7 Cnv	6.3	104.3	1218	18.4

Table 6.2: Resumen de los resultados de las redes neuronales implementadas. Se evidencian los tiempos de entrenamiento (T. entren) como los tiempos de ejecución (T. ejec).

6.5 Conclusiones

En este capítulo se estudió el uso de diferentes diseños de RN para estimar frecuencias de distintos tipos de señales oscilantes analizando su precisión y tiempos característicos, tanto de entrenamiento como de ejecución. Se mostró que el uso de redes neuronales del tipo densamente conectadas como convolucionales son una alternativa interesante para reducir el preprocesado necesario y reemplazar el uso de la transformada de Fourier para calcular la información de interés en la técnica de FD-LCI.

Se concluyó que la mejor opción para estimar la DCO de una señal de FD-LCI es mantener las etapas de preprocesado de eliminación de continua y normalización, Figura 6.18 , y usar una red neuronal con una capa convolucional. Comparando este esquema con el de la Figura 6.2 y teniendo en cuenta los tiempos de ejecución de las la Tabla 6.1 y la Tabla 6.2, se observa que teniendo ya entrenada la red neuronal se puede estimar la frecuencia de una señal de aproximadamente 2 ms más rápido. En caso de otras aplicaciones donde, la señal oscilatoria sea más sencilla (como senos o cosenos) usar redes densamente conectadas es una muy buena opción.

Los resultados obtenidos en esta sección se basan entorno a señales de interferencia de baja coherencia, pero fácilmente se pueden implementar para otro ámbito donde se desea analizar la frecuencia de señales similares o inclusive tomar la estructura de las redes neuronales propuestas y modificarlas para optimizar su rendimiento en la aplicación deseada.

Algunas de las ideas a seguir trabajando en el futuro son: continuar trabajando

en el diseño de RN para que permitan estimar señales que posean más de una frecuencia presente. Esto permitirá extender el uso del aprendizaje profundo (deep learning) para un gran número de nuevas aplicaciones, puntualmente dentro de la interferencia de baja coherencia permitirá realizar tomografías ya que se podrá identificar información de las interfases dentro de material. Además, gracias al entrenamiento que requiere la red es altamente probable que se pueda extraer la etapa de remuestreo/interpolación, que es muy importante en caso de realizar la fft pero no si se desea usar un red neuronal, permitiendo reducir aún más los tiempos de estimación de frecuencia. Por último, nos gustaría explotar la característica de personalización de las redes neuronales entrenando a la RN con señales propias de los instrumentos experimentales.

”¿Podríamos promover el desarrollo de tecnologías tan eficientes, accesibles y ubicuas como las que ya tenemos, pero no alienantes? Algo así como TECNOLOGÍAS ENTRAÑABLES, que no sólo pudiéramos incorporarlas a nuestra vida cotidiana, sino que además pudiéramos entenderlas, apropiarnos de ellas, mantener su control e incluso participar en su diseño.” [129]

Miguel Angel Quintanilla

7

Detectores para FD-LCI usando cavidades Fabry Perot

En este capítulo se realiza un estudio teórico de la propagación de haces gaussianos en cavidades Fabry Perot (FP), con sus correspondientes simulaciones, con el objetivo de generar nuevos detectores para la técnica de FD-LCI que puedan reemplazar al espectrómetro [130]. Si bien ya existe un vínculo entre las cavidades FP y FD-LCI a través las fuentes de luz llamadas de barrido (SS-LCI) [76], las propuestas aquí presentadas se enfocan en utilizar esta cavidad para la detección y no para la iluminación. Modificando controladamente las características de la cavidad es posible separar, seleccionar y/o sintonizar distintas longitudes de onda

y medir su intensidad tanto axialmente (sobre el eje óptico) [131] como radialmente (perpendicular al eje óptico) [132] mediante fotodiodos o arrays 2D.

Tomando los conceptos introducidos en la sección 2.2.2, se realiza un análisis detallado de la propagación de haces gaussianos y como sus múltiples reflexiones dentro de cavidades FP con diferentes características interfieren a su salida. Teniendo todo este estudio en cuenta se diseñan y presentan dos formas de detección de la técnica de FD-LCI utilizando cavidades FP para rangos espectrales centrados en 850 nm y anchos de 60 nm, valores típicos de los diodos superluminicentes ampliamente usados en esta técnica, y de resoluciones por debajo del nanómetro, típico de los espectrómetros.

7.1 Propagación de haces Gaussianos en cavidades Fabry Perot

Se realizaron simulaciones en Python de ondas electromagnéticas propagándose como haces Gaussianos a través de una cavidad FP para diferentes intensidades de cada longitud de onda λ y así conseguir representar la señal de interferencia típica de FD-LCI.

7.1.1 Haces Gaussianos

La fuente de luz se modeló como un haz gaussiano complejo Ψ , ver Ecuación 2.20 cuyo campo eléctrico se propaga en la dirección z . En la Figura 7.1, se pueden observar los valores característicos de la cintura $w(z)$ y de su radio de curvatura

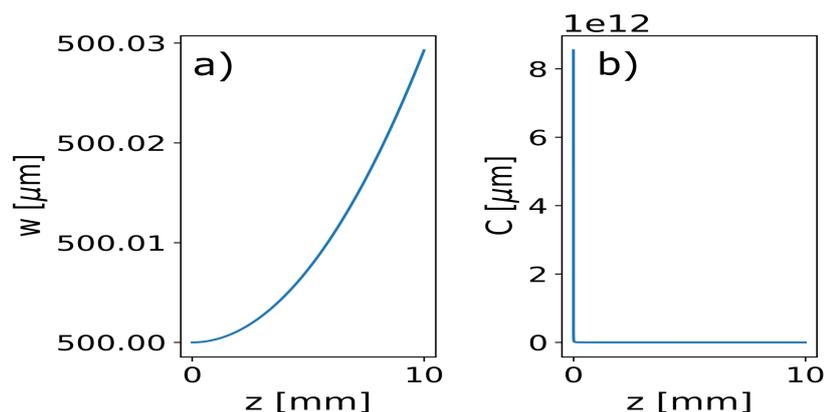


Figure 7.1: Se simularon los valores de a) la cintura y b) el radio de curvatura en función de la distancia de propagación z para una cintura en el foco de $500 \mu m$ y una longitud de onda de $850 nm$

$C(z)$ a medida que el haz se propaga para una longitud de onda de $850 nm$. Se eligió un valor de cintura en el foco de $w_0 = 500 \mu m$, ya que para valores de w_0 mas pequeños la variación de la cintura se hace más notoria, 2.21. El valor elegido es típico en las fuentes colimadas y/o salidas de fibras comúnmente utilizadas en estas técnicas y además permite que el haz se propague grandes distancias sin variaciones considerables.

Fase de Gouy

Esta subsección se dedica a comprender con mas detalle la fase de Gouy (ϕ_G) [133]. Si bien debido a los rangos en que se trabajan para los diseños de los detectores propuestos al final de este capítulo puede ser considerado constante, es un termino que llama la atención y que no siempre es tenido en cuenta. Así que se realizó cierta profundización sobre él. El termino de Gouy que se obtiene de proponer una solución a la ecuación de onda donde la propagación de la luz no este uniformemente distribuida y a su vez se encuentre concentrada cerca del

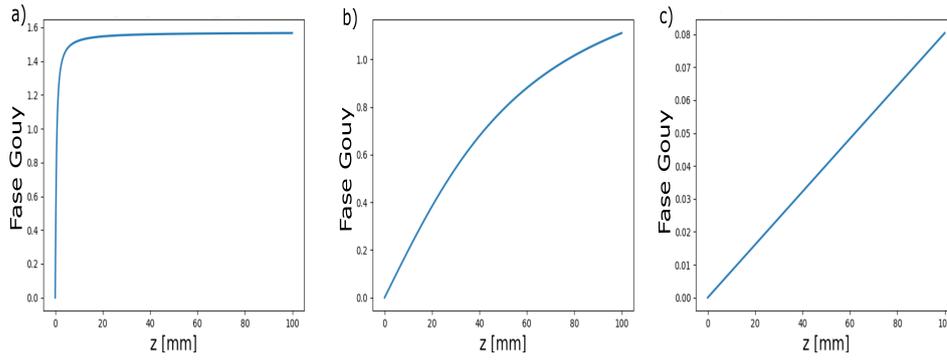


Figure 7.2: Simulaciones de la Fase de Gouy en función de la propagación a través de 10 cm para a) $w_0 = 10 \mu m$, b) $w_0 = 100 \mu m$ y para c) $w_0 = 500 \mu m$

eje de propagación [82]. Por lo tanto se propone una función del tipo gaussiana compleja y con las imposiciones de la Ecuación de Onda para la amplitud y los argumentos se obtiene el termino de la Fase de Gouy:

$$\phi_G = \arctan\left(\frac{\lambda z}{\pi w_0^2}\right) \quad (7.1)$$

ϕ_G solo depende la longitud de onda, de la posición en z y de la cintura del haz en su foco w_0 . No tiene dependencia radial, es decir con x e y . Por lo que no afectará de ninguna manera al detector Radial, ver sección 7.2.2.

En la Figura 7.2 se grafican los valores que toma ϕ_G para haces de $\lambda = 632.8$ nm con cinturas de $10 \mu m$, $100 \mu m$ y $500 \mu m$ para propagaciones en la dirección de z a lo largo de 10 cm. Notar que la función $\arctan(z)$ para z mayores a 0 esta siempre acotada entre 0 y $\pi/2$, el resto de las variables influyen generando un coeficiente proporcional a z ($\lambda/\pi w_0^2$) que evidencian o ocultan su comportamiento mas notoriamente con z . A medida que se agranda w_0 la variación en z de la fase de Gouy se hace menos notoria. Para cinturas de algunas micrómetros, la variación en la fase se da para z pequeños y luego permanece prácticamente constante como $\pi/2$.

Para cinturas de algunas decenas de micrómetros hay que tener especial cuidado, ya que el valor de la fase es apreciable y se mantiene para todo el trayecto de propagación de 10 cm. Finalmente para cinturas de centenas de micrómetros el retardo es tan grande que el valor de la fase varia muy poco y es prácticamente nula. Por este ultimo motivo no afecta al método propuesta para la detección en Axial, ver sección 7.2.1.

7.1.2 Cavidad Fabry Perot

La intensidad a la salida de la cavidad, o también denominada por sus siglas en ingles función de transferencia de intensidad (ITF) se puede calcular como el módulo cuadrado de la sumatoria de todas las ondas reflejadas con su correspondiente amplitud:

$$I_{ITF} = \left| \sum_j T_1 T_1' T_2 T_2' (G_1 R_1 G_2 R_2)^j \Psi_j(r, z + j2d, \lambda) \right|^2 \quad (7.2)$$

Donde T_1, T_1', T_2 y T_2' son los coeficientes de transmisión en las distintas interfaces y d el ancho de la cavidad. Los coeficientes G_1 y G_2 hacen referencia al posible desfase debido a la geometría de las interfaces de la cavidad, en particular si son espejos cóncavos con distancia focal f el coeficiente vale $e^{-i\frac{kr^2}{2f}}$. Las reflexiones en las caras externas de los espejos fueron despreciadas. Se consideró por simplicidad y relevancia trabajar para el modo fundamental de la resonancia que puede ser modelado por una gaussiana [134]. La fineza (F) y el FSR determinarán la resolución espectral $\delta\lambda$, que es la distancia mínima en longitudes de onda a la cual los picos se superponen a altura mitad. En la Figura 7.3.a), se muestra la ITF de

una cavidad FP con d variable, coeficientes de reflectividad de 0.94 que generan una $F = 50$, se ilumina con un haz gaussiano de $w_0 = 500 \mu m$ y $\lambda = 850 nm$. Cada vez que d se incrementa en $\lambda/2$ se observa un nuevo orden de resonancia en $x = y = 0$ y para todo valor de z . Mientras que en la Figura 7.3.b) se muestra el perfil de intensidad radial, conocido también como anillos de interferencia, del mismo haz de iluminación para el plano $z = 1 cm$, un $d = 4.51 \mu m$ y una de la caras cóncavas con $f = 25 cm$. Las distancias radiales de las resonancias no se encuentran equiespaciadas, ya que la relación es angular y su intensidad decrece para radios mayores. Para la misma longitud de onda se pueden encontrar nuevas resonancias (u ordenes) para radios mayores formándose así los anillos d interferencia, esto sucede cuando la fase acumulada debido a la propagación de la onda se incrementa en $\lambda/2$. Si d es estrictamente un múltiplo de la longitud de onda uno de las resonancias estaría en el centro de los anillos, es decir que el pixel central en la detección Radial estaría actuando como el fotodiodo de la detección Axial, ver sección 7.2.1.

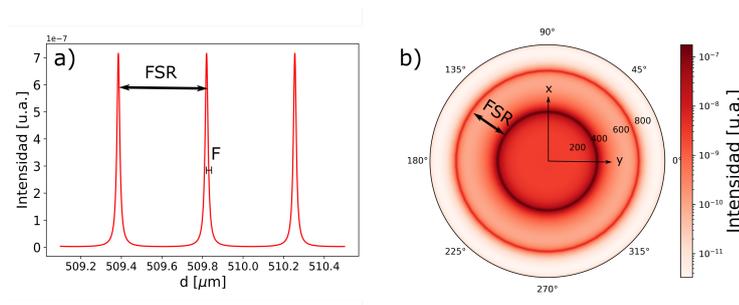


Figure 7.3: a) Intensidad de la función de transferencia en el eje axial al variar el ancho de la cavidad d para una única longitud de onda de $\lambda = 850 nm$. b) Intensidad de la función de transferencia para un d y z fijo para distintos radios en micrómetros para $\lambda = 850 nm$.

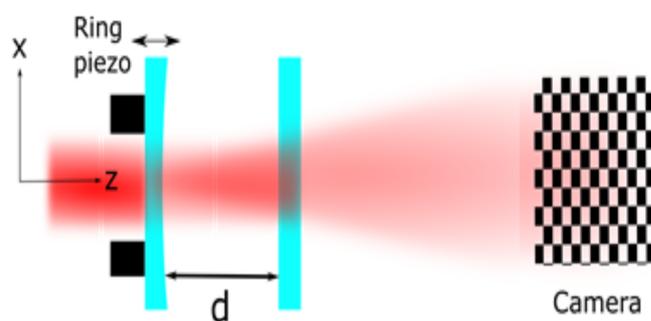


Figure 7.4: Diseño experimental de una cavidad FP plano-cóncava iluminada con un He-ne de 632.8 nm

Medición en cavidad FP

Para conocer más sobre el funcionamiento de las cavidades FP se montó una cavidad con los elementos disponibles en el laboratorio. Se enfrentaron un espejo plano y otro cóncavo de distancia focal $f = 5 \text{ cm}$, ambos de 4.75 mm de diámetro y reflectividades mayores a 0.94 y se los separó $500 \mu\text{m}$ aproximadamente. Sobre el primer espejo se adhirió un actuador piezoeléctrico en forma de anillo para controlar con precisión nanométrica la separación entre los espejos. El diseño del actuador en forma de anillo permite iluminar el centro de la cavidad FP con un laser de He-Ne de 632.8 nm. A la salida de la cavidad se colocó una cámara Thorlabs DCC1645C a 10 cm para detectar la intensidad.

En la Figura 7.5, se muestra una simulación para una cavidad plano-cóncava y una medición experimental. Los parámetros utilizados fueron $w_0 = 500 \mu\text{m}$, $d = 506.24 \mu\text{m}$, $\lambda = 632.8 \text{ nm}$, $z = 10$ y $R_{1,2} = 0.94$ y $f = 4 \text{ cm}$. La coincidencia entre la simulación y la medición es apreciable. No se obtiene exactamente el mismo patrón debido que hay ciertas variables del diseño experimental que no se pudieron medir con mayor precisión, como por ejemplo la divergencia y modo

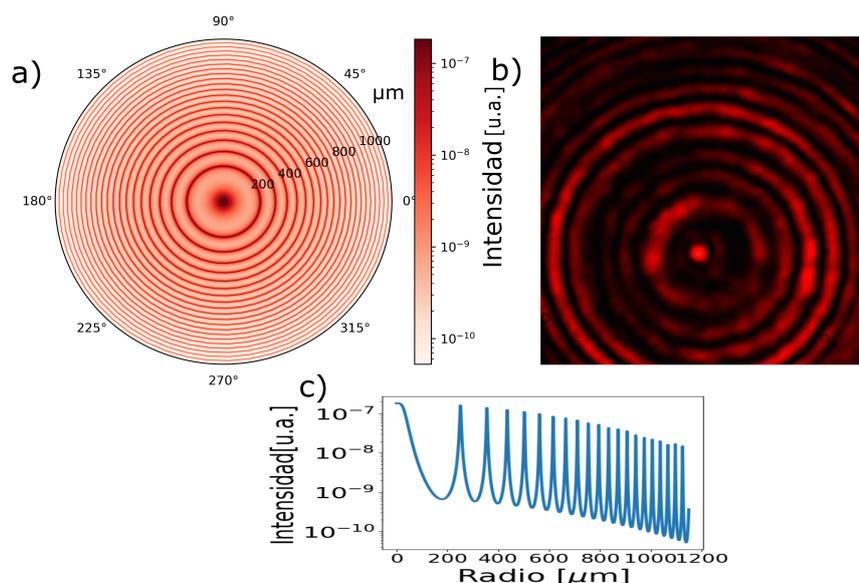


Figure 7.5: Patrón de anillos para una cavidad de $500 \mu\text{m}$ plano-cóncava con haces gaussianos con cintura de $500 \mu\text{m}$ obtenida mediante una a) simulación y b) medición experimental para parámetros iguales y a escala. c) Perfil de la simulación.

fundamental de la fuente

Esta experiencia permitió validar el modelo programado de simulación de propagación de haces gaussianos dentro de cavidades FP [132]. Demostró la viabilidad de utilizar piezoeléctricos en forma de anillos para controlar cavidades FP medianas, es decir de cinturas y separaciones del orden de las centenas de micrómetros. Se pudieron realizar mediciones similares a las simuladas en la Figura 7.3.

Resonancias en cavidades FP con Fase de Gouy

Teniendo en cuenta lo visto en la sección 7.1.1 sobre la Fase de Gouy, se estudió el caso particular en el que este fenómeno puede afectar la resonancia de una cavidad FP. Como se puede observar en el gráfico b) de la Figura 7.2, hay ciertas situaciones donde la fase de Gouy varía considerablemente para distintos z . Para la situación en donde el detector es colocado cerca de la salida de la cavidad (z

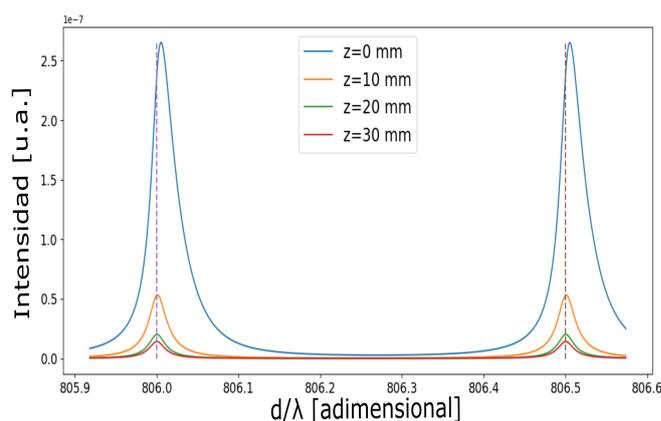


Figure 7.6: Gráfico de la ITF de una cavidad FP al incidir con 850 nm para diferentes valores de z al ir variando el ancho de la cavidad d . Esta normalizado por la longitud de onda incidente para identificar que para z pequeños la posición de la resonancia se desplaza.

pequeños) y a su vez d es bastante menor que la zona donde la Fase de Gouy varia considerablemente. Puede suceder que cada reflexión acumule un valor diferente de Fase de Gouy, haciendo que la variación de fase total de la onda a la salida (Ψ_j) no sea solo $j2d$ si no también se suma una variación de $\arctan\left(\frac{\lambda(z+j2d)}{\pi w_0^2}\right)$. Esto puede generar una suma total de las ondas superpuestas diferentes, haciendo que se modifique la forma clásica de la resonancia de la ITF. Notar que para cada frente de onda el valor que agrega la Fase de Gouy es constante, es decir que no depende de x e y . En la Figura 7.6 se muestra una simulación de la ITF de una cavidad FP al ir variando el ancho de la cavidad para $\lambda = 850$ nm, $R_{1,2} = 0.94$, $w_0 = 30$ μm para diferentes posiciones de z 0, 10, 20 y 30 mm. La abscisa se dividió por λ para identificar rápidamente los lugares donde se suele observar la resonancia en cavidades FP. Se observa que para z pequeños (0 y 10 mm) la posición de la resonancia se desplaza hacia z mayores respecto de la esperada, mientras que para z grandes (30 mm y 40 mm) coincide con múltiplos de $\lambda/2$. Esto se debe a la variación en la Fase de Gouy en cada una de las reflexiones.

Para identificar mas fácilmente para que condiciones de z , w_0 y d este fenómeno puede ser observado se definió un criterio. Para esto es necesario calcular un Z_{gouy} el cual es el valor de distancia de z para el cual:

$$\arctan\left(\frac{\lambda Z_{gouy}}{\pi w_0^2}\right) = \frac{\pi}{3} \quad (7.3)$$

Se toma $\pi/3$ ya que el arcotangente tiene como asíntota $\pi/2$ y en el tramo final posee poca variación. Por ende:

$$Z_{gouy} = \frac{1.73 * \pi w_0^2}{\lambda} \quad (7.4)$$

En la Figura 7.7 se muestra un esquema del criterio de cuando la Fase de Gouy puede afectar al corrimiento de la resonancia. El valor que toma la fase de Gouy para cada reflexión dentro de la cavidad FP es apreciablemente diferente.

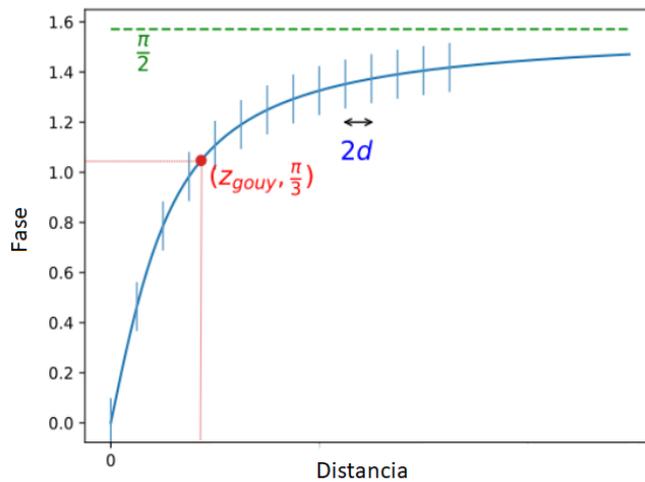


Figure 7.7: Esquema del criterio elegido para determinar cuando la Fase de Gouy puede afectar la resonancia en un cavidad Fabry Perot.

Este es un resultado interesante del análisis que ya había sido observado en

bibliografía [135] y abre posibles líneas de estudio a futuro . En particular puede resultar interesante profundizar en el hecho de que en el corrimiento de la posición del pico esta codificada información de la distancia a la cual estoy observando. Por lo tanto podría usarse este fenómeno para identificar con alta precisión a que distancia de la cavidad FP se colocó el detector o inclusive usar este comportamiento para identificar microdeformaciones de materiales que conformen la cavidad. También, como este comportamiento es muy sensible con la DCO presente en la cavidad puede servir para analizar variaciones del índice de refracción del medio que la conforma. Por ultimo, hay estudios donde se utilizan ideas asociadas a la fase de Gouy para identificar la posición y características volumétricas de nanopartículas [136]

7.2 Nuevos Detectores para FD-LCI

En esta sección se presenta el diseño, con sus correspondientes simulaciones, de dos formas de detección de la técnica de FD-LCI utilizando cavidades FP. Se contemplan diseños para rangos espectrales centrados en 850 nm y anchos de 60 nm, valores típicos de los diodos superluminicentes ampliamente usados en esta técnica, y de resoluciones por debajo del nanómetro, típico de los espectrómetros. La primera de las formas de detección propuestas es una cavidad de ancho variable donde la intensidad asociada a la longitud resonante sobre el eje axial es detectada con un fotodiodo, la denominaremos a esta modalidad “Axial”. La segunda es una cavidad de ancho fija donde la propagación radial genera diferentes intensidades espacialmente distribuidas para las diferentes longitudes de onda y la intensidad

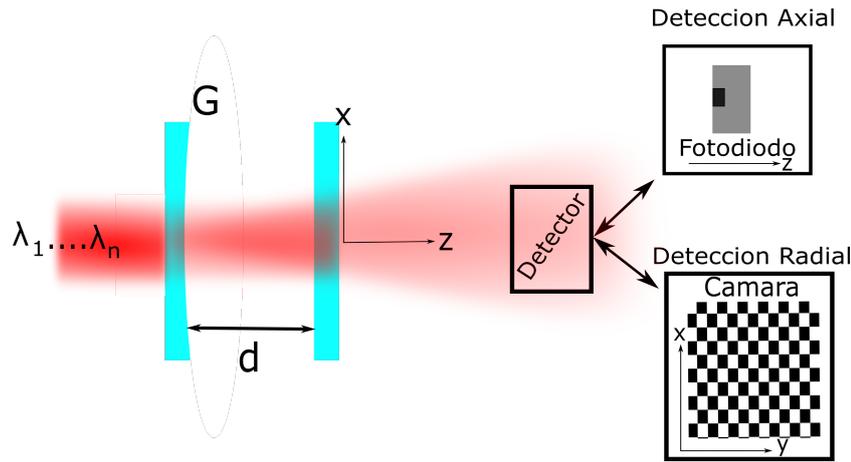


Figure 7.8: Esquema de los dos métodos de detección propuestas axial y radial.

es detectada con un arreglo lineal o cámara. Denominaremos a esta modalidad “Radial”.

Se realizaron simulaciones en Python considerando que la iluminación estaba compuesta por haces gaussianos, según Ecuación 2.20, de varias longitudes de onda y con diferentes amplitudes, se variaron los anchos de la cavidad d , coeficientes de reflexión, las longitudes de onda, las curvaturas de los espejos, la distancia del detector a la cavidad y la cintura inicial del haz. Se calculó la ITF para cada longitud de onda según la Ecuación 7.2 para entender el comportamiento espectral de la cavidad en su totalidad. La cantidad de reflexiones simuladas se eligió como el doble del valor de la fineza[134]. Se buscó optimizar el diseño de la cavidad, tanto para la detección Axial como Radial, para obtener FSR del orden de 60 nm centradas en 850 nm y $\delta\lambda$ menores a un nanómetro que son parámetros similares a los de un espectrómetro usado convencionalmente para la técnica de FD-LCI.

En la simulación de la detección axial para cada longitud de onda se itera para todo el rango de valores permitidos de d , se calcula su ITF para $x = y = 0$ y se vuelve a repetir para la longitud de onda siguiente hasta completar todo el

rango espectral deseado. Mientras que para la simulación de la detección Radial, d toma un valor fijo y se calcula la ITF de cada longitud de onda para un z fijo y para todos los x e y . En la Figura 7.8 se puede observar un esquema de los dos métodos de detección propuestos. Para la detección Axial la cavidad varia su d y el detector es un fotodiodo. Para la detección Radial d esta fijo y el detector es una cámara. Siempre y cuando la tecnología asociada a la fabricación y desplazamiento de la cavidad lo permita, es posible montar un único diseño experimental en donde ambas detecciones puedan ser utilizadas. Los diseños propuestos en este trabajo apuntan en esta dirección. Habiendo encontrado los parámetros óptimos para las cavidades, se simularon las ITF iluminando las cavidades con una señal de FD-LCI característica, como la que se observa en la Figura 7.9. Se tomaron pasos de λ de 0.2 nm y cada una fue representada con un color distinto, la señal obtenida por los detectores es estrictamente la suma de todas ellas, pero se la muestra por separado para observar con mas detalle la capacidad de resolución espectral de los detectores. La señal posee significativas variaciones en la intensidad para cada longitud de onda, en especial la frecuencia en la oscilación está asociada a la DCO que es la información que se desea obtener. Se tomó una $DCO = 200 \mu\text{m}$ para las simulaciones.

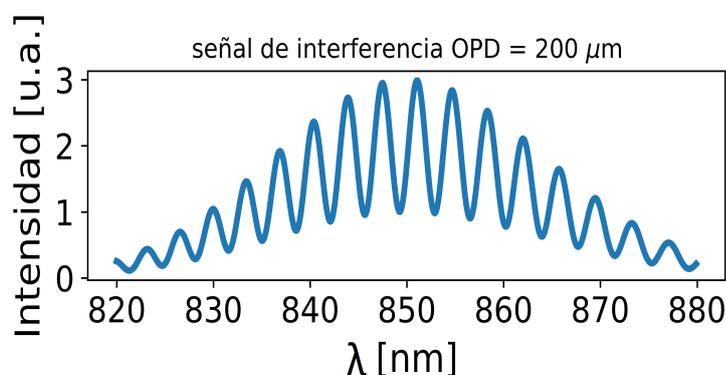


Figure 7.9: Señal de interferencia de baja coherencia para un DCO de 200 μm con una fuente de luz con gaussiana centrada en 850 nm y un ancho espectral de 60 nm.

7.2.1 Detector Axial

Se calculó la ITF para la detección Axial al iluminar el detector con la señal de interferencia de la Figura 7.9 , variando el ancho de la cavidad d de $4.50 \mu m$ a $4.85 \mu m$ con pasos de $1.5 nm$, para $R_{1,2} = 0.98$ y se obtuvo la señal de la Figura 7.10 . Notar que dentro de este rango de trabajo cada λ , representada con un color distinto, entra en resonancia para un único valor de d y el valor de su máximo depende de la intensidad incidente de la señal de interferencia, sumado que el ancho de cada resonancia es lo suficientemente angosta como para diferenciar las diferentes longitudes de onda. Por lo tanto, la ITF tiene un comportamiento oscilatorio similar a la señal de interferencia de la Figura 7.9 y, con su correspondiente calibración, se puede calcular su frecuencia que es la información deseada para la técnica de FD-LCI.

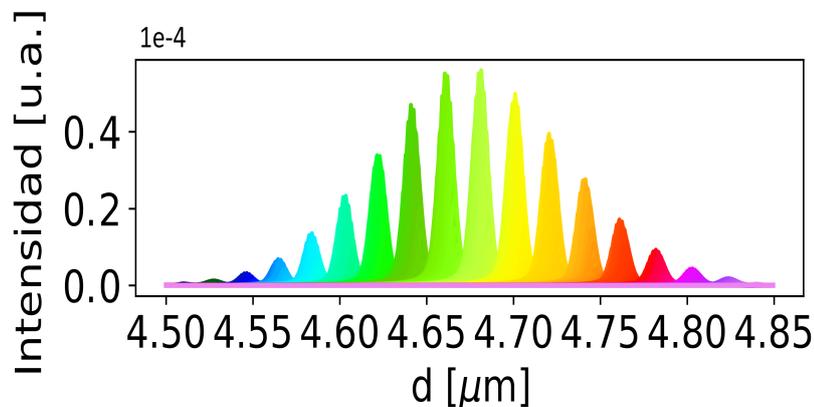


Figure 7.10: Función de transferencia de la intensidad de cada longitud de onda del detector axial al iluminar con una señal de interferencia de baja coherencia con una diferencia de camino óptico de $200 \mu m$.

Un parámetro clave en este detector es el ancho de la cavidad. Esta tiene que ser lo suficientemente pequeña para conseguir FSR grandes y tiene que variar dentro de ese rango sin excederse para evitar detectar otros ordenes de las mis-

mas longitudes de onda, como los que se observan en la 7.3 . Con este diseño de cavidad se obtiene un $\delta\lambda = 0.9$ nm. Si bien existen cavidades FP comerciales en estos rangos, puede resultar interesante probar de utilizar espejos pequeños y controladores piezoeléctricos en forma de anillo. Si bien la intensidad a la salida decae prácticamente 5 ordenes respecto a la señal de interferencia incidente, existen fotodiodos lo suficientemente sensibles como para detectarlo sin grandes inconvenientes. Notar que el sistema requiere una calibración para saber que ancho de cavidad corresponde a cada longitud de onda.

7.2.2 Detector Radial

La detección Radial se basa en aprovechar que la información espectral está distribuida espacialmente a lo largo de x e y , cada longitud de onda tiene la condición de resonancia para diferentes radios, por lo que para detectar la intensidad de luz se utiliza una cámara y a su vez no es necesario ningún tipo de movimiento de la cavidad. La intensidad de cada longitud de onda tiene simetría de rotación generando anillos concéntricos con diferentes radios para un plano de z constante con una intensidad proporcional a la incidente.

La Figura 7.11 muestra la ITF del detector Radial para cada longitud de onda correspondiente a la línea del eje $x = 0$ y el eje y entre los $620 \mu m$ a $900 \mu m$ con pasos de 10 nm al iluminar con una señal de interferencia de baja coherencia con una DCO de $200 \mu m$. Para una cavidad de $f = 25$ cm, $R_{1,2} = 0.98$, $d = 4.51 \mu m$ y colocando la cámara a $z = 1$ cm. Con este diseño se obtiene un $\delta\lambda = 0.8$ nm. Se observa un perfil de intensidades con una gran similitud a la Figura 7.9. El recorte

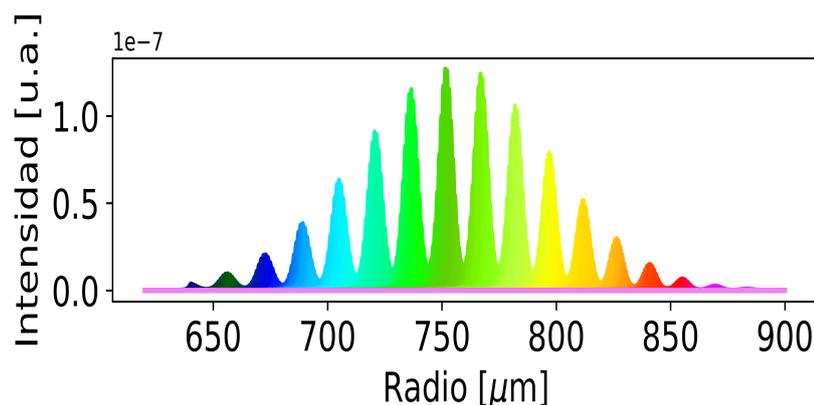


Figure 7.11: Función de transferencia de la intensidad de cada longitud de onda del detector Radial para el eje $x = 0$ y para el eje y entre los $600 \mu m$ a $900 \mu m$ al iluminar con una señal de interferencia de baja coherencia con una diferencia de camino óptico de $200 \mu m$.

en el eje y es necesario ya que si no se observan los otros ordenes de resonancia. Se eligió el segundo orden ya que, si bien la intensidad es menor que respecto al primer orden, la distribución espacial de las longitudes de onda es más homogénea. El ancho de la cavidad continúa determinando el FSR, lo interesante es que con los parámetros G y w_0 se puede modificar la figura de los anillos. Permitiendo aumentar o achicar el patrón de la Figura 7.11 pero manteniendo el FSR y la resolución espectral. Resultando interesante al momento de decidir el tamaño y cantidad de pixel de la cámara de detección. La concavidad de los espejos es de vital importancia para poder observar los anillos para cinturas de haz medianas, es decir de centenas de micrómetros como las aquí empleadas. Si se usan cinturas más pequeñas no es necesario usar espejos cóncavos. La intensidad decae cerca de 7 ordenes respecto a la señal de interferencia incidente, pero la simetría angular presente en este sistema permite integrar los valores para radios constantes. Notar que el sistema requiere una posterior calibración para saber que radio corresponde a cada longitud de onda y selección especial de las posiciones espaciales a detectar.

7.3 Conclusiones y perspectivas

El trabajo desarrollado en este capítulo permitió ganar herramientas y experiencias en el modelado de un haz de luz propagándose en el espacio. Como así también comprender en profundidad el proceso de interferencia que sucede en cavidades resonantes del tipo Fabry Perot. El gran contenido de base teórica y de simulaciones necesaria para este trabajo permitió continuar con tareas desafiantes y novedosas a lo largo del periodo de virtualidad y Pandemia. Aprovechando su capacidad de resonancia para crear dos métodos alternativos de detección del espectro para la técnica de interferencia de baja coherencia en el dominio de las frecuencias, que hemos denominado detección Axial y detección Radial. Se optimizaron los parámetros relevantes como el ancho de la cavidad d , la reflectividad y concavidad de los espejos para tener un diseño óptimo de la cavidad Fabry Perot para sistemas con haces de cinturas de $500 \mu\text{m}$ que funcionen para longitudes de onda centrados en 850 nm con anchos de 60 nm y resoluciones por debajo del nanómetro. Además, en caso de ser necesario, el diseño contempla que la cavidad pueda ser utilizada simultáneamente en ambas configuraciones: Radial y Axial. Existe un compromiso entre estos dos detectores, la detección Axial puede detectar el perfil de intensidades con mayor sensibilidad a costa de introducir un desplazamiento en la cavidad mientras que la detección Radial no posee partes móviles pero su sensibilidad es menor.

Estos diseños solo utilizan espejos como elementos ópticos, no requieren ni lentes ni redes de difracción para separar espacialmente el espectro de luz y sus rangos de trabajo se pueden adaptar modificando características espaciales del ex-

perimento (ancho y barrido de la cavidad) sin la necesidad de reemplazar ningún elemento óptico. Resultando detectores plausibles para realizar FD-LCI en espectros ultra violetas o infrarrojos lejanos.

Queda pendiente implementar su aplicación experimental mediante cavidades FP comerciales, o incluso mediante cavidades fabricadas en el laboratorio con espejos o extremos de fibras ópticas enfrentadas desplazándolas con controladores piezoeléctricos. Y explotar la potencialidad de extender el rango de medición máximo especialmente en la detección Axial.

Dos grandes fortalezas de estos detectores respecto al espectrómetro son: su fácil adaptación a otros rangos de trabajo y que su configuración permite continuar trabajando sobre el eje óptico. Notar que siempre que el fotodiodo o array tenga sensibilidad en el rango que se desea trabajar y realizando las simulaciones pertinentes, sería simplemente modificar el rango de barrido del ancho de la cavidad en la detección axial y la distancia de la cámara respecto a la cavidad en la detección radial. Por el otro lado, al no usar la red de difracción presente en el espectrómetro la detección se puede realizar por transmisión y sobre el eje óptico. De esta manera se evitan configuraciones típicas como la de Czerny-Turner logrando configuraciones del equipo de LCI más compactas y pequeñas.

El estudio de estos detectores habilita nuevas posibilidades para solucionar necesidades específicas que se puedan presentar dentro del ámbito industrial, comercial o también del académico. Por ejemplo, en aplicaciones industriales donde se pretende realizar mediciones en la línea de producción donde paralelamente se están realizando diferentes procesos u otros tipos de mediciones y se cuenta con

un espacio acotado para colocar el equipamiento. En aplicaciones donde se desea caracterizar muestras in situ, el tamaño y peso que ocupa el equipo es de vital importancia para la selección de las técnicas que se incorporan. Es el caso de las aplicaciones en satélites y/o sondas o el de equipos portátiles como en aplicaciones médicas que requieren equipos como para que un médico lo pueda trasladar a la casa del paciente o incluso el paciente posea uno propio. Además, vale destacar que estos detectores pueden ser fácilmente adaptadas a sistemas de FD-LCI que ya estén funcionando o inclusive a otros sistemas donde se requiera obtener información espectral centrada prácticamente en cualquier longitud de onda y con resoluciones nanométricas.

”Nosotros, los humanos, proyectamos nuestra humanidad sobre los objetos que creamos y estos la reconstruyen y resignifican.”

Sebastián ”Galo” Mermoud

8

Interferometría de baja coherencia en el dominio Temporal de Fourier TFD-LCI

Este capítulo da a conocer uno de los trabajos de mayor impacto e integrador de la Tesis. Se presenta una nueva técnica de bajo costo para FD-LCI, llamada Interferometría de baja coherencia en el dominio Temporal de Fourier (TFD-LCI) [137] la cual extiende el rango máximo de medición a varios centímetros utilizando la interferencia de la interferencia, siendo una posible solución a las problemáticas planteadas en la Sección 1.1.1. Esta técnica se inspira y mezcla ideas de detección clásicas de TD-LCI (brazo móvil / fotodiodo), Sección 2.1.2, y FD-LCI (transformada de Fourier), Sección 2.1.3, de ahí su nombre ”dominio temporal de Fourier”.

Desplazando la DCO del interferómetro de detección se puede muestrear la transformada de Fourier de manera analógica en el fotodiodo. A lo largo del capítulo se demuestra matemáticamente la técnica propuesta, se acompaña de simulaciones y se la compara con FD-LCI y TD-LCI, mostrando claramente las ventajas y desventajas de TFD-LCI. Luego se muestra su correspondiente validación experimental y la caracterización del funcionamiento del dispositivo. Se presentan diferentes mediciones de espesores de muestras monocapa para analizar la exactitud de TFD-LCI. Finalmente, se realizan mediciones de una muestra multicapa de más de 4 centímetros con características similares a las de un envase y un parabrisas de un auto para demostrar las potenciales aplicaciones en la industria de esta nueva técnica.

8.1 Demostración Teórica

El esquema experimental para la técnica de TFD-LCI está formado por un interferómetro de baja coherencia y el detector temporal de Fourier. Estas partes están compuestas por una fuente de luz (FL) con ancho de banda $\Delta\lambda$ que ilumina un interferómetro de tipo Michelson en aire que acumula una DCO de $\Delta r = r_2 - r_1$. Las reflexiones en cada espejo, donde sus intensidades son proporcionales a los coeficientes de reflexión A y B, generan la señal de interferencia clásica de un sistema LCI.

La intensidad I_0 puede ser observada en la Ecuación (8.1) :

$$I_0(\Delta r, k) = S(k)(A + B + 2\sqrt{AB}\cos(kn2\Delta r)) \quad (8.1)$$

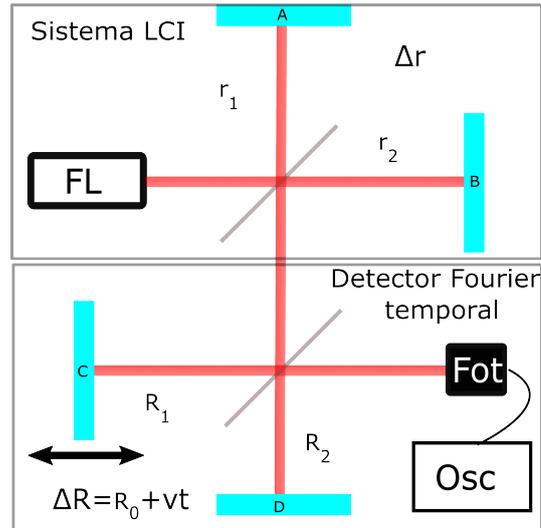


Figure 8.1: Configuración experimental para la técnica de TFD-LCI. Un sistema de baja coherencia compuesto por la fuente de luz (FL) un interferómetro de tipo Michelson, las reflexiones en los espejos vuelven a interferir en el detector temporal de Fourier, compuesto por un interferómetro con un brazo móvil, un fotodiodo (Fot) y un osciloscopio (Osc).

Donde $S(k)$ es la intensidad de la fuente de luz con la frecuencia espacial $k = \frac{2\pi}{\lambda}$. Se añade un factor adicional de 2 debido al recorrido total de ida y vuelta de la luz. En este caso como se esta en aire se puede considerar $n = 1$. El detector temporal de Fourier consta de un segundo interferómetro también de tipo Michelson con un brazo móvil, un fotodiodo para detectar la intensidad de la luz y un osciloscopio, véase la Figura 8.1. Por lo tanto, la señal después del primer interferómetro se mezcla interferométricamente de nuevo añadiendo un camino óptico extra $\Delta R = R_1 - R_2$ como se puede observar en la Ecuación (8.2). Una manera alternativa de pensar esto es que la fuente que ilumina el segundo interferómetro es toda la expresión de la Ecuación 8.1. Esto se observa en la siguiente ecuación que muestra la intensidad I en el fotodiodo para cada k en función de Δr y ΔR :

$$I(\Delta r, \Delta R, k) = S(k)(A + B + 2\sqrt{AB}\cos(kn2\Delta r))(D + C + 2\sqrt{CD}\cos(k2\Delta R)) \quad (8.2)$$

A,B,C y D son constantes relacionadas con los coeficientes de reflexión de los espejos. Para obtener la señal detectada en el fotodiodo, se calcula la integral para todo k suponiendo una responsividad constante y unitaria:

$$\begin{aligned} I_D(\Delta r, \Delta R) = E \int_{-\infty}^{\infty} S(k) dk \\ + 2\sqrt{CD}(A + B) \int_{-\infty}^{\infty} S(k)\cos(k2\Delta R) dk \\ + 2\sqrt{AB}(C + D) \int_{-\infty}^{\infty} S(k)\cos(k2\Delta r) dk \\ + 4\sqrt{AB}\sqrt{CD} \int_{-\infty}^{\infty} S(k)\cos(k2\Delta r)\cos(k2\Delta R) dk \quad (8.3) \end{aligned}$$

con $E = A^2C^2 + A^2D^2 + B^2C^2 + B^2D^2$. Notar la extrema similitud con la transformada coseno, Ecuación 2.18, en los últimos términos de la Ecuación (8.3). En particular el segundo integrando puede ser pensado como la transformada coseno, Sección 2.1.3, del espectro de la fuente de luz mientras que el cuarto integrando puede ser pensado como la transformada coseno de la señal de interferencia. Este integrando además, como la fuente de luz toma valores reales, es la parte real de la transformada de Fourier de la función $f(k) = S(k)\cos(2k\Delta r)$ con $u = k$ y $v = 2\Delta R$, ver la Ecuación 2.19.

Para continuar con el cálculo analítico de las integrales de la Ecuación 8.3, se puede asumir $S(k)$ como un espectro gaussiano con ancho de banda Δk centrado en k_0 con amplitud S_0 . Para resolver estas integrales se tuvieron en cuenta las siguientes cuestiones:

- El coseno de la suma: $\cos(a \pm b) = \cos(a)\cos(b) \mp \sin(a)\sin(b)$
- La integral de una función f par: $\int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx = 2 \int_0^{\infty} f(x) dx$
- La integral de una función g impar: $\int_{-\infty}^{\infty} g(x) dx = 0$
- El resultado de la integral: $\int_{-\infty}^{\infty} e^{-ax^2} \cos(bx) dx = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi}{a}} e^{-\frac{b^2}{4a}}$

Para simplificar los resultados y concentrarnos en los términos mas relevantes se definen dos nuevas constantes F y G que dependen de las características de la fuente de luz y de la muestra. No se tuvieron en cuenta los términos con los valores F y G ya que son pequeños respecto a los valores de los términos principales y además al ser constante pueden ser fácilmente abstraídos.

$$F = E \int_{-\infty}^{\infty} S(k) dk \tag{8.4}$$

$$G = 2\sqrt{AB}(C + D)\sqrt{\pi}\Delta k \cos(k_0 2(\Delta r)) e^{-\Delta r^2 \Delta k^2} \tag{8.5}$$

Vale aclarar que para cada muestra Δr es constante. Finalmente, en la Ecuación 8.6 se muestra el cálculo de I_D como función únicamente de la DCO del detector

temporal de Fourier ΔR :

$$\begin{aligned}
I_D(\Delta R) = & F + G + 2\sqrt{CD}(A + B)\sqrt{\pi}\Delta k \cos(k_0 2\Delta R)e^{-\Delta R^2 \Delta k^2} \\
& + 2\sqrt{AB}\sqrt{CD}\sqrt{\pi}\Delta k \cos(k_0 2(\Delta r + \Delta R))e^{-(\Delta r + \Delta R)^2 \Delta k^2} \\
& + 2\sqrt{AB}\sqrt{CD}\sqrt{\pi}\Delta k \cos(k_0 2(\Delta r - \Delta R))e^{-(\Delta r - \Delta R)^2 \Delta k^2} \quad (8.6)
\end{aligned}$$

El resultado muestra que existe una franja interferométrica con envolvente gaussiana cuando $\Delta R = 0$, que podemos considerar como centro y lo identificamos como el orden cero. También hay otras dos franjas interferométricas con envolvente gaussiana cuando $\Delta R = \pm\Delta r$, ver Figura 8.2. Como el espectro de la fuente de luz toma valores reales, la envolvente de la señal obtenida es la parte real de la transformada de Fourier de la señal de interferencia de la muestra con ΔR como variable conjugada. En particular, si los coeficientes de reflexión son iguales, las franjas laterales tienen la mitad de amplitud que la central, orden cero de la transformada de Fourier. Si la muestra tiene más interfaces, la señal TFD-LCI medirá los términos de correlación cruzada (espejo de referencia-interfaz) y también los términos de autocorrelación (interfaz-interfaz). Es decir, que si la muestra tiene dos interfaces r_2 y r'_2 se observarán franjas para los valores de ΔR de correlación cruzada $r_2 - r_1$ y $r'_2 - r_1$ y para la autocorrelación $r'_2 - r_2$. Como así también, los mismos valores pero negativos y el orden cero. Dando un total de 7 franjas. Por lo tanto, calculando la distancia entre los máximos de las franjas se pueden calcular las DCOs de la muestra de interés. En la Sección 8.4 se puede observar un ejemplo de lo aquí mencionado.

Moviendo ΔR se puede ir muestreando la señal de la Figura 8.2 y detectar

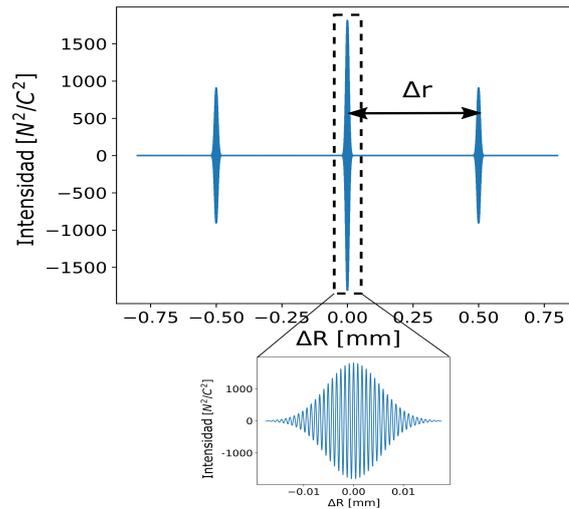


Figure 8.2: Simulación de una señal en el dominio de temporal de Fourier de un interferómetro tipo Michelson con espejos de igual coeficiente de reflexión. La envolvente de la señal es la parte real de la transformada de Fourier.

con un fotodiodo. La información final obtenida es la transformada de Fourier de manera analógica de la señal de interferencia, por lo que se puede afirmar que el detector temporal de Fourier puede considerarse como un detector para la técnica de FD-LCI.

El brazo móvil determina el DCO máximo medible, la exactitud y el tiempo de adquisición en TFD-LCI. La DCO máxima depende del alcance total del actuador de desplazamiento; en este montaje experimental es de varios centímetros. La precisión depende de la capacidad del actuador de desplazamiento para mantener constante la velocidad. El tiempo de adquisición de una señal TDF-LCI depende de la velocidad del actuador de desplazamiento y del DCO máximo. Por otra parte, la resolución depende del ancho de la franja de interferencia que si se considera una envolvente del tipo gaussiana viene dada por la longitud de coherencia L_c de la fuente como es habitual en LCI, Ecuación 2.10.

Los desafíos técnicos que resuelve la técnica de TDF-LCI son la posibilidad de

medir distancias de centímetros con precisión y resolución micrométricas utilizando un diodo superluminiscente y la obtención de la información de la transformada de Fourier sin procesamiento digital. Siendo el sistema de desplazamiento del brazo móvil el elemento relevante. Se trata de una técnica de bajo costo (en comparación principalmente con SS-LCI) que tiene un gran potencial para aplicaciones industriales.

8.1.1 Comparando TFD-LCI con TD-LCI y FD-LCI

Si bien la técnica de TFD-LCI tiene algunos elementos comunes a la técnica de TD-LCI, Sección 2.1.2 y otros a FD-LCI, Sección 2.1.3, su funcionamiento de manera integral y su señal final detectada son propias. Por este motivo y para seguir profundizando características importantes, se detallan de manera comparativa ciertos aspectos de la técnica de TFD-LCI:

- La señal de interferencia ya está formada y tiene toda la información de la muestra antes de entrar en el detector temporal de Fourier, como en FD-LCI y a diferencia de TD-LCI que la señal interferométrica se forma al variar el brazo móvil. Es decir que, en TFD-LCI al variar el brazo móvil simplemente se muestrea la señal ya existente.
- No es necesario utilizar un brazo adicional en el sistema LCI para obtener la señal de interferencia de la muestra, como en TD-LCI, ver Figura 8.1. Esto permite usar configuraciones en el sistema de LCI de interferómetros de una única rama, como en FD-LCI, y desacoplar más fácilmente los movimientos asociados al ambiente donde se encuentra la muestra con el movimiento del

brazo del detector temporal de Fourier.

- Se pueden medir los términos de autocorrelación de la muestra, como en FD-LCI, lo que es imposible de hacer en TD-LCI. Esto permite extraer mayor cantidad de información de la muestra, permitiendo por ejemplo sortear cierta problemática de bajas reflectividades en interfases internas de la muestra.
- Identificando la posición del máximo de las franjas de la señal adquirida, se pueden calcular todas las DCOs de la muestra, sin necesidad de calcular la transformada digital de Fourier.
- Como el detector temporal de Fourier se encuentra en la parte final del montaje, podría acoplarse fácilmente a otro sistema de FD-LCI existente para ampliar su máxima DCO medible.
- La señal detectada, posee las mismas características (fase, ancho, etc) en cada lóbulo o franja interferométrica que en TD-LCI pero existen mas cantidad de lóbulos por medición, Figura 8.3. Es mas, otra manera válida de interpretar la técnica de TFD-LCI es pensando que el doble interferómetro realiza la correlación de la correlación de las longitudes de coherencias presentes en el sistema. Respecto a FD-LCI la señal es notoriamente distinta a la señal detectada por el espectrómetro, ver Figura 2.9.

La TFD-LCI junta características tanto de TD-LCI (largas distancias medibles con un brazo móvil y fotodiodo como detector) como de de FD-LCI (información de la transformada de Fourier junto con los términos de autocorrelación de la muestra) para dar lugar a una nueva técnica que puede ser aplicada para medir grandes distancias en sistemas de FD-LCI.

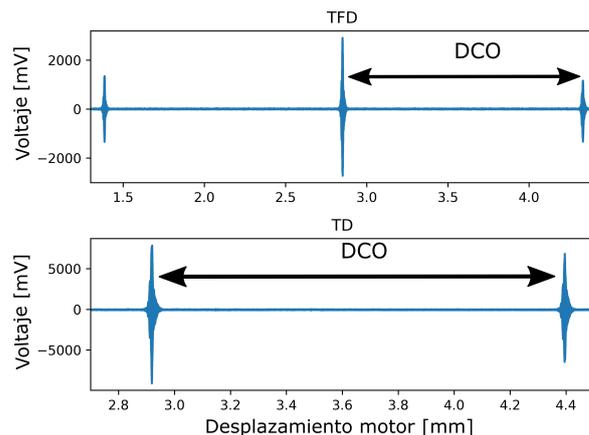


Figure 8.3: Señal obtenida en el osciloscopio al desplazar el brazo movable en una configuración de TFD-LCI (superior) y TD-LCI (inferior) para la medición del mismo porta objeto.

8.2 Comprobación experimental

En la Figura 8.4 se presenta una imagen del dispositivo experimental implementado para las primeras pruebas de principios de la técnica de TFD-LCI, utilizando los mismos elementos que el esquema de la Figura 8.1. Como fuente de luz se utilizó un diodo superluminescente Superlum SLD-CS no gaussiano con longitud de onda central $\lambda_0 = 850 \text{ nm}$ y $\Delta\lambda = 80 \text{ nm}$, un fotodiodo Thorlabs FDS 100 para la detección de luz y un osciloscopio Tektronix DPO2024B con velocidad de muestreo de 1 GS/s como OSC para la adquisición. Se utilizaron dos separadores de haces de 50% – 50%. Para el movimiento de R_1 se utilizó un motor LTA Newport para desplazamientos inferiores a $2,5 \text{ cm}$ y otro Zaber X-LSM050A para desplazamientos mayores.

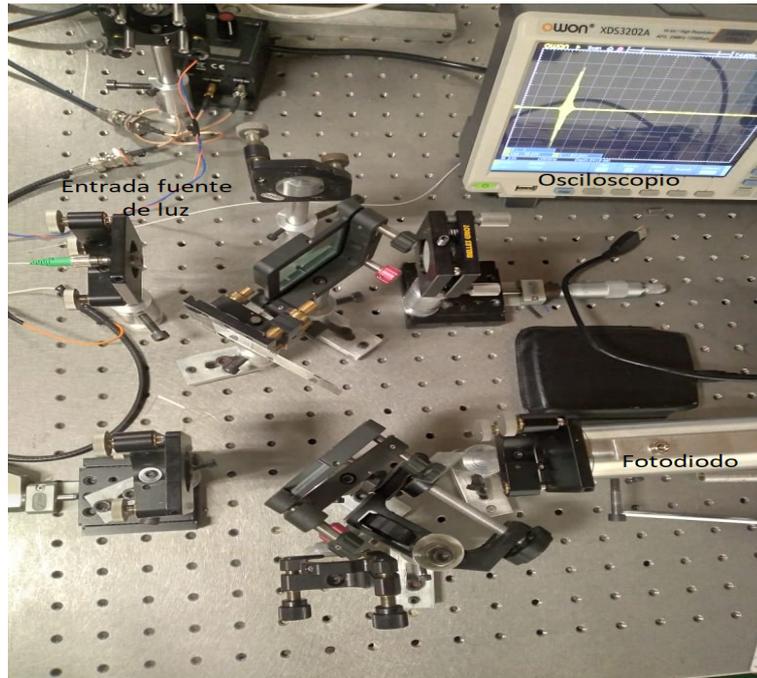


Figure 8.4: Foto del dispositivo experimental de TFD-LCI utilizado para las primeras validaciones de la técnica

8.2.1 Medición de una señal de TFD-LCI

Se quitó el espejo de la rama r_1 del esquema de la Figura 8.1 y se colocó un cubre objetos en la rama r_2 de un espesor nominal de 0.14 ± 0.02 con un $n = 1,5108$, conformando un interferómetro de una única rama. Se fijó la velocidad del motor de la rama R_1 a $62.5 \mu\text{m}/\text{s}$ y se adquirió el voltaje en función del tiempo en el fotodiodo con el osciloscopio para obtener un señal experimental de TFD-LCI similar a la simulada en la Figura 8.2. Como se puede observar en la Figura 8.5, el resultado coincide con el simulado. Se adquirió la señal filtrando el valor de continua. La forma de la franja o lóbulo es diferente ya que la fuente de luz no es estrictamente Gaussiana. A su vez conociendo la velocidad a la que se varió el motor de la rama R_1 , se puede calibrar el eje temporal para obtener la DCO del cubre objetos en unidades de distancia como $\Delta R = v\Delta t$ considerando que la velocidad se mantiene constante.

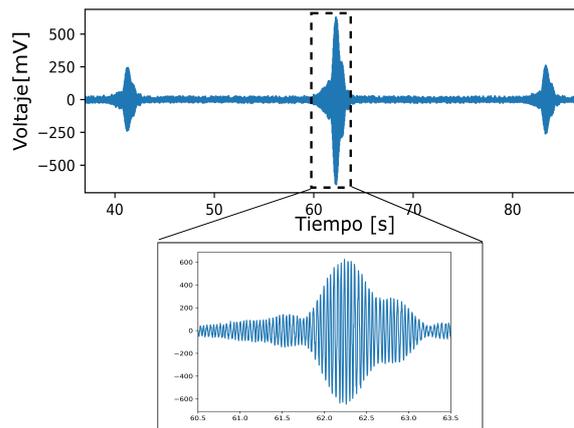


Figure 8.5: Medición experimental de la técnica de TFD-LCI de un cubre objetos

Una vez detectada la señal se la procesó usando Python para determinar la distancia entre lóbulos que es la información deseada. Ya que la forma de cada lóbulo es igual debido a que depende del espectro de la fuente de luz, se buscó tomar el mismo punto significativo en cada uno y calcular su distancia. Como su forma no es simétrica, se decidió tomar el máximo de cada lóbulo. Para eso, se quitó la señal continua (en caso de que aun tuviese), se calculó el modulo, se calcularon los máximos locales, se interpolaron con una función polinómica y se calculó el máximo global de esa función, como se puede observar en la Figura 8.6. En los casos que se muestrean los lóbulos positivos y negativos se puede aprovechar para realizar el promedio entre ellos con el lóbulo central.

8.2.2 Movimiento del brazo del detector de TFD-LCI

Una parte central en la técnica de TFD-LCI es el movimiento de la rama del interferómetro que conforma el detector temporal de Fourier. De la experiencia de TD-LCI, se sabe que la calidad del motor y del movimiento del carro o motor sobre el cual esté colocado el espejo es de vital importancia para el desempeño

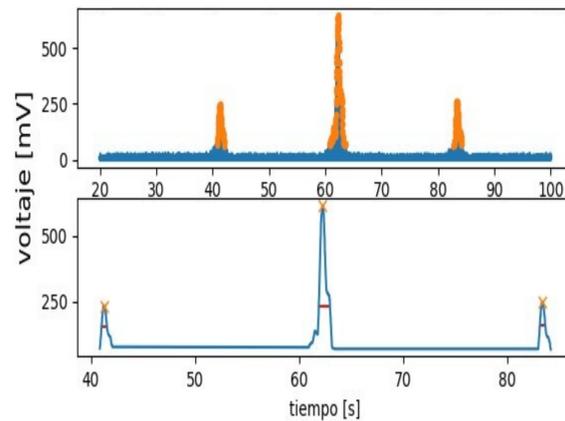


Figure 8.6: Procesamiento de la señal de TFD-LCI. Gráfico del módulo de la señal de TFD-LCI y cálculo de los máximos locales (superior). Gráfico de la función envolvente de cada lóbulo con su máximo global (inferior). En rojo se representa el ancho de cada lóbulo.

de la técnica. En especial en la precisión y en la máxima DCO medible. Características que generalmente se relacionan inversamente, al aumentar una de estas suele disminuir la otra. Con los desarrollos tecnológicos de los últimos años y la gran variedad de empresas que se dedican a fabricar estos dispositivos existen en el mercado controladores, actuadores y motores que permiten movimientos de centímetros con precisiones micrométricas. Parámetros deseados para las aplicaciones industriales. El costo escala con la calidad y se encuentra alrededor de los miles de dolares.

Los elementos necesarios para generar el movimiento de la rama son:

- **Actuador:** Elemento que va a realizar el movimiento propiamente dicho. También se lo suele llamar simplemente como motor.
- **Carro:** Elemento sobre el cual se va aplicar el movimiento del actuador permitiendo la traslación. Sobre el se coloca el espejo reflector.
- **Controlador:** Se encarga de enviar la señal eléctrica para activar el actuador.



Figure 8.7: Imagen del actuador/motor en conjunto con el carrito utilizado Zaber X-LSM050A

Puede funcionar a lazo abierto o a lazo cerrado. Permite entre otras cosas leer la posición final del actuador al finalizar la ejecución de movimiento asignada.

En la Figura 8.7 se puede observar el motor marca Zaber utilizado en las mediciones de más de 3 cm, Sección 8.4.1. El carro se encuentra acoplado al actuador y este tiene el controlador integrado a su lado.

Configurando la distancia inicial de la rama R_1 para detectar la franja central, es decir $R_1 = R_2$, la máxima DCO medible con TFD-LCI va a estar dado por el máximo desplazamiento generado por la rama móvil del interferómetro. El cual depende del máximo rango de movimiento del actuador y de traslación del carro.

Precisión

Para caracterizar con gran exactitud la precisión con la que se desplaza el brazo móvil y aprovechando la configuración experimental existente se realizó una medición por interferometría de alta coherencia del movimiento del espejo de la rama R_1 . Para eso se alineó un láser de He-Ne (632.8 nm) en paralelo al haz de la fuente de luz de baja coherencia en el detector temporal de Fourier para monitorizar en el

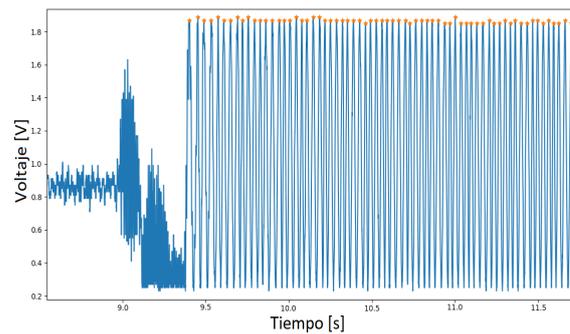


Figure 8.8: Conteo de máximos para calcular la distancia recorrida de la rama R_1 mediante alta coherencia

osciloscopio el desplazamiento del espejo con precisión nanométrica. Cada vez que se desplaza media longitud de onda (316.4 nm) la intensidad de luz oscila entre dos máximos consecutivos, permitiendo medir de manera directa el movimiento real del espejo, ver Figura 8.8. Con un programa en Python, se identificaron los máximos de la señal (naranja) y se calculó la distancia recorrida a medida que el motor se desplazaba seteado a velocidad constante.

A partir de esto, se pudo medir el desplazamiento instantáneo de ΔR a lo largo de 1 cm, notar que al hacer esto se están englobando el comportamiento conjunto del controlador, actuador y carro. Suponiendo que la dependencia temporal del desplazamiento del carro va como $R_0 + vt$ y que la constante R_0 que puede suponerse nula, se calculó la diferencia $Dif = \Delta R - vt$ entre la posición de alta coherencia ΔR y la posición esperada vt . En la Figura 8.9 se pueden observar dos de estas mediciones diferencias llamadas M1 y M2. Como se esperaba, la velocidad del motor no es constante, pero la variación entre el movimiento ideal (lineal con el tiempo) y el medido es altamente repetitiva, debido probablemente a la naturaleza de su construcción mecánica. También se observa una desviación que se va acumulando entre la medida de alta coherencia y la posición esperada de 20 μm por

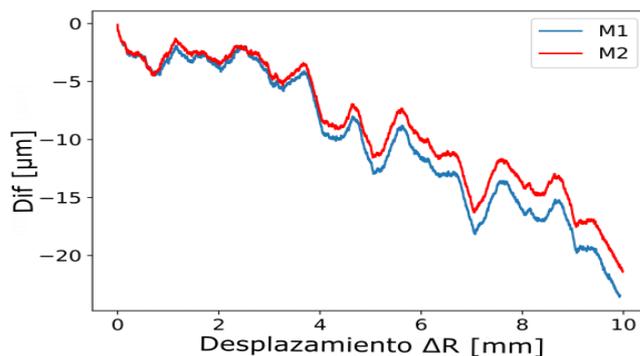


Figure 8.9: Diferencia Dif entre la posición medida con alta coherencia y la posición esperada vt en función del desplazamiento ΔR para dos medidas representativas.

centímetro y una deriva de $2 \mu m$ por centímetro. Cuanto mayor es el desplazamiento del actuador de movimiento, mayor es la diferencia y la desviación. A pesar de ligeras variaciones para diferentes velocidades del motor, esta caracterización permite definir el error del sistema en función del desplazamiento máximo de ΔR como el máximo del modulo de la diferencia entre el movimiento ideal y el medido con alta coherencia $\max(|Dif|)$. En algunos motores, esta Dif se compensa parcialmente en el rango dinámico total de movimiento, para algunas distancias Dif disminuye y para otras aumenta. Para una medición de 1 centímetro con el actuador motorizado LTA Newport la exactitud es de $25 \mu m$ (Figura 8.9). Por otra lado, la exactitud el actuador Zaber X-LSM050A informada por el fabricante para un desplazamiento de 5 cm es de $30 \mu m$. Cuanto mejor sea el actuador de desplazamiento, mayor será la exactitud del TFD-LCI y por lo general mayor sera su costo económico. Sin embargo, realizando este tipo de caracterización se puede acotar el error y tener gran certeza del movimiento del carro en el dispositivo experimental propio.

Extensión rango del actuador

Durante la mayoría de la Tesis se trabajó con motores y/o actuadores de rangos de desplazamiento de 2,5 centímetros. Como el objetivo de la tesis es usar esta técnica para mediciones no invasivas en aplicaciones industriales, en particular, para inspeccionar envases, botellas o plásticos que tienen diámetros por encima de los 3 centímetros se pensaron dos maneras de extender el rango de medición máxima. Por un lado, se buscó comprar un actuador de mayor rango. Por el otro, se pensó una idea para duplicar el rango de barrido de DCO en el interferómetro del detector temporal de Fourier. Para eso se colocó un espejo fijo y sobre el carro un retroreflector como se observa en la Figura 8.10. Lo interesante de esta propuesta, es que el rayo de luz al pasar dos veces por el retroreflector hace que la rama acumule un camino óptico del doble del desplazamiento del motor. Dos cuestiones a tener en cuenta de esta propuesta son: el error del movimiento también se duplica y puede existir cierta pérdida debido a las múltiples reflexiones (y posibles recortes del haz debido a las esquinas) que se dan en el retroreflector. Por estas razones, las mediciones mayores a 2,5 cm se realizaron sistema de desplazamiento Zaber X-LSM050A que posee 5 cm de rango de movimiento. Pero queda la propuesta en caso de necesitar extender el rango del actuador disponible.

Muestreo y tiempo de adquisición

El ancho del pulso en la transformada de la intensidad de la señal de interferencia viene determinada por la longitud de coherencia L_c determinada por la fuente de luz. Considerando que es importante obtener por lo menos 4 puntos dentro

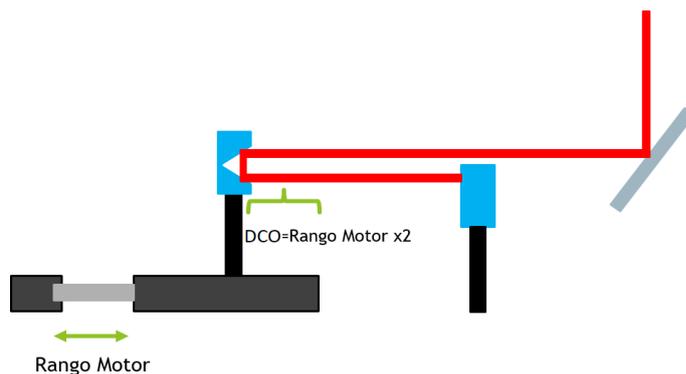


Figure 8.10: Propuesta para duplicar el rango del motor de desplazamiento

del pulso para determinar su envolvente, entonces la distancia de muestreo será $L_c/4$. Como el tiempo que lleva recorrer esta distancia está determinado por la velocidad del sistema de traslación del detector, $\Delta R = vt$ considerando la velocidad constante, el tiempo de muestreo T_m puede definirse como:

$$T_m = \frac{L_c}{4v} \quad (8.7)$$

Se puede apreciar que si la velocidad del sistema de traslación es baja, el tiempo de muestreo es grande, permitiendo el uso de sistemas de adquisición que no tengan grandes prestaciones en cuanto a la frecuencia de muestreo. Por otro lado si la distancia total es grande, la cantidad de muestras de toda la medición aumenta, requiriendo un aumento de la capacidad de almacenamiento de información. A modo de ejemplo, Tomando la velocidad máxima que puede utilizar el sistema de traslación utilizado (5 mm/s) y considerando que $L_c \approx 10 \text{ } \mu\text{m}$ se obtiene un $T_m = 0,5 \text{ ms}$ y una frecuencia de muestreo de 2 kS/s , bastante menos que el 1 GS/s del osciloscopio utilizado. Esto nos garantiza un correcto muestreo de la señal a detectar.

Por otro lado el tiempo que demanda realizar una medición (T_{med}) de TFD-LCI depende principalmente de la velocidad del motor y de la distancia máxima a recorrer $T_{med} = \Delta R_{max}/v$. Mejores sistemas de traslación tendrán mayores velocidades.

Cuanto más rápido sea el movimiento del motor, mayor será la velocidad de adquisición de la señal pero también así la frecuencia de muestreo necesaria.

8.3 Medición de muestras monocapas

Se comenzó realizando mediciones de los espesores de muestras monocapa de diferentes anchos y materiales para probar el funcionamiento de la técnica de TFD-LCI. Se midieron cubreobjetos, portaobjetos de vidrio con $n_{Bk7} = 1,5108$ y un portaobjetos de acrílico $n_{ac} = 1,4950$ de varios milímetros, ver Tabla 8.1. La exactitud para estas muestras se estima a partir de la diferencia dentro del rango que se desplaza el actuador para cada medición. La repetitividad de TFD-LCI se caracteriza con la desviación estándar del mismo punto de muestra a lo largo de diez mediciones. La resolución esta dado por el ancho de las franjas que es entre 5 a 10 micrones.

Muestra	Espesor nominal [mm]	Espesor TFD [mm]	Repetitividad [μm]
Cubre-objetos	0.14 ± 0.02	0.140 ± 0.001	0.09
Vidrio	0.98 ± 0.02	0.994 ± 0.004	0.33
Acrílico	5.90 ± 0.02	5.886 ± 0.015	1.53

Table 8.1: Mediciones en un solo punto de diferentes espesores de muestras monocapa. El exactitud para TFD se calcula a partir de la diferencia Dif entre la alta coherencia y la posición esperada dividida por el índice de refracción en el rango de movimiento de la muestra. La precisión se calcula sobre 10 mediciones

8.4 Aplicaciones industriales

Para las aplicaciones industriales de la técnica de TFD-LCI se rediseño la configuración experimental para que sea mas practica, robusta y este acorde a posibles ambientes industriales donde se utilice. Este nuevo prototipo experimental, aún de laboratorio, reemplaza el interferómetro del sistema LCI por uno montado en fibra y posee solo una rama con el uso de un circulador para dirigir la luz al detector temporal de Fourier [8.11](#). El haz ilumina de manera colimada en la muestra para recolectar la mayor cantidad de luz de las distintas interfases que pueden estar separadas varios centímetros, pero de ser necesario se puede colocar una lente para enfocar la luz. La fibra permite una adaptación mas sencilla de la configuración experimental al ambiente donde se encuentre la muestra. Como las muestras a medir son semitransparente y tienen dos o mas interfases y la técnica de TFD-LCI detecta los términos de autocorrelación se pudo montar el interferómetro de una rama. Este permite independizarse de vibraciones indeseadas de la muestra y tan comunes en lineas de producción o ambientes industriales.

8.4.1 Medición apuntada a envases

Muchos productos industriales como botellas de vidrio, envases de plástico, láminas acrílicas, etc han llegado al laboratorio a lo largo de los años para ser analizadas presentan una configuración de varias interfaces compuestas por distintos materiales de espesores diferentes y separadas varios centímetros, ver [Figura 8.12](#) .

Para mostrar las potencialidades de la TFD-LCI, se armó una muestra con estas características conformada por dos vidrios paralelos (un cubreobjetos y un

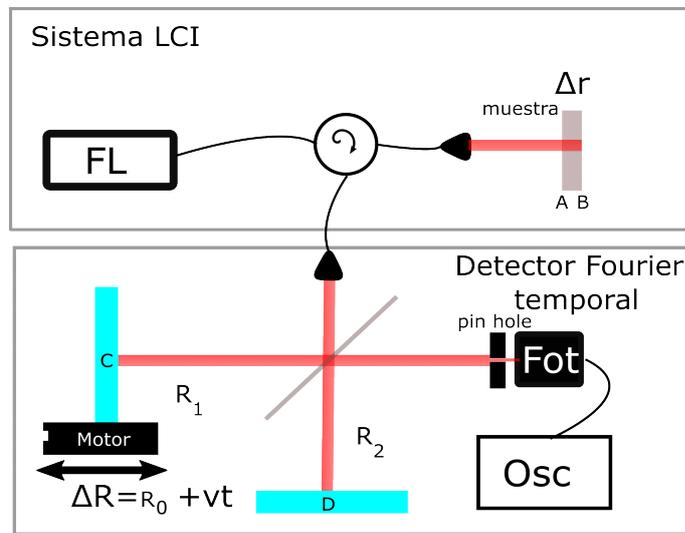


Figure 8.11: Prototipo experimental de la técnica de TFD-LCI utilizada para las aplicaciones industriales. Para el sistema LCI se implementó un interferómetro de una sola rama en fibra



Figure 8.12: Imagen de objetos industriales tipo envases que han llegado al laboratorio para ser analizados a lo largo de los años

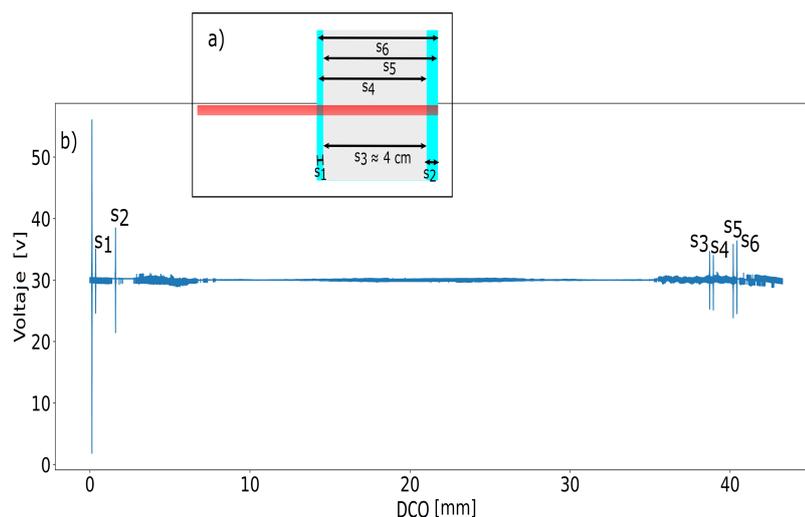


Figure 8.13: a) Esquema de las capas internas de la muestra indicando las DCO b) Señal TFD-LCI de una muestra multicapa larga. Se detectan todos los términos de interfaces internas y autocorrelación.

portaobjetos) separados en aire casi 4 cm, véase la Figura 8.13. Las cuatro interfaces de la muestra generan seis términos de autocorrelación $S_1 = (0, 358 \pm 0, 030)$ mm, ($S_2 = 1, 601 \pm 0, 030$) mm, $S_3 = (38, 727 \pm 0, 030)$ mm, $S_4 = (38.956 \pm 0, 030)$ mm, $S_5 = (40, 199 \pm 0, 030)$ mm y $S_6 = (40, 434 \pm 0, 030)$ mm, ver Figura 8.13 también existe el orden cero $S_0 = (0, 128 \pm 0, 030)$ mm. Conociendo el índice de refracción de cada material se puede determinar el espesor de las capas de la muestra: cubreobjetos $(152 \pm 20)\mu m$, portaobjetos de vidrio $(974 \pm 20)\mu m$, aire $(38, 599 \pm 0, 030)mm$) y también el espesor total $(39, 725 \pm 0, 030)mm$. El haz no se enfocó para poder recoger la luz desde grandes distancias. Debido a los desajustes internos naturales entre las interfaces, no fue posible aumentar aún más la potencia de detección óptica. Se aplicó un filtro de posprocesamiento para mejorar la relación señal-ruido (SNR). Queda pendiente aplicar un circuito de mayor amplificación en el fotodiodo y usar un osciloscopio de mejor calidad para aumentar la SNR.

8.4.2 Medición de un parabrisas

Por último, para demostrar la viabilidad de aplicar TFD-LCI en una muestra industrial real, se midió el parabrisas de un auto de casi 5 mm de grosor total con una capa interna desafiante. Como antes, las cuatro interfaces de la muestra generan seis términos de autocorrelación W_1, W_2, W_3, W_4, W_5 y W_6 pero con diferentes configuraciones, véase la Figura 8.14.a). Las capas correspondientes a W_2 y W_4 son dos vidrios de DCO superior a 3 mm mientras que la capa correspondiente a W_1 está conformada por un polímero de unas decenas de micrómetros donde el objetivo es proporcionar flexibilidad y seguridad al parabrisas sin comprometer la visión del conductor. Por lo tanto, el n del polímero es muy similar al n_{vidrio} (1,5090) haciendo que las reflexiones en la interfaz entre el vidrio y el polímero sean realmente débiles. Para identificar esta capa, se enfocó la luz con una lente para recoger más luz de esta zona. Se realizaron dos mediciones del mismo punto y se calculó la correlación cruzada para eliminar el ruido aleatorio y amplificar la señal de TFD-LCI, véase la figura 8.14. El término W_1 no puede identificarse, el coeficiente de reflexión de la interfaz vidrio-polímero es el más pequeño, pero todas las capas de espesor pudieron calcularse gracias a la información de los otros términos de autocorrelación ($W_3 - W_2$ o $W_5 - W_4$). Vidrio 1 ($2,100 \pm 0,017$) mm, polímero ($0,027 \pm 0,017$) mm, Vidrio 2 ($2,809 \pm 0,017$) mm y un espesor total del parabrisas ($4,946 \pm 0,017$) mm.

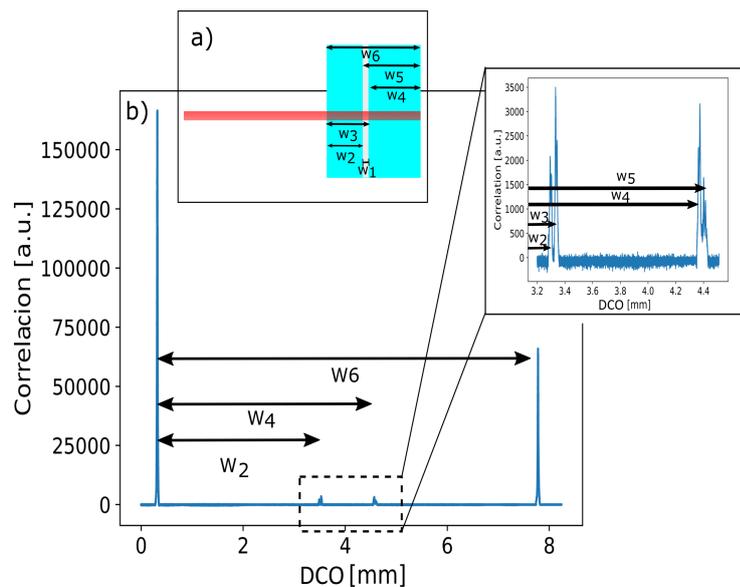


Figure 8.14: a) Esquema de las capas interna del parabrisas indicando las las diferentes DCO. b) Correlación de dos señales de TFD-LCI del parabrisas y un área ampliada para observar la diferencia de camino óptico más cercanas.

8.4.3 Extensiones de la técnica

Se realizaron adaptaciones y mejoras de esta técnica propuesta pero se decidió no colocarlo explícitamente en la Tesis ya que se encuentra en estadio de análisis de su patentamiento.

8.5 Conclusiones

Se presentó un nuevo detector FD-LCI capaz de medir distancias de varios centímetros con resolución micrométrica y exactitud en decenas de micrómetros. Se han mostrado la teoría, la experimentación y la aplicación industrial. TFD-LCI combina aspectos de TD-LCI y FD-LCI dando la posibilidad de detectar directamente la transformada de Fourier, con sus términos de autocorrelación, utilizando un fotodiodo y un actuador motorizado. Las desventajas de añadir una parte móvil,

como la precisión y el tiempo de adquisición, se compensan con las mediciones de largo alcance conseguidas y el bajo costo del sistema. El actuador motorizado más un fotodiodo son más baratos que un espectrómetro, y mucho más que una fuente de luz de barrido. La TFD-LCI tiene un gran potencial para desarrollar equipos de medición y transferirlos a la industria, así como para ampliarlos a mediciones tridimensionales. Además, como la innovación de esta técnica reside en el detector temporal de Fourier, puede utilizarse para ampliar las prestaciones de los equipos FD-LCI y FD-OCT convencionales. Las mediciones no invasivas, de largo alcance y bajo costo de las capas internas de productos como botellas, envases, láminas y portaobjetos son necesidades demandadas por la industria que la TFD-LCI puede ayudar a resolver.

”El peso de la madurez puede hacerte caer y quebrarte. Pero también crecer, florecer y hasta aumentar tu energía potencial gravitatoria.”

9

Conclusiones Generales

Sin lugar a dudas la técnica de FD-LCI posee grandes cualidades para ser utilizada dentro de los ensayos no destructivos y caracterización de muestras en rangos de distancias o profundidades en la muestra de los milímetros con resolución micrométrica. Durante la tesis, se realizaron diferentes mediciones con un equipo de FD-LCI convencional para empresas, instituciones y laboratorios validando su potencial, ganando experiencia en la vinculación tecnológica pero también identificando ciertas falencias y/o debilidades de la técnica a la hora de usarla para servicios y/o transferencias.

Por estos motivos, a lo largo de esta tesis de doctorado, se llevaron adelante diferentes estrategias para desarrollar nuevas maneras de detección para la técnica

óptica de FD-LCI pensando en suplir estas limitaciones y requerimientos. Las primeras estrategias mantuvieron al espectrómetro, el detector estándar de esta técnica, como eje base: se repensó su diseño, se le agregaron accesorios previos y buscaron nuevas formas de post-procesar su señal. En las segundas, se estudiaron nuevos tipos de detectores capaces de reemplazar al espectrómetro mediante cavidades Fabry Perot, interferómetros extra, fotodiodos y cámaras.

Dentro del conjunto de las primeras estrategias, se estudió el diseño de espectrómetros para personalizar el rango de trabajo a la aplicación requerida, contemplando inclusive un posible extensión de rango respecto de los convencionales (Capítulo 4). Agregando un interferómetro extra es posible sintonizar las DCO de varios centímetros y traerlas dentro del rango de medición del espectrómetro (Capítulo 5). Por último dentro de estas primeras estrategias, se estudió el uso de diferentes diseños de redes neuronales para estimar frecuencias de señales características de FD-LCI analizando su precisión y tiempos característicos (Capítulo 6). Se mostró que son una alternativa interesante para reducir el procesado necesario y reemplazar el uso de la transformada de Fourier para calcular la información de interés.

Dentro del conjunto de las segundas estrategias, se propusieron dos detectores basados en cavidades Fabry Perot capaces de reemplazar al espectrómetro, denominados detector Axial y detector Radial (Capítulo 7). Estos diseños solo utilizan espejos como elementos ópticos, no requieren ni lentes ni redes de difracción. Se simularon sus diseños para mostrar su funcionamiento dentro de rangos característicos de la técnica y a su vez para poder aplicar ambas en paralelo. Se obtuvieron resoluciones similares a las de un espectrómetro convencional. Por

último se propuso una nueva técnica denominada TFD-LCI capaz de medir distancias de varios centímetros con resolución micrométrica y precisión en decenas de micrómetros (Capítulo 8). Esta combina aspectos de TD-LCI y FD-LCI dando la posibilidad de detectar directamente la transformada de Fourier, utilizando un fotodiodo y un actuador motorizado.

Mediante estas nuevas formas de detección se buscó solucionar algunas de las necesidades concretas identificadas. Consiguiendo de este modo, extender el rango de medición, dominar el conocimiento para diseñar equipos personalizados para aplicaciones específicas, desarrollar procesamiento alternativo y cumplir estas requerimientos con equipos de bajo costo. Con estas nuevas características se ha logrado ampliar y mejorar las potencialidades de la técnica de FD-LCI para aplicaciones industriales.

El proceso de la tesis resultó interesante desde el punto de vista de las aplicaciones tecnológicas. A partir de una técnica ya instaurada, se identificaron las necesidades requeridas por parte de posibles usuarios, se investigaron nuevos conocimientos en estas direcciones, se diseñaron simulaciones y experimentos, se desarrollaron tecnologías y se aplicaron para mediciones industriales. Completando, de esta manera, un ciclo científico-tecnológico.

Como perspectivas a futuro, se busca continuar acumulando experiencia en servicios y transferencias tecnológicas. En particular en aplicaciones en donde sea necesario utilizar estos nuevos detectores. Con el objetivo de a mediano plazo concretar la transferencia de un equipo de FD-LCI a una empresa de manera completa.



Apendice

A.1 Capitulo 6: Redes convolucionales

Se muestran las capas de la RN convolucional implementada en el grafico [6.19](#)

```
imageInputLayer([2000 1 1])
```

```
convolution2dLayer([2 1],8, 'Stride',[2 1], 'padding', 'same')
```

```
batchNormalizationLayer
```

```
tanhLayer
```

```
convolution2dLayer([4 1],16, 'Stride',[3 1], 'padding', 'same')
```

batchNormalizationLayer

tanhLayer

convolution2dLayer([4 1],32, 'Stride',[3 1], 'padding', 'same') batchNormaliza-
tionLayer tanhLayer convolution2dLayer([4 1],64, 'Stride',[3 1], 'padding', 'same')

batchNormalizationLayer

tanhLayer

convolution2dLayer([4 1],128, 'Stride',[3 1], 'padding', 'same')

batchNormalizationLayer

tanhLayer

convolution2dLayer([3 1],256, 'Stride',[3 1], 'padding', 'same')

batchNormalizationLayer

tanhLayer

convolution2dLayer([3 1],512, 'Stride',[3 1], 'padding', 'same')

batchNormalizationLayer

tanhLayer

dropout(0.5)

fullyConnectedLayer(5000)

tanhLayer

fullyConnectedLayer(5000)

tanhLayer

fullyConnectedLayer(1000)

tanhLayer

fullyConnectedLayer(1000)

tanhLayer

fullyConnectedLayer(500)

tanhLayer

fullyConnectedLayer(500)

tanhLayer

fullyConnectedLayer(250)

tanhLayer

fullyConnectedLayer(64)

tanhLayer

fullyConnectedLayer(32)

tanhLayer

fullyConnectedLayer(16)

tanhLayer

```
fullyConnectedLayer(8)
```

```
tanhLayer
```

```
fullyConnectedLayer(1)
```

```
tanhLayer
```

```
regressionLayer];
```

Publicaciones y premios

Artículos

1. Cerrotta, S., Morel, E. N., Alvira, F. C. & Torga, J. R. Large axial range frequency-domain optical low coherence interferometry. *IEEE Photonics Technology Letters* **31**, 125–128 (2018).
2. Cerrotta, S., Morel, E. N. & Torga, J. R. Interferencia de anillos con haces gaussianos y esféricos en Cavidades Fabry Perot medianas. *AJEA*. doi:10.33414/ajea.5.655.2020. <https://rtyc.utn.edu.ar/index.php/ajea/article/view/655> (2020).
3. Cusato, L. J., Cerrotta, S., Torga, J. R. & Morel, E. N. Extending low-coherence interferometry dynamic range using heterodyne detection. *Optics and Lasers in Engineering* **131**, 106106 (2020).
4. Vorobioff, J., Cerrotta, S., Morel, N. E. & Amadio, A. Inteligencia Artificial y Redes Neuronales. Fundamentos, Ejercicios y Aplicaciones Con Python y Matlab.” *Buenos Aires*. Obtenido de <https://ria.utn.edu.ar/handle/20.500.12272>, 6113 (2022).
5. Cerrotta, S., Torga, J. R. & Morel, E. N. Long-range frequency domain low-coherence interferometry detector for industrial applications. *JOSA A* **40**, C16–C21 (2023).
6. Cerrotta, S., Torga, J. & Morel, E. Fabry Perot detector for low coherence interferometry. *Óptica Pura y Aplicada* **56** (2023).

Trabajos publicados en congresos

7. Cerrotta, S., Morel, E. N., Torga, J. R. & Alvira, F. C. *Feasibility and analysis of a system of two in tandem interferometers for optical coherence tomography* in *2017 XVII Workshop on Information Processing and Control (RPIC)* (2017), 1–5.
8. Cerrotta, S., Torga, J. R. & Morel, E. N. *Time Fourier Domain Low Coherence Interferometry* in *Optical Coherence Tomography* (2022), JTU3A–15.
9. Cerrotta, S. & Morel, E. N. *Estimación de frecuencias de señales interferométricas con redes neuronales* in *jornadas de Ciencia y Tecnología. Revista AJEA (ACEPTADO)* (2023).

PREMIOS

- Mención especial al poster "Mediciones no invasivas para aplicaciones industriales con la interferencia de baja coherencia", División Industria y Tecnología, Reunión Asociación de Física Argentina 2022.
- Premio INNOVAR (20118-028) "Interferómetro heterodino para tomografía óptica", categoría: investigador, 2018, MINISTERIO DE CIENCIA TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN (MINCYT)

Referencias

1. Saint-Exupéry, A. *El Principito* (Costa Rica: Imprenta Nacional, 2012).
2. Hitzenberger, C. K. Measurement of corneal thickness by low-coherence interferometry. *Applied Optics* **31**, 6637–6642 (1992).
3. Drexler, W., Fujimoto, J. G., *et al.* *Optical coherence tomography: technology and applications* (Springer, 2015).
4. Fercher, A., Mengedocht, K. & Werner, W. Eye-length measurement by interferometry with partially coherent light. *Optics letters* **13**, 186–188 (1988).
5. Huang, D. *et al.* Optical coherence tomography. *science* **254**, 1178–1181 (1991).
6. Puliafito, C. A. *et al.* Imaging of macular diseases with optical coherence tomography. *Ophthalmology* **102**, 217–229 (1995).
7. Pierce, M. C., Strasswimmer, J., Park, B. H., Cense, B. & De Boer, J. F. Advances in optical coherence tomography imaging for dermatology. *Journal of investigative dermatology* **123**, 458–463 (2004).
8. Kume, T. *et al.* Assessment of coronary intima-media thickness by optical coherence tomography comparison with intravascular ultrasound. *Circulation Journal* **69**, 903–907 (2005).
9. Sergeev, A. M. *et al.* In vivo endoscopic OCT imaging of precancer and cancer states of human mucosa. *Optics express* **1**, 432–440 (1997).
10. Fried, D. *et al.* Imaging caries lesions and lesion progression with polarization sensitive optical coherence tomography. *Journal of biomedical optics* **7**, 618–627 (2002).
11. Fujimoto, J. & Swanson, E. The development, commercialization, and impact of optical coherence tomography. *Investigative ophthalmology & visual science* **57**, OCT1–OCT13 (2016).
12. Vakhtin, A. B., Kane, D. J., Wood, W. R. & Peterson, K. A. Common-path interferometer for frequency-domain optical coherence tomography. *Applied optics* **42**, 6953–6958 (2003).
13. Choma, M. A., Hsu, K. & Izatt, J. A. Swept source optical coherence tomography using an all-fiber 1300-nm ring laser source. *Journal of biomedical optics* **10**, 044009–044009 (2005).
14. Grulkowski, I. *et al.* Retinal, anterior segment and full eye imaging using ultrahigh speed swept source OCT with vertical-cavity surface emitting lasers. *Biomedical optics express* **3**, 2733–2751 (2012).
15. Tearney, G. *et al.* Scanning single-mode fiber optic catheter–endoscope for optical coherence tomography. *Optics letters* **21**, 543–545 (1996).
16. Fujimoto, J. G. Optical coherence tomography for ultrahigh resolution in vivo imaging. *Nature biotechnology* **21**, 1361–1367 (2003).
17. Gabriele, M. L. *et al.* Optical coherence tomography: history, current status, and laboratory work. *Investigative ophthalmology & visual science* **52**, 2425–2436 (2011).
18. Liang, H. *et al.* En-face optical coherence tomography—a novel application of non-invasive imaging to art conservation. *Optics Express* **13**, 6133–6144 (2005).

19. Liang, H. *et al.* *Optical coherence tomography for art conservation and archaeology in O3A: Optics for Arts, Architecture, and Archaeology* **6618** (2007), 32–43.
20. Dufour, M., Lamouche, G., Detalle, V., Gauthier, B. & Sammut, P. Low-coherence interferometry—an advanced technique for optical metrology in industry. *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring* **47**, 216–219 (2005).
21. Jonathan, E. Non-contact and non-destructive testing of silicon V-grooves: a non-medical application of optical coherence tomography (OCT). *Optics and lasers in engineering* **44**, 1117–1131 (2006).
22. Sallese, M., Torga, J., Morel, E., Budini, N. & Urteaga, R. Optical coherence tomography measurement of capillary filling in porous silicon. *Journal of Applied Physics* **128**, 024701 (2020).
23. Su, R. *et al.* Perspectives of mid-infrared optical coherence tomography for inspection and micrometrology of industrial ceramics. *Optics express* **22**, 15804–15819 (2014).
24. Gomez, C. *et al.* Optimization of surface measurement for metal additive manufacturing using coherence scanning interferometry. *Optical Engineering* **56**, 111714–111714 (2017).
25. Morel, E. N. & Torga, J. R. *Simultaneous measurement of deformation and thickness change in polymer films* in *Interferometry XIII: Applications* **6293** (2006), 226–233.
26. Cerrotta, S., Morel, E. N. & Torga, J. R. Scanning optical coherence tomography applied to the characterization of surfaces and coatings. *Procedia Materials Science* **9**, 142–149 (2015).
27. Koller, D. M., Hanneschläger, G., Leitner, M. & Khinast, J. Non-destructive analysis of tablet coatings with optical coherence tomography. *European journal of pharmaceutical sciences* **44**, 142–148 (2011).
28. Russo, N. A., Morel, E. N., Torga, J. R. & Duchowicz, R. OCT in Applications That Involve the Measurement of Large Dimensions. *Optical Coherence Tomography and Its Non-medical Applications* **53** (2020).
29. Zhu, D. *et al.* Broadband superluminescent diode-based ultrahigh resolution optical coherence tomography for ophthalmic imaging. *Journal of biomedical optics* **16**, 126006–126006 (2011).
30. Song, H., Cho, S. B., Kim, D. U., Jeong, S. & Kim, D. Y. Ultra-high-speed phase-sensitive optical coherence reflectometer with a stretched pulse supercontinuum source. *Applied Optics* **50**, 4000–4004 (2011).
31. Povazay, B. *et al.* Submicrometer axial resolution optical coherence tomography. *Optics letters* **27**, 1800–1802 (2002).
32. Liu, R., Song, W., Backman, V. & Yi, J. Quantitative quality-control metrics for in vivo oximetry in small vessels by visible light optical coherence tomography angiography. *Biomedical optics express* **10**, 465–486 (2019).
33. Klein, T. & Huber, R. High-speed OCT light sources and systems. *Biomedical optics express* **8**, 828–859 (2017).
34. Wojtkowski, M. *et al.* Ultrahigh-resolution, high-speed, Fourier domain optical coherence tomography and methods for dispersion compensation. *Optics express* **12**, 2404–2422 (2004).

35. Kang, J. *et al.* 102-nm, 44.5-MHz inertial-free swept source by mode-locked fiber laser and time stretch technique for optical coherence tomography. *Optics express* **26**, 4370–4381 (2018).
36. Lan, G. & Li, G. Design of ak-space spectrometer for ultra-broad waveband spectral domain optical coherence tomography. *Scientific reports* **7**, 42353 (2017).
37. Hu, Z., Pan, Y. & Rollins, A. M. Analytical model of spectrometer-based two-beam spectral interferometry. *Applied optics* **46**, 8499–8505 (2007).
38. Cusato, L. J., Cerrotta, S., Torga, J. R. & Morel, E. N. Extending low-coherence interferometry dynamic range using heterodyne detection. *Optics and Lasers in Engineering* **131**, 106106 (2020).
39. Cerrotta, S., Morel, E. N., Alvira, F. C. & Torga, J. R. Large axial range frequency-domain optical low coherence interferometry. *IEEE Photonics Technology Letters* **31**, 125–128 (2018).
40. Lee, Y.-C., Chao, S., Huang, C.-C. & Cheng, K.-C. A compact optical pickup head in blue wavelength with high horizontal stability for laser thermal lithography. *Optics Express* **21**, 23556–23567 (2013).
41. Malm, A., Waigh, T., Jaradat, S. & Tomlin, R. *Optical coherence tomography velocimetry with complex fluids* in *Journal of Physics: Conference Series* **602** (2015), 012039.
42. Dos Santos, V. A. *et al.* CorneaNet: fast segmentation of cornea OCT scans of healthy and keratoconic eyes using deep learning. *Biomedical optics express* **10**, 622–641 (2019).
43. Ji, Q., Huang, J., He, W. & Sun, Y. Optimized deep convolutional neural networks for identification of macular diseases from optical coherence tomography images. *Algorithms* **12**, 51 (2019).
44. Lee, J. H., Shin, J. G., Kim, H. Y. & Lee, B. H. Quantitative discrimination of pearls using polarization-sensitive optical coherence tomography. *Applied Optics* **57**, 2197–2201 (2018).
45. Recher, G., Nassoy, P. & Badon, A. Remote scanning for ultra-large field of view in wide-field microscopy and full-field OCT. *Biomedical optics express* **11**, 2578–2590 (2020).
46. Desjardins, A. *et al.* Angle-resolved optical coherence tomography with sequential angular selectivity for speckle reduction. *Optics express* **15**, 6200–6209 (2007).
47. Wartak, A. *et al.* Investigating spontaneous retinal venous pulsation using Doppler optical coherence tomography. *Scientific reports* **9**, 4237 (2019).
48. Gornushkin, I. B., Smith, B. W., Panne, U. & Omenetto, N. Laser-induced breakdown spectroscopy combined with spatial heterodyne spectroscopy. *Applied spectroscopy* **68**, 1076–1084 (2014).
49. Dadkhah, A. & Jiao, S. Integrating photoacoustic microscopy, optical coherence tomography, OCT angiography, and fluorescence microscopy for multimodal imaging. *Experimental Biology and Medicine* **245**, 342–347 (2020).
50. Hari, N., Patel, P., Ross, J., Hicks, K. & Vanholsbeeck, F. Optical coherence tomography complements confocal microscopy for investigation of multicellular tumour spheroids. *Scientific Reports* **9**, 1–11 (2019).

51. Wahl, D. J., Ju, M. J., Jian, Y. & Sarunic, M. V. Non-invasive cellular-resolution retinal imaging with two-photon excited fluorescence. *Biomedical Optics Express* **10**, 4859–4873 (2019).
52. Kim, S. *et al.* Design and implementation of a low-cost, portable OCT system. *Biomedical optics express* **9**, 1232–1243 (2018).
53. Song, G. *et al.* First clinical application of low-cost OCT. *Translational vision science & technology* **8**, 61–61 (2019).
54. Park, J., Kim, J.-A., Ahn, H., Bae, J. & Jin, J. A review of thickness measurements of thick transparent layers using optical interferometry. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* **20**, 463–477 (2019).
55. Volgger, V. *et al.* Long-range Fourier domain optical coherence tomography of the pediatric subglottis. *International journal of pediatric otorhinolaryngology* **79**, 119–126 (2015).
56. MacDougall, D., Farrell, J., Brown, J., Bance, M. & Adamson, R. Long-range, wide-field swept-source optical coherence tomography with GPU accelerated digital lock-in Doppler vibrography for real-time, in vivo middle ear diagnostics. *Biomedical optics express* **7**, 4621–4635 (2016).
57. Hovell, T., Petzing, J., Justham, L. & Kinnell, P. From light to displacement: A design framework for Optimising spectral-domain low-coherence interferometric sensors for in situ measurement. *Applied Sciences* **10**, 8590 (2020).
58. Leitgeb, R., Hitzenberger, C. & Fercher, A. F. Performance of fourier domain vs. time domain optical coherence tomography. *Optics express* **11**, 889–894 (2003).
59. Hagen-Eggert, M., Koch, P. & Hüttmann, G. *Analysis of the signal fall-off in spectral domain optical coherence tomography systems* in *Optical Coherence Tomography and Coherence Domain Optical Methods in Biomedicine XVI* **8213** (2012), 161–167.
60. Wojtkowski, M., Kowalczyk, A., Leitgeb, R. & Fercher, A. Full range complex spectral optical coherence tomography technique in eye imaging. *Optics letters* **27**, 1415–1417 (2002).
61. Bouchal, P., Bradu, A. & Podoleanu, A. G. Gabor fusion technique in a Talbot bands optical coherence tomography system. *Optics Express* **20**, 5368–5383 (2012).
62. Cerrotta, S., Morel, E. N., Torga, J. R. & Alvira, F. C. *Feasibility and analysis of a system of two in tandem interferometers for optical coherence tomography* in *2017 XVII Workshop on Information Processing and Control (RPIC)* (2017), 1–5.
63. Wang, M. R. *Optical Coherence Tomography and Its Non-medical Applications* (IntechOpen, 2020).
64. Park, H. M., Jung, H. W. & Joo, K.-N. Dual low coherence scanning interferometry for rapid large step height and thickness measurements. *Optics Express* **24**, 28625–28632 (2016).
65. Jonathan, E. Dual reference arm low-coherence interferometer-based reflectometer for optical coherence tomography (OCT) application. *Optics Communications* **252**, 202–211 (2005).
66. Chang, C.-W. & Hsu, I.-J. *Composite low-coherence interferometer for imaging of immersed tissue with high accuracy* in *Interferometry XVI: Techniques and Analysis* **8493** (2012), 79–85.

67. Winarno, A., Masuda, S., Takahashi, S., Matsumoto, H. & Takamasu, K. Non-contact method of point-to-point absolute distance measurement using tandem low-coherence interferometry. *Measurement Science and Technology* **29**, 025006 (2018).
68. Zechel, F., Kunze, R., König, N. & Schmitt, R. H. Optical coherence tomography for non-destructive testing. *tm-Technisches Messen* **87**, 404–413 (2020).
69. Martinez, O. E. *Ondas:Es física* (Eudeba, 2010).
70. Hariharan, P. *Basics of interferometry* (Elsevier, 2010).
71. Hecht, E. *Optics* 4th (Addison Wesley, 2002).
72. De Groot, P. Design of error-compensating algorithms for sinusoidal phase shifting interferometry. *Applied optics* **48**, 6788–6796 (2009).
73. Kraus, M. F. *et al.* Motion correction in optical coherence tomography volumes on a per A-scan basis using orthogonal scan patterns. *Biomedical optics express* **3**, 1182–1199 (2012).
74. Drexler, W. *et al.* Optical coherence tomography today: speed, contrast, and multimodality. *Journal of biomedical optics* **19**, 071412–071412 (2014).
75. Kamp, G. Measurement of intraocular distances by backscattering spectral interferometry. *Optics communications* **117**, 43–48 (1995).
76. Choma, M. A., Sarunic, M. V., Yang, C. & Izatt, J. A. Sensitivity advantage of swept source and Fourier domain optical coherence tomography. *Opt. Express* **11**, 2183–2189. doi:10.1364/OE.11.002183. <https://opg.optica.org/oe/abstract.cfm?URI=oe-11-18-2183> (2003).
77. Dorrer, C., Belabas, N., Likforman, J.-P. & Joffre, M. Spectral resolution and sampling issues in Fourier-transform spectral interferometry. *JOSA B* **17**, 1795–1802 (2000).
78. Chinn, S., Swanson, E. & Fujimoto, J. Optical coherence tomography using a frequency-tunable optical source. *Optics letters* **22**, 340–342 (1997).
79. Liu, A. & Zhang, X. A review of MEMS external-cavity tunable lasers. *Journal of Micromechanics and Microengineering* **17**, R1 (2006).
80. Huber, R., Adler, D. C. & Fujimoto, J. G. Buffered Fourier domain mode locking: unidirectional swept laser sources for optical coherence tomography imaging at 370,000 lines/s. *Optics letters* **31**, 2975–2977 (2006).
81. Britanak, V., Yip, P. C. & Rao, K. R. *Discrete cosine and sine transforms: general properties, fast algorithms and integer approximations* (Elsevier, 2010).
82. Kogelnik, H. & Li, T. Laser beams and resonators. *Proceedings of the IEEE* **54**, 1312–1329. doi:10.1109/PROC.1966.5119 (1966).
83. Marques, D. M. *et al.* Modelling Fabry-Pérot etalons illuminated by focussed beams. *Opt. Express* **28**, 7691–7706. doi:10.1364/OE.382526. <https://opg.optica.org/oe/abstract.cfm?URI=oe-28-5-7691> (2020).
84. Vaughan, M. *The Fabry-Perot interferometer: history, theory, practice and applications* (Routledge, 2017).
85. Jewell, J., Harbison, J., Scherer, A., Lee, Y. & Florez, L. Vertical-cavity surface-emitting lasers: Design, growth, fabrication, characterization. *IEEE Journal of Quantum Electronics* **27**, 1332–1346. doi:10.1109/3.89950 (1991).

86. Steinmetz, T. *et al.* Fabry–Pérot filter cavities for wide-spaced frequency combs with large spectral bandwidth. *Applied Physics B* **96**, 251–256 (2009).
87. Jathoul, A. P. *et al.* Deep in vivo photoacoustic imaging of mammalian tissues using a tyrosinase-based genetic reporter. *Nature Photonics* **9**, 239–246 (2015).
88. Zhang, E., Laufer, J. & Beard, P. Backward-mode multiwavelength photoacoustic scanner using a planar Fabry-Perot polymer film ultrasound sensor for high-resolution three-dimensional imaging of biological tissues. *Applied optics* **47**, 561–577 (2008).
89. Hunger, D. *et al.* A fiber Fabry–Perot cavity with high finesse. *New Journal of Physics* **12**, 065038 (2010).
90. Aasi, J. *et al.* Advanced ligo. *Classical and quantum gravity* **32**, 074001 (2015).
91. Vorobioff, J., Cerrotta, S., Morel, N. E. & Amadio, A. Inteligencia Artificial y Redes Neuronales. Fundamentos, Ejercicios y Aplicaciones Con Python y Matlab.” Buenos Aires. Obtenido de <https://ria.utn.edu.ar/handle/20.500.12272>, 6113 (2022).
92. Géron, A. *Hands-on machine learning with Scikit-Learn, Keras, and TensorFlow* (“ O’Reilly Media, Inc.”, 2022).
93. Kiranyaz, S. *et al.* 1D convolutional neural networks and applications: A survey. *Mechanical systems and signal processing* **151**, 107398 (2021).
94. Albawi, S., Mohammed, T. A. & Al-Zawi, S. *Understanding of a convolutional neural network in 2017 international conference on engineering and technology (ICET)* (2017), 1–6.
95. Khan, S. *et al.* *A guide to convolutional neural networks for computer vision* **1** (Springer, 2018).
96. Ioffe, S. & Szegedy, C. *Batch normalization: Accelerating deep network training by reducing internal covariate shift in International conference on machine learning* (2015), 448–456.
97. Routray, A., Pradhan, A. K. & Rao, K. P. A novel Kalman filter for frequency estimation of distorted signals in power systems. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* **51**, 469–479 (2002).
98. Orović, I., Stanković, S., Thayaparan, T. & Stanković, L. Multiwindow S-method for instantaneous frequency estimation and its application in radar signal analysis. *IET Signal Processing* **4**, 363–370 (2010).
99. Mršnik, M., Slavič, J. & Boltežar, M. Frequency-domain methods for a vibration-fatigue-life estimation–application to real data. *International journal of fatigue* **47**, 8–17 (2013).
100. Belega, D. & Dallet, D. Frequency estimation via weighted multipoint interpolated DFT. *IET Science, Measurement & Technology* **2**, 1–8 (2008).
101. Yardibi, T., Li, J., Stoica, P., Xue, M. & Baggeroer, A. B. Source localization and sensing: A nonparametric iterative adaptive approach based on weighted least squares. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* **46**, 425–443 (2010).
102. Martinez-Montejano, R. *et al.* Phase Locked Loop based on adaptive observer. *International Review of Electrical Engineering* **9**, 244–248 (2014).

103. Yu, D. & Deng, L. Deep learning and its applications to signal and information processing [exploratory dsp]. *IEEE Signal Processing Magazine* **28**, 145–154 (2010).
104. Narayanan, A. & Wang, D. *Ideal ratio mask estimation using deep neural networks for robust speech recognition* in *2013 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing* (2013), 7092–7096.
105. Lai, L., Chan, W., Tse, C. & So, A. Real-time frequency and harmonic evaluation using artificial neural networks. *IEEE Transactions on power delivery* **14**, 52–59 (1999).
106. Gao, X., Jin, S., Wen, C.-K. & Li, G. Y. ComNet: Combination of deep learning and expert knowledge in OFDM receivers. *IEEE Communications Letters* **22**, 2627–2630 (2018).
107. Sajedian, I. & Rho, J. Accurate and instant frequency estimation from noisy sinusoidal waves by deep learning. *Nano convergence* **6**, 1–5 (2019).
108. Almayyali, H. R. & Hussain, Z. M. Deep learning versus spectral techniques for frequency estimation of single tones: Reduced complexity for software-defined radio and IoT sensor communications. *Sensors* **21**, 2729 (2021).
109. Xu, S. & Shimodaira, H. *Direct F0 Estimation with Neural-Network-Based Regression*. in *INTERSPEECH* (2019), 1995–1999.
110. Chen, X., Jiang, Q., Su, N., Chen, B. & Guan, J. *Lfm signal detection and estimation based on deep convolutional neural network* in *2019 Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (AP-SIPA ASC)* (2019), 753–758.
111. Idoko, D. Signal parameter estimation of damped sinusoidal waveforms using deep learning (2022).
112. Sábato, J. & Botana, N. *La ciencia y la tecnología en el desarrollo futuro de América Latina* (1970).
113. Giddens, A. *The constitution of society: Outline of the theory of structuration* (Univ of California Press, 1986).
114. Kurzweil, R. *The singularity is near* (Springer, 2014).
115. Credit Suisse. *Global Wealth Report 2020* <https://www.credit-suisse.com/about-us/en/reports-research/global-wealth-report.html>. 2020.
116. Sly, M. J. H. La política científica y tecnológica de China y la cooperación sino-argentina. *Ciencia, tecnología y política* **2**, 029–029 (2019).
117. Thomas, H. Tecnologías para la inclusión social en América Latina: de las tecnologías apropiadas a los sistemas tecnológicos sociales. Problemas conceptuales y soluciones estratégicas. *Tecnología, desarrollo y democracia. Nueve estudios sobre dinámicas socio-técnicas de exclusión/inclusión social*, 25–78 (2012).
118. Albornoz, M. *et al.* Política científica y tecnológica en Argentina. *Temas de Iberoamérica: Globalización, Ciencia y Tecnología* **2** (2004).
119. Codner, D. G. & Perrotta, R. M. Blind technology transfer process from Argentina. *Journal of technology management & innovation* **13**, 47–53 (2018).
120. Thomas, H. Sistemas tecnológicos sociales y ciudadanía socio-técnica. Innovación, desarrollo, democracia. *Culturas Científicas y Alternativas Tecnológicas. Buenos Aires: Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva de la Nación*, 65–86 (2009).

121. Herrera, D. C. F. El modelo Canvas en la formulación de proyectos. *Cooperativismo & desarrollo* **23** (2015).
122. Handbook, D. G. *Newport Corporation* 2005.
123. Wang, L. *et al.* Design and optimization of a spectrometer for high-resolution SD-OCT. *Laser Physics Letters* **16**, 045603 (2019).
124. Sherstnev, E. P., Shilyagin, P. A., Terpelov, D. A., Gelikonov, V. M. & Gelikonov, G. V. *An Improved Analytical Model of a Spectrometer for Optical Coherence Tomography in Photonics* **8** (2021), 534.
125. Cusato, L. J., Morel, E. N. & Torga, J. R. *Preliminary study of a heterodyne detection system for optical coherence tomography signals in 2019 XVIII Workshop on Information Processing and Control (RPIC)* (2019), 193–197.
126. Morel, E., Tabla, P., Sallese, M. & Torga, J. *Reduction of measurement errors in OCT scanning in 2nd Canterbury Conference on OCT with Emphasis on Broadband Optical Sources* **10591** (2018), 165–169.
127. Morel, E. N. & Torga, J. R. in *Interferometry-Research and Applications in Science and Technology* (IntechOpen, 2012).
128. Velik, R. *Discrete fourier transform computation using neural networks in 2008 International Conference on Computational Intelligence and Security* **1** (2008), 120–123.
129. Quintanilla, M. *Tecnologías entrañables. Sin Permiso (Blog)* 2009.
130. Cerrotta, S., Torga, J. & Morel, E. Fabry Perot detector for low coherence interferometry. *Óptica Pura y Aplicada* **56** (2023).
131. Eom, T. J. *et al.* *Narrowband wavelength selective detector applicable SD-OCT based on Fabry-Perot tunable filter and balanced photoreceiver in Coherence Domain Optical Methods and Optical Coherence Tomography in Biomedicine XII* (eds Izatt, J. A., Fujimoto, J. G. & Tuchin, V. V.) **6847** (SPIE, 2008), 68470R. doi:[10.1117/12.766436](https://doi.org/10.1117/12.766436). <https://doi.org/10.1117/12.766436>.
132. Cerrotta, S., Morel, E. N. & Torga, J. R. Interferencia de anillos con haces gaussianos y esféricos en Cavidades Fabry Perot medianas. *AJEA*. doi:[10.33414/ajea.5.655.2020](https://doi.org/10.33414/ajea.5.655.2020). <https://rtyc.utn.edu.ar/index.php/ajea/article/view/655> (2020).
133. Visser, T. & Wolf, E. The origin of the Gouy phase anomaly and its generalization to astigmatic wavefields. *Optics Communications* **283**, 3371–3375. ISSN: 0030-4018. doi:<https://doi.org/10.1016/j.optcom.2010.04.099>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030401810004402> (2010).
134. Abu-Safia, H., Al-Tahtamouni, R., Abu-Aljarayesh, I. & Yusuf, N. A. Transmission of a Gaussian beam through a Fabry–Perot interferometer. *Appl. Opt.* **33**, 3805–3811. doi:[10.1364/AO.33.003805](https://doi.org/10.1364/AO.33.003805). <https://opg.optica.org/ao/abstract.cfm?URI=ao-33-18-3805> (1994).
135. Feng, S. & Winful, H. G. Physical origin of the Gouy phase shift. *Opt. Lett.* **26**, 485–487. doi:[10.1364/OL.26.000485](https://doi.org/10.1364/OL.26.000485). <https://opg.optica.org/ol/abstract.cfm?URI=ol-26-8-485> (2001).
136. Hwang, J. & Moerner, W. Interferometry of a single nanoparticle using the Gouy phase of a focused laser beam. *Optics Communications* **280**, 487–491. ISSN: 0030-4018. doi:<https://doi.org/10.1016/j.optcom.2007.08.032>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030401807008462> (2007).

137. Cerrotta, S., Torga, J. R. & Morel, E. N. *Time Fourier Domain Low Coherence Interferometry in Optical Coherence Tomography* (2022), JTU3A–15.
138. Erdélyi, A., Magnus, W., Oberhettinger, F. & Tricomi, F. G. *Tables of Integral Transforms Vol. I* (New York, NY: McGraw-Hill Book Company, Inc., 1954).
139. Jakes, W. C. *Microwave Mobile Communications* 2nd (IEEE Press, 1974).
140. Exton, H. *Multiple Hypergeometric Functions and Applications* (New York: Wiley, 1976).
141. Srivastava, H. M. & Karlsson, P. K. *Multiple Gaussian Hypergeometric Series* (New York, NY: John Wiley & Sons, 1985).
142. Prudnikov, A. P., Brychkov, Y. A. & Marichev, O. I. *Integrals and Series* 4th (Gordon and Breach Science Publishers, 1986).
143. Lee, W. C. Y. *Mobile Communications Engineering: Theory and Applications* 2nd (New York: McGraw-Hill, 1998).
144. Gradshteyn, I. S. & Ryzhik, I. M. *Table of Integrals, Series, and Products* 7th (New York: Academic Press, 2007).
145. Simon, M. K. *Probability Distributions Involving Gaussian Random Variables, A Handbook for Engineers and Scientists* 1st (New York, NY, USA: Springer, 2006).
146. Biglieri, E. *et al.* *MIMO Wireless Communications* 1st (Cambridge University Press, 2006).
147. Proakis, J. G. *Digital Communications* 4th (New York: McGraw-Hill, 2001).
148. Proakis, J. G. & Salehi, M. *Fundamentals of Communication Systems* 1st (Pearson, 2006).
149. Stüber, G. L. *Principles of Mobile Communication* 2nd (Kluwer, 2001).
150. Papoulis, A. & Pillai, S. U. *Probability, Random Variables And Stochastic Processes* 4th (New York: McGraw-Hill, 2004).
151. Boyd, S. & Vandenberghe, L. *Convex Optimization* 1st (Cambridge University Press, 2004).
152. Simon, M. K. & Alouini, M.-S. *Digital Communication over Fading Channels* 2nd (New York, NY, USA: Wiley, 2005).
153. Tse, D. & Viswanath, P. *Fundamentals of Wireless Communication* 1st (Cambridge University Press, 2005).
154. Liu, K. J. R., Sadek, A. K., Su, W. & Kwasinski, A. *Cooperative Communications and Networking* (New York, NY: Cambridge University Press, 2008).
155. Rappaport, T. S. *Wireless Communications: Principles and Practice* 2nd ed. (Pearson, 2010).
156. Subadar, R. *Performance Analysis of Diversity Combining Receivers Over Hoyt, η - μ and κ - μ Fading Channels* 2nd ed. (Ph. D. thesis, IIT Guwahati, Assam, India, 2011).
157. Hoyt, R. S. Probability functions for the modulus and angle of the normal complex variate. *Bell Syst. Tech. J.* **26**, 318–359. ISSN: 0005-8580. doi:[10.1002/j.1538-7305.1947.tb01318.x](https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1947.tb01318.x) (Apr. 1947).
158. Akyildiz, I. F., Pompili, D. & Melodia, T. Underwater Acoustic Sensor Networks: Research Challenges. *Ad Hoc Networks* **3**, 257–279 (2005).

159. Mao, X., Miao, X., He, Y., Li, X.-Y. & Liu, Y. *CitySee: Urban CO₂ monitoring with sensors* in *Proceedings of IEEE INFOCOM* (Orlando, FL, USA, 2012), 1611–1619.
160. Basu, H. S., Bahga, S. S. & Kondaraju, S. A fully coupled hybrid lattice Boltzmann and finite difference method-based study of transient electrokinetic flows. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* **476**, 20200423. doi:[10.1098/rspa.2020.0423](https://doi.org/10.1098/rspa.2020.0423) (2020).
161. Hovell, T., Matharu, R. S., Petzing, J., Justham, L. & Kinnell, P. Lensless fiber-deployed low-coherence interferometer for in-situ measurements in nonideal environments. *Optical Engineering* **59**, 014113–014113 (2020).
162. Meemon, P. *et al.* Optical coherence tomography enabling non destructive metrology of layered polymeric GRIN material. *Scientific reports* **3**, 1709 (2013).
163. Song, G., Jelly, E. T., Chu, K. K., Kendall, W. Y. & Wax, A. A review of low-cost and portable optical coherence tomography. *Progress in Biomedical Engineering* **3**, 032002 (2021).
164. Wisniowiecki, A. M. & Applegate, B. E. *Frequency Mixing for Long, Variable Working Distance OCT* in *Optical Coherence Tomography* (2022), CM2E–2.
165. Shu, X., Beckmann, L. & Zhang, H. F. Visible-light optical coherence tomography: a review. *Journal of biomedical optics* **22**, 121707–121707 (2017).
166. Gómez, R. J. La dimensión valorativa de las ciencias. Hacia una filosofía política. *TECNOLOGIA & SOCIEDAD*, 81 (2014).
167. Razzaq, H. S. & Hussain, Z. M. Instantaneous Frequency Estimation of FM Signals under Gaussian and Symmetric α -Stable Noise: Deep Learning versus Time-Frequency Analysis. *Information* **14**, 18 (2023).
168. Pelletier, C., Webb, G. I. & Petitjean, F. Temporal convolutional neural network for the classification of satellite image time series. *Remote Sensing* **11**, 523 (2019).