

Índice

Índice de figuras	8
Índice de tablas	9
Lista de abreviaturas y siglas	10
Agradecimientos	13
1. Introducción	15
1.1. El tiempo y su medida	15
1.2. Relojes ópticos	17
1.2.1. Historia	17
1.2.2. Fundamentos	17
1.2.3. Anclaje del oscilador óptico: células de absorción	19
1.2.3.1. Estabilización por absorción simple y absorción saturada	20
1.2.4. Aplicaciones	21
1.3. Peines de frecuencias ópticos	22
1.3.1. Orígenes	22
1.3.2. Principios de funcionamiento	23
1.4. Objetivos	27
2. Caracterización de una célula de absorción	28
2.1. Elementos utilizados	28
2.1.1. Láser sintonizable de cavidad externa (TECL)	28
2.1.2. Medidor de longitud de onda y medidor de potencia	29
2.1.3. Célula de absorción de $H^{12}C^{14}N$, $^{12}C^{16}O$ y $^{13}C^{16}O$	29
2.2. Montaje experimental	31
2.3. Resultados de la calibración	32
2.4. Incertidumbre en la calibración de la célula	37
2.5. Discusión y corrección por presión y temperatura	38
3. Caracterización de un reloj óptico	45
3.1. Elementos utilizados	45
3.1.1. Láser de diodo DFB: generación de la señal	45
3.1.2. Peine de frecuencias: detección de la señal	46
3.1.2.1. Láser mode-locked de fibra dopada con erbio en anillo	48
3.1.2.2. Unidad de estabilización	49
3.1.2.3. Unidad de batido	50
3.2. Anclado y estabilización en el flanco de la absorción en $H^{12}C^{14}N$	51
3.2.1. Montaje experimental	51
3.2.2. Resultados de la caracterización del láser DFB en el IO-FFC	51
3.3. Anclado y estabilización en el flanco de la absorción saturada en $H^{12}C^{14}N$	54
3.3.1. Montaje experimental	54
4. Conclusiones	56
Anexos	59
A. Caracterización de la inestabilidad de la señal reloj: la varianza de Allan	57
B. Cálculo de incertidumbres	59
5. Bibliografía	63

Índice de figuras

Figura 1: Diagrama esquemático de un reloj óptico	18
Figura 2: Tres pulsos consecutivos de un tren de pulsos emitidos por un láser en <i>mode-locking</i> y su correspondencia en el dominio de las frecuencias [18].....	24
Figura 3: Determinación de la f_{CEO} mediante batido heterodino de dos armónicos.	26
Figura 4: Espectro medido en el <i>ESA</i> del oscilador láser en <i>mode-locked</i> , y del batido del láser a medir.....	26
Figura 5: Determinación de los signos de las frecuencias incógnitas de la ecuación de un OFC (5).....	27
Figura 6: Láseres <i>TECL</i> TUNICS-Plus Photonetics y TUNICS-Plus GN Netttest usados	28
Figura 7: Láser de cavidad externa afectado por “ <i>mode hopping</i> ”.....	29
Figura 8: Medidor de longitud de onda EXFO WA-1650 (abajo) y medidor de potencia EXFO PM-1600 (arriba).....	29
Figura 9: Espectro de transmisión de la célula de $H^{12}C^{14}N$, $^{12}C^{16}O$ y $^{13}C^{16}O$ [21].	30
Figura 10: Célula de gases de absorción Tri-H(80)-5/150/150-FCAPC de Wavelength References, compuesta de $H^{12}C^{14}N$, $^{12}C^{16}O$ y $^{13}C^{16}O$	30
Figura 11: Espectro de absorción del cianuro de hidrógeno ($H^{12}C^{14}N$), donde pueden verse las dos ramas R y P.....	31
Figura 12: Esquema del montaje para la calibración de la célula.....	32
Figura 13: Espectro de las líneas de la célula de absorción de $H^{12}C^{14}N$, el $^{12}C^{16}O$ y $^{13}C^{16}O$	32
Figura 14: Líneas de absorción de las ramas R y P del $H^{12}C^{14}N$, con un total de 50 líneas.....	33
Figura 15: Líneas de absorción de las ramas R y P del $^{12}C^{16}O$, con un total de 37 líneas.....	33
Figura 16: Líneas de absorción de las ramas R y P del $^{13}C^{16}O$, con un total de 35 líneas.....	33
Figura 17: Diferencias entre las longitudes de onda medidas y las de referencia para las ramas R y P del $H^{12}C^{14}N$	35
Figura 18: Diferencias entre las longitudes de onda medidas y las de referencia para las ramas R y P del $^{12}C^{16}O$	36
Figura 19: Diferencias entre las longitudes de onda medidas y las de referencia para las ramas R y P del $^{13}C^{16}O$	37
Figura 20: Variación relativa (pm/kPa) para $^{12}C^{16}O$ y $^{13}C^{16}O$ para cada línea de absorción medida en el NIST.....	40
Figura 21: Resultado de la corrección de presión a la rama R del $^{12}C^{16}O$	41
Figura 22: Resultado de la corrección de presión a la rama P del $^{12}C^{16}O$	41
Figura 23: Resultado de la corrección de presión a la rama R del $^{13}C^{16}O$	42
Figura 24: Resultado de la corrección de presión a la rama P del $^{13}C^{16}O$	43
Figura 25: Sintonización en longitud de onda (nm) en función de la intensidad de corriente (mA) a una temperatura de 25 °C.	45
Figura 26: Espectro de emisión del diodo láser para una intensidad de corriente de 250 mA y una temperatura de 30 °C.	45
Figura 27: Diodo láser DFB EP1542.....	45
Figura 28: Fuente de alimentación ILX.....	45
Figura 29: Vista general del laboratorio de metrología de frecuencias y procesos no lineales en fibras ópticas, en particular el IO-CSIC [31].	46
Figura 30: Esquema general del peine de frecuencias auto-referenciado del IO-CSIC.	46

Figura 31: Diagrama de bloques del IO-FFC y equipos auxiliares [18].	47
Figura 32: Monitorización de la f_{CEO} y la f_{rep} para la posterior estabilización del IO-FFC.	48
Figura 33: Oscilador principal y salidas amplificadas del láser <i>mode-locked</i> de Er:fibra en anillo.	48
Figura 34: Unidad de estabilización del IO-FFC.	49
Figura 35: Unidad de batido del IO-FFC.	50
Figura 36: Anclado y estabilización del láser <i>DFB</i> por absorción en la línea P10 (1541.2711 nm) del $H^{12}C^{14}N$.	51
Figura 37: Línea P10 del $H^{12}C^{14}N$ medida durante la calibración con el medidor de longitud de onda (negro) con ajuste gaussiano (rojo).	52
Figura 38: Espectro de la emisión de supercontinuo del IO-FFC visualizado en el <i>OSA</i> .	52
Figura 39: Batido del láser <i>DBF</i> sobre un filtro (~ 10 MHz) de la emisión de supercontinuo del IO-FFC.	53
Figura 40: Estabilidad del láser <i>DFB</i> Eblana Photonics 1542 para un tiempo de 63 s.	53
Figura 41: Anclado y estabilización del láser <i>DFB</i> por absorción saturada en la línea P10 (1541.2711 nm) del $H^{12}C^{14}N$.	55
Figura 42: Diagrama Sigma - Tau. Pendientes en ley de potencia en el dominio del tiempo, producidas al usar la raíz cuadrada positiva de la AVAR [34].	58
Figura 43: Distribuciones típicas de probabilidad usadas para el cálculo de incertidumbres.	61

Índice de tablas

Tabla I: La mejora de la cronometría a lo largo de los siglos. Se muestra el tiempo que debe transcurrir para que se produzca un error de 1 segundo [1].	16
Tabla II: Valores medidos y de referencia, así como las diferencias de estos correspondientes a las ramas R y P del $H^{12}C^{14}N$.	34
Tabla III: Valores medidos y de referencia, así como las diferencias de estos correspondientes a las ramas R y P del $^{12}C^{16}O$.	35
Tabla IV: Valores medidos y de referencia, así como las diferencias de estos correspondientes a las ramas R y P del $^{13}C^{16}O$.	36
Tabla V: Incertidumbres asociadas al proceso de calibración de la célula de absorción $H^{12}C^{14}N$, el $^{12}C^{16}O$ y $^{13}C^{16}O$.	38
Tabla VI: Comparación entre las presiones parciales en las células de referencia usadas (incluida su referencia bibliográfica) y la célula bajo calibración.	39
Tabla VII: Resultado de la corrección de presión a la rama R del $^{12}C^{16}O$.	40
Tabla VIII: Resultado de la corrección de presión a la rama P del $^{12}C^{16}O$.	41
Tabla IX: Resultado de la corrección de presión a la rama R del $^{13}C^{16}O$.	42
Tabla X: Resultado de la corrección de presión a la rama P del $^{13}C^{16}O$.	43
Tabla XI: Comparación entre las presiones parciales en las células de referencia usadas (incluida su referencia bibliográfica) y la célula bajo calibración.	43
Tabla XII: Valores promediados de las frecuencias incógnitas de (5) y frecuencia del láser obtenida mediante el IO-FFC.	54
Tabla XIII: Valor del factor de cobertura k que proporciona un intervalo correspondiente a un nivel de confianza, suponiendo una distribución normal.	60