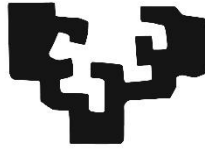


eman ta zabal zazu



Universidad
del País Vasco

Euskal Herriko
Unibertsitatea

TRABAJO DE FIN DE MASTER

MODELADO TEÓRICO Y EXPERIMENTAL DE SENSORES ÓPTICOS PARA LA MEDIDA DE TIP CLEARANCE EN TURBINAS

Josu Amorebieta Herrero

**Máster Universitario en Ingeniería de
Telecomunicación**

Dirigido por Joseba Zubia Zaballa

Curso 2015-2016



Ingeniaritza Goi Eskola Teknikoa
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Bilbao

ÍNDICE

1. RESUMEN	5
2. LISTA DE TABLAS	6
3. LISTA DE ILUSTRACIONES	9
4. LISTA DE ACRÓNIMOS	14
5. MEMORIA.....	15
5.1. Objetivos y alcance del trabajo.....	15
5.2. Beneficios que aporta el trabajo.....	16
5.2.1. Contribuciones técnicas.....	16
5.2.2. Contribuciones económicas.....	17
5.3. Estado del arte	17
5.4. Análisis de alternativas	18
5.4.1. Sensores capacitivos	18
5.4.2. Sensores de corriente de inducción o corriente de Foucault	19
5.4.3. Sensores de microondas.....	19
5.4.4. Sensores de fibra óptica.....	20
5.4.5 Criterios de selección	21
5.4.6. Comparativa y conclusión	22
5.5. Análisis de riesgos.....	23
5.5.1. Problemas a la hora de comprender el modelo de sensor a modelar.....	24
5.5.2. Problemas de programación del modelo del sensor.....	24
5.5.3. Problemas de suministro de equipamiento necesario para el proyecto.....	24
5.5.4. Averías de instrumentos necesarios para el proyecto.....	25
5.5.5. Bajas por enfermedad u otros compromisos	25
5.5.6. Matriz del análisis de riesgos.....	25
6. METODOLOGÍA	27
6.1. Descripción de tareas, fases, equipos o procedimientos.....	27

6.2. Cronograma.....	30
7. CÁLCULOS.....	32
7.1. Familiarización	32
7.2. Programa de simulación	32
7.2.1. Objetivos de la toma de medidas reales.....	32
7.2.2. Instalaciones en las que se han realizado las medidas y montaje para las medidas.....	33
7.2.3. Método de medición utilizado	46
7.2.4. Condiciones de medición teniendo en cuenta los equipos que van dentro de la cámara climática.....	49
7.2.5. Programa de medidas llevado a cabo.....	50
7.2.6. Resultados de las medidas experimentales.....	52
7.2.7. Conclusiones de los resultados de las medidas.....	84
7.2.8. Conclusiones para el programa de simulación.....	85
7.2.9. Planteamiento matemático teórico seguido para el programa de simulación	86
7.2.10. Resultados de medidas con espejo (Caso ideal).....	89
7.2.11. Comparación de simulación y caso ideal	95
7.2.12. Caracterización de los fotodetectores.....	96
7.2.13. Caracterización de los parámetros que modelan el radio del haz de luz emitido por el láser a la salida de la fibra transmisora.....	104
7.2.14. Comparación entre simulación y resultados experimentales con álabe	105
7.3. Estudio de la rugosidad del objetivo, ángulo de incidencia, cabeceo y reflectividad	112
7.3.1. Estudio de la rugosidad del objetivo.....	112
7.3.2. Estudio del ángulo de incidencia y el cabeceo	120
7.4. Estudio de la sensibilidad.....	135
8. ASPECTOS ECONÓMICOS.....	137
8.1. Coste unitario	137
8.1.1. Recursos humanos.....	137

8.1.2. Recursos materiales.....	137
8.1.3. Otros gastos	139
8.2. Cálculo del presupuesto	139
8.2.1. Recursos humanos.....	140
8.2.2. Recursos materiales.....	140
8.2.3. Otros gastos	142
8.3. Presupuesto o resumen económico	142
9. CONCLUSIONES	144
10. REFERENCIAS.....	145
ANEXO I: MATERIAL PARA LAS MEDICIONES DEL PROYECTO	149
ANEXO II: PROGRAMA DE LABVIEW UTILIZADO EN LAS MEDIDAS	163
ANEXO III: PLIEGO DE CONDICIONES/NORMATIVA APLICABLE	165
ANEXO IV: CÓDIGO FUENTE	176

1. RESUMEN

En este documento se recopila toda la información, tanto de investigación como de resultados, referente al Trabajo de Fin de Máster que se ha llevado a cabo. El resultado final ha sido un programa que simula el funcionamiento de un sensor de fibra óptica y que puede ser utilizado para aplicaciones concretas como detección de impactos, vibraciones o distancias. Concretamente el grupo de fotónica aplicada viene aplicándolo en la medición del Tip Clearance en turbinas aeronáuticas. Dicho parámetro se define como la distancia entre el extremo de los álabes y la carcasa de la turbina. El desarrollo del mismo se ha visto dividido en varias partes de modo que se caracterizase de la mejor forma posible el sensor. Para ello, se ha caracterizado el sensor de forma experimental a distintas temperaturas, en función del ángulo de incidencia y en función de la reflectividad del objetivo. Finalmente, se ha llevado a cabo un estudio de la sensibilidad del sensor en función de diferentes procesados de las señales recogidas.

Through this document, all the information regarding the project of end of master's project that has been developed is gathered, including research as well as results. The final output has been a program that simulates the operation of an optical fibre bundle sensor that can be used for specific applications as impact or vibration detection and distance measurement. In particular, in the Applied Photonics Group it has been applied for Tip Clearance measurement in aeronautic turbines. This magnitude refers to the gap between the end of the blades and the framework of the turbine. The development of the project has been divided in different parts in order to be able to characterize the sensor as best as possible. To achieve this, measurements have been made at different temperatures, at different incidence angles and with objects with different reflectivity. Finally, the sensor's sensitivity has been studied as well by processing the received signals in different ways.

Idazki honetan bildu egiten da Master amaierako proiektuan egindako lan guztia, bai ikerketaren aldetik eta emaitzen aldetik ere bai. Emaitza finala programa bat izan da, non programa horrek zuntz optikoz egindako sentsore baten funtzionamendua simulatzen duen, eta aplikazio zehatzentzako baliagarria izan ahal dena. Adibidez, talka eta bibrazioak detektatzeko, distantziak neurtzeko eta abar. Hain zuzen ere, Aplikatutako Fotonika Taldean mota honetako sentsoreak erabili dira Tip Clearance magnitudea neurtzeko turbina aeronautikoetan. Magnitude honek turbinetako besoen eta karkasaren arteko distantzia adierazten du. Proiektuaren garapena zati desberdinetan banandu da sentsorearen izaera ahalik eta hoberen karakteriza daiten. Helburu hori lortzeko, neurketa esperimetralak burutu dira tenperatura desberdinetan, eraso angeluaren arabera eta objektuaren erreflektibitatearen arabera. Azkenekoz, sentsorearen sentsibilitatea ikertu da biltzen diren seinaleak prozesatu ondoren.

2. LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Resultado de la comparativa	23
Tabla 2: Matriz de análisis de riesgos	26
Tabla 3: Diagrama de Gantt/Cronograma del proyecto.....	31
Tabla 4: Resultados para 10-30, láser 1 y bundle trifurcado.....	55
Tabla 5: Tabla de distancias de la región I.....	55
Tabla 6: Tabla de distancias de la región II.....	56
Tabla 7: Resultados para 20-20, láser 1 y bundle trifurcado.....	59
Tabla 8: Tabla de distancias de la región I.....	59
Tabla 9: Tabla de distancias de la región II.....	59
Tabla 10: Resultados para 10-30, láser 1 y bundle cuatrifurcado	62
Tabla 11: Tabla de distancias de la región I.....	62
Tabla 12: Tabla de distancias de la región II.....	63
Tabla 13: Resultados para 10-40, láser 1 y bundle cuatrifurcado	65
Tabla 14: Tabla de distancias de la región I.....	65
Tabla 15: Tabla de distancias de la región II.....	66
Tabla 16: Resultados para 0-40, láser 1 y bundle cuatrifurcado	68
Tabla 17: Tabla de distancias de la región I.....	68
Tabla 18: Tabla de distancias de la región II.....	69
Tabla 19: Resultados para 20-20, láser 1 y bundle cuatrifurcado	71
Tabla 20: Tabla de distancias de la región I.....	71
Tabla 21: Tabla de distancias de la región II.....	72
Tabla 22: Resultados para 10-30, láser 2 y bundle cuatrifurcado	75
Tabla 23: Tabla de distancias de la región I.....	75
Tabla 24: Tabla de distancias de la región II.....	75
Tabla 25: Resultados para 20-20, láser 2 y bundle cuatrifurcado	78
Tabla 26: Tabla de distancias de la región I.....	78
Tabla 27: Tabla de distancias de la región II.....	78
Tabla 28: Resumen	79
Tabla 29: Resultados de la suma.....	80
Tabla 30: Datos de los ensayos donde solo cambia el láser	81
Tabla 31: Resultados entre bundles diferentes	82
Tabla 32: Resultados si solo cambia la ganancia	83
Tabla 33: Resultados de la suma.....	84
Tabla 34: Parámetros del caso ideal	90
Tabla 35: Trifurcado, 20-20, láser 1, espejo.....	90
Tabla 36: Tabla de pendientes	91

Tabla 37: Trifurcado, 10-30, láser 1, espejo.....	91
Tabla 38: Tabla de pendientes	92
Tabla 39: Cuatrifurcado, 20-20, láser 1, espejo.....	92
Tabla 40: Cuatrifurcado, 20-20, láser 1, espejo.....	93
Tabla 41: Cuatrifurcado, 10-30, láser 1, espejo.....	93
Tabla 42: Cuatrifurcado, 10-30, láser 1, espejo.....	94
Tabla 43: Cuatrifurcado, 0-40, láser 1, espejo.....	95
Tabla 44: Cuatrifurcado, 0-40, láser 1, espejo.....	95
Tabla 45: Diferencia entre pendientes experimental y curva de simulación.....	95
Tabla 46: Resultados de las mediciones	99
Tabla 47: Resultado de las medidas	101
Tabla 48: Resultados de las mediciones	102
Tabla 49: Comparativa de mediciones.....	103
Tabla 50: Parámetros del radio de campo óptico.....	105
Tabla 51: Diferencia en distancia para 20-20 y trifurcado.....	106
Tabla 52: Diferencia de pendientes	106
Tabla 53: Diferencia de distancias	107
Tabla 54: Diferencia de pendientes	107
Tabla 55: Diferencia de distancias.....	108
Tabla 56: Diferencia de pendientes	108
Tabla 57: Diferencia de distancias.....	109
Tabla 58: Diferencia de pendientes	109
Tabla 59: Diferencia de distancias.....	110
Tabla 60: Diferencia de pendientes	110
Tabla 61: Diferencia de distancias.....	111
Tabla 62: Diferencia de pendientes	111
Tabla 63: Relación entre grit y otras magnitudes de medición	112
Tabla 64: Tabla de distancias.....	116
Tabla 65: Tabla de pendientes	116
Tabla 66: Tabla de distancias.....	117
Tabla 67: Tabla de pendientes	117
Tabla 68: Tabla de distancias.....	118
Tabla 69: Tabla de pendientes	119
Tabla 70: Calibración para desplazamiento horizontal.....	121
Tabla 71: Calibración para desplazamiento vertical	121
Tabla 72: Calibración para desplazamiento mixto	122
Tabla 73: Tabla de distancias máximas.....	122
Tabla 74: Calibración para desplazamiento horizontal.....	123

Tabla 75: Calibración para desplazamiento vertical	124
Tabla 76: Calibración para desplazamiento mixto	125
Tabla 77: Tabla de distancias máximas.....	125
Tabla 78: Calibración para desplazamiento horizontal.....	126
Tabla 79: Calibración para desplazamiento vertical	127
Tabla 80: Calibración para desplazamiento mixto	128
Tabla 81: Tabla de distancias máximas.....	128
Tabla 82: Calibración para desplazamiento horizontal.....	129
Tabla 83: Calibración para desplazamiento vertical	130
Tabla 84: Calibración para desplazamiento mixto	131
Tabla 85: Tabla de distancias máximas.....	131
Tabla 86: Calibración para desplazamiento horizontal.....	132
Tabla 87: Calibración para desplazamiento vertical	133
Tabla 88: Calibración para desplazamiento mixto	134
Tabla 89: Tabla de distancias máximas.....	134
Tabla 90: Coste unitario de personal involucrado en el proyecto.....	137
Tabla 91: Coste unitario del material amortizable	139
Tabla 92: Coste de personal por fase y coste total de personal.....	140
Tabla 93: Coste de material según su tiempo de uso	142
Tabla 94: Coste total de materiales	142
Tabla 95: Presupuesto final del proyecto.....	142

3. LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Funcionamiento de sensor capacitivo. Fuente: Machine Design.com.....	18
Ilustración 2: Funcionamiento de sensor de corriente de inducción. Fuente: von Flotow, A., 2004, Through-the-Case Eddy Current Sensors	19
Ilustración 3: Funcionamiento de sensor de microondas. Fuente: techbriefs.com	20
Ilustración 4: Funcionamiento del sensor de fibra óptica. Fuente: opticalengineering.spiedigitallibrary.org	21
Ilustración 5: Nave en la EHU en Leioa en la que se realizaron las medidas ...	33
Ilustración 6: Parcela en la que se han realizado las mediciones	34
Ilustración 7: Interior de la parcela.....	34
Ilustración 8: Detalle del montaje en la parcela	35
Ilustración 9: Montaje desde otra perspectiva.....	35
Ilustración 10: Parte exterior del montaje con el láser 1	36
Ilustración 11: Parte exterior del montaje con el láser 2	36
Ilustración 12: Parte interior del montaje con el láser 1.....	36
Ilustración 13: Parte interior del montaje con el láser 2.....	37
Ilustración 14: Cableado de alimentación y comunicación que conecta el interior con el exterior	37
Ilustración 15: Parte exterior del cableado que conecta interior y exterior con el tapón colocado	38
Ilustración 16: Diagrama de bloques básico de los ensayos a realizar	38
Ilustración 17: Detalle de los cables de alimentación y comunicación del motor	39
Ilustración 18: Mecanismo de soporte del álabe	39
Ilustración 19: Vista cenital del álabe y el láser	40
Ilustración 20: Álabe y láser tienen que estar enfrentados	40
Ilustración 21: Detalle de perpendicularidad	40
Ilustración 22: Detalle de perpendicularidad en plano cenital	41
Ilustración 23: Conexión de los fotodetectores con el bundle	41
Ilustración 24: Conexión entre bundle y aislador óptico	42
Ilustración 25: Detalle de la ruleta para ajustar la ganancia	42
Ilustración 26: Conexión BNC de los fotodetectores	43
Ilustración 27: Detalle de entrada a los multímetros de la señal de los fotodetectores.....	43
Ilustración 28: Imagen frontal del soporte de la pata común del bundle	43

Ilustración 29: Imagen lateral del soporte de la pata común con el bundle insertado.....	44
Ilustración 30: Conexión entre el láser de la prueba 1 y el aislador óptico fijado con cinta	44
Ilustración 31: Detalle de la salida dividida en dos que está conectada al trigger externo de los multímetros	45
Ilustración 32: Conexión de la salida del generador con el trigger externo de los multímetros	46
Ilustración 33: Posición de offset.....	47
Ilustración 34: Detalle de la posición de offset.....	48
Ilustración 35: Curva de calibración obtenida en un caso concreto	48
Ilustración 36: Ejemplo de resultados obtenidos tras medición y procesado en Excel	49
Ilustración 37: Pata común del bundle trifurcado	50
Ilustración 38: Pata común del bundle cuatrifurcado	51
Ilustración 39: Resultados de bundle cuatrifurcado con ganancias 10-30 y 10°C	52
Ilustración 40: Resultados para 10-30, láser 1 y bundle trifurcado	53
Ilustración 41: Curvas linealizadas de la región I	54
Ilustración 42: Curvas linealizadas de la región II	54
Ilustración 43: Resultados para 20-20, láser 1 y bundle trifurcado	57
Ilustración 44: Curvas linealizadas de la región I	57
Ilustración 45: Curvas linealizadas de la región II	58
Ilustración 46: Resultados para 10-30, láser 1 y bundle cuatrifurcado	60
Ilustración 47: Curvas linealizadas de la región I	61
Ilustración 48: Curvas linealizadas de la región II	61
Ilustración 49: Resultados para 10-40, láser 1 y bundle cuatrifurcado	63
Ilustración 50: Curvas linealizadas de la región I	64
Ilustración 51: Curvas linealizadas de la región II	64
Ilustración 52: para 0-40, láser 1 y bundle cuatrifurcado	66
Ilustración 53: Curvas linealizadas de la región I	67
Ilustración 54: Curvas linealizadas de la región II	67
Ilustración 55: Resultados para 10-30, láser 1 y bundle cuatrifurcado	69
Ilustración 56: Curvas linealizadas de la región I	70
Ilustración 57: Curvas linealizadas de la región II	70
Ilustración 58: Resultados para 10-30, láser 2 y bundle cuatrifurcado	73
Ilustración 59: Curvas linealizadas de la región I	73
Ilustración 60: Curvas linealizadas de la región II	74
Ilustración 61: Resultados para 20-20, láser 2 y bundle cuatrifurcado	76

Ilustración 62: Curvas linealizadas de la región I	76
Ilustración 63: Curvas linealizadas de la región II	77
Ilustración 64: Sección transversal de modelo sumatorio. Fuente: opticalengineering.spiedigitallibrary.org	88
Ilustración 65: Trifurcado, 20-20, láser 1, espejo	90
Ilustración 66: Trifurcado, 10-30, láser 1, espejo	91
Ilustración 67: Cuatrifurcado, 20-20, láser 1, espejo	92
Ilustración 68: Cuatrifurcado, 10-30, láser 1, espejo	93
Ilustración 69: Cuatrifurcado, 0-40, láser 1, espejo.....	94
Ilustración 70: Power Meter PM100USB utilizado.....	97
Ilustración 71: Montaje para saber la potencia emitida	97
Ilustración 72: Software del Power Meter	98
Ilustración 73: Espejo utilizado en las mediciones	100
Ilustración 74: 20-20, trifurcado, láser 1, álabe.....	106
Ilustración 75: 10-30, trifurcado, láser 1, álabe.....	107
Ilustración 76: 20-20, cuatrifurcado, láser 1, álabe	108
Ilustración 77: Cuatrifurcado, láser 1, 10-30, álabe	109
Ilustración 78: cuatrifurcado, láser 1, 10-40, álabe	110
Ilustración 79: cuatrifurcado, láser 1, álabe, 0-40.....	111
Ilustración 80: Superficies rugosas utilizadas (de izquierda a derecha: 120, 600 y 1500 grit)	112
Ilustración 81: Comportamiento de las superficies.....	113
Ilustración 82: Montaje utilizado para la medición.....	113
Ilustración 83: Vista cenital para apreciar perpendicularidad	114
Ilustración 84: Haz incidiendo en la superficie rugosa.....	114
Ilustración 85: Posición más cercana posible entre bundle y superficie rugosa	115
Ilustración 86: Resultados de trifurcado, láser 1 y 10-30	115
Ilustración 87: Resultados de trifurcado, láser 1 y 20-20	117
Ilustración 88: Resultados de cuatrifurcado, láser 1 y 10-30.....	118
Ilustración 89: Resultados de cuatrifurcado, láser 1 y 20-20.....	119
Ilustración 90: Calibración para desplazamiento horizontal	120
Ilustración 91: Calibración para desplazamiento vertical	121
Ilustración 92: Calibración para desplazamiento mixto	122
Ilustración 93: Calibración para desplazamiento horizontal	123
Ilustración 94: Calibración para desplazamiento vertical	124
Ilustración 95: Calibración para desplazamiento mixto	125
Ilustración 96: Calibración para desplazamiento horizontal	126

Ilustración 97: Calibración para desplazamiento vertical	127
Ilustración 98: Calibración para desplazamiento mixto	128
Ilustración 99: Calibración para desplazamiento horizontal	129
Ilustración 100: Calibración para desplazamiento vertical	130
Ilustración 101: Calibración para desplazamiento mixto	131
Ilustración 102: Calibración para desplazamiento horizontal	132
Ilustración 103: Calibración para desplazamiento vertical	133
Ilustración 104: Calibración para desplazamiento mixto	134
Ilustración 105: Estudio de la sensibilidad	136
Ilustración 106: Cámara climática	149
Ilustración 107: Detalle de la interfaz	150
Ilustración 108: PC utilizado	150
Ilustración 109: Detalle de la conexión GPIB	151
Ilustración 110: Agilent 33410A	151
Ilustración 111: Cable GPIB	151
Ilustración 112: Keysight 33210A	152
Ilustración 113: Bundle trifurcado	152
Ilustración 114: Anillo receptor interior	153
Ilustración 115: Anillo receptor externo	153
Ilustración 116: Anillo receptor interno	154
Ilustración 117: Anillo receptor externo	154
Ilustración 118: Soporte de la pata común del bundle	155
Ilustración 119: Frankfurt Laser Company HSML-0660-20-FC	155
Ilustración 120: Alimentación del láser 1	156
Ilustración 121: Láser de Power Technology modelo IQ1C30(643-80)F2/547	156
Ilustración 122: Alimentación del láser de Power Technology	156
Ilustración 123: Detalle de conexión con el láser mediante RS232	157
Ilustración 124: Aislador óptico embalado	157
Ilustración 125: Plataforma Thorlabs	157
Ilustración 126: Motor Thorlabs	158
Ilustración 127: Plataforma de sujeción de álabe	158
Ilustración 128: Brazo para sostener el álabe en posición fija	159
Ilustración 129: Vista cenital de los álabes utilizados	159
Ilustración 130: Vista de la parte a iluminar del álabe	159
Ilustración 131: Fotodetectores utilizados	160
Ilustración 132: Cable BNC	160
Ilustración 133: T para los BNC	160
Ilustración 134: Soporte de los fotodetectores	161

Ilustración 135: Gafas de seguridad	161
Ilustración 136: APY001/M utilizado	161
Ilustración 137: Superficies rugosas utilizadas	162
Ilustración 138: PM100USB	162
Ilustración 139: S150C.....	162
Ilustración 140: Interfaz del programa de LabView	163

4. LISTA DE ACRÓNIMOS

ETSIB: Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Bilbao

TC: Tip Clearance

BTT: Blade Tip Timing

PD: Fotodetector

TF: Fibra transmisora

RF: Fibra receptora

NA: Apertura numérica

5. MEMORIA

5.1. Objetivos y alcance del trabajo

En este punto se va a dar una visión general del proyecto, haciendo hincapié en aspectos importantes como el objetivo del mismo, lo que se desea obtener, etc.

El objetivo de este proyecto ha consistido en caracterizar el funcionamiento de un sensor cuyo componente principal es un haz de fibras ópticas (este tipo de estructuras son denominadas habitualmente como bundle). El proceso que se ha llevado a cabo para ello ha consistido en tres apartados diferenciados pero relacionados entre sí y que han ayudado a tener la mayor información posible del sensor. Estos tres apartados han sido:

1. Caracterización del funcionamiento real del sensor a diferentes temperaturas y en función de la reflectividad y rugosidad del objetivo así como de los ángulos de incidencia. Mediante estas mediciones se ha recogido toda la información necesaria sobre el comportamiento real del sensor y sobre cómo afectan las variaciones de diversos factores como el ángulo de incidencia del láser, reflectividad y rugosidad del objetivo a su funcionamiento. Estos datos han sido críticos para el posterior modelado del funcionamiento mediante el programa Matlab.
2. Creación de un programa informático mediante Matlab con el que se pueda simular el comportamiento real del bundle y en el que se puedan ver reflejadas las distintas variables que se han comentado en el punto anterior y que pueden afectar a la medición. El propósito de este programa es que ayude en el diseño de aplicaciones concretas.
3. Estudio de la sensibilidad en función de los diferentes procesados de la señales recibidas a través del sensor. Mediante la modificación de la relación entre las señales que se recogen se ha podido estudiar el modo optimizar el rendimiento del sensor.

Por lo tanto, una vez queda determinado que el objetivo consiste en la codificación de un programa de Matlab en el que se pueden simular los resultados que se lograrían con el sensor en condiciones reales de funcionamiento bajo unas condiciones determinadas, es necesario definir el alcance del proyecto.

El alcance del proyecto incluirá:

1. Toda la información necesaria para poder caracterizar el sensor de forma clara, de manera que se pueda evaluar el efecto que pueden tener las variables en su comportamiento. Esto incluye el efecto de la temperatura, el efecto de la rugosidad y reflectividad del objetivo, y el efecto del ángulo de incidencia.
2. Programa informático en el que se pueda simular el funcionamiento del sensor y en el que se tienen en cuenta todas las variables del punto anterior a la hora

de caracterizar el sensor y que pueden afectar a su funcionamiento.

3. Estudio de la sensibilidad del sensor mediante el procesado de las señales recibidas. De esta forma se trata de minimizar el error que se puede cometer a la hora de adquirir las señales procedentes de la medición.
4. Comparación entre la simulación y el comportamiento real del sensor, de modo que se pueda verificar si el programa de simulación es lo suficientemente preciso como para considerarlo fiable.
5. En el caso en el que los resultados indiquen que el programa es lo suficientemente preciso como para considerarlo fiable, se considerará su posible uso para aplicaciones concretas de medición como puede ser Tip Clearance, etc. De forma adicional, el programa de simulación permitiría diseñar sensores específicos en función de los requerimientos que hubiese en cada caso particular, logrando así sensores que ofrezcan las mejores prestaciones para cada situación. Esto supondría una gran ventaja en casos en los que las mediciones fuesen complicadas o costosas de realizar frente a los procedimientos habituales, ya que mediante una simple parametrización del escenario introducido en el programa de Matlab se podría tener unos resultados fiables de forma rápida y barata, ahorrando tanto tiempo como dinero y permitiendo el diseño de sensores que optimicen el rendimiento para cada caso.

De modo que la finalidad de este proyecto consistirá en desarrollar un programa informático de forma que se ajuste lo máximo posible al comportamiento real de un determinado sensor de fibra óptica, con la ventaja que eso supondría a nivel económico y logístico, ya que con una simple simulación se tendría una aproximación bastante acertada del funcionamiento del dispositivo que se analice en cada momento.

5.2. Beneficios que aporta el trabajo

Este apartado nos va a servir para identificar los beneficios que se van a poder obtener del desarrollo de este proyecto. Los hemos dividido en dos grupos principales, que serían las contribuciones técnicas y las económicas. A continuación se explica detalladamente cada una de ellas.

5.2.1. Contribuciones técnicas

Los beneficios técnicos derivados de este proyecto son varios:

- Poder llevar a cabo simulaciones con sensores que no se dispongan realmente en el inventario o incluso que no existan, de modo que se pueda saber de antemano su funcionamiento teórico y se pueda decidir adquirir, fabricar o desechar su adquisición.
- Facilidad para la modificación de parámetros de funcionamiento del sistema de medición como rugosidad y reflectividad del objetivo, etc. de forma que se pueda simular el comportamiento del sensor bajo múltiples condiciones de

forma simple: variación de temperatura, ángulo de incidencia...

Como se puede comprobar, los beneficios que pueden obtenerse del desarrollo de este proyecto son múltiples y resultan interesantes si se desea hacer uso de este tipo de sistemas de medición.

5.2.2. Contribuciones económicas

Un aspecto muy importante a la hora de afrontar cualquier proyecto es el factor económico. Para el caso de este proyecto, también se tienen ventajas interesantes, siendo las más importantes las siguientes:

- Ahorro en costes de desplazamiento, alquileres de instalaciones, adquisiciones etc. ya que mediante el uso de este programa se pueden limitar los ensayos reales de sensores a casos específicos que en la simulación hayan arrojado resultados interesantes para el uso que se les haya especificado.
- Inversión de bajo riesgo en esta tecnología. La medición mediante sensores de fibra óptica no es algo novedoso, sino que se trata de una tecnología madura, contrastada y que hoy en día es aplicada en distintos ámbitos, por lo que no se estaría desarrollando un software para una tecnología desconocida, sino todo lo contrario.

5.3. Estado del arte

El Tip Clearance (TC en este documento a partir de este punto) consiste en la distancia comprendida entre el álabe de la turbina y su carcasa [1-2]. Tal y como demuestran diversos estudios, esta distancia interesa que sea lo más pequeña posible sin llegar a tocarse entre sí en aras de conseguir la mayor eficiencia posible del motor sin llegar a poner en riesgo la integridad del mismo. El interés en la disminución de la distancia se debe a que el hecho de tener un TC elevado hace que se genere un flujo de aire que no aporta ningún beneficio al funcionamiento y eficiencia del motor, de modo que se debe minimizar guardando siempre un margen de seguridad [3]. En cuanto al rendimiento, estudios demuestran que el TC tiene un impacto sustancial en la eficiencia de las turbinas. Se ha demostrado que una reducción de 0.25 mm en la distancia de TC puede suponer una reducción del 1% en el consumo de combustible y una reducción de la temperatura de emisión de los gases de combustión de 10°C [4-5]. Esto supondría una mejora del 1% en la eficiencia de funcionamiento junto con las ventajas medioambientales y económicas que eso conllevaría. Aunque estos datos pueden parecer pequeños si se toman de forma individual, se estima que una reducción del 1% en el consumo de combustible podría suponer un ahorro de más de 160 millones de euros por año en la factura del mismo [6]. Otras ventajas añadidas de la mejora de la eficiencia que se ha comentado son el hecho de reducir el impacto acústico y el hecho de aumentar la durabilidad de los componentes gracias a que trabajan a una temperatura de operación menor.

El TC no es algo exclusivo de los motores de aeronaves, sino que es una medida

propia de todos los dispositivos que hagan uso de turbinas para su funcionamiento [7-9], si bien es cierto de las medidas de TC para cada caso difieren. Por ejemplo, los valores típicos de TC para los sistemas de turbinas para la generación de energía oscilan entre los 2 y los 8 mm, mientras que para la industria aeronáutica valores de TC inferiores a 3 mm son habituales dependiendo de qué parte del motor está siendo observado [10]. Considerando los valores tan pequeños en los que se mueve el TC, se antoja necesario el uso de sensores con una gran sensibilidad y precisión.

Hasta la fecha, cuatro son los principales tipos de sensor que se han utilizado para la medición del TC: sensores capacitivos, los sensores de corriente inducida o corriente de Foucault, sensores de microondas y sensores ópticos [11-13]. Todos ellos menos los sensores ópticos se pueden considerar “large spot size sensors”, lo que indica que su marca de medida es mayor que las características del álabe a medir. Desde el punto de vista de la medición, esto supone un reto importante a la hora de conseguir medidas precisas de TC [14].

Por lo tanto, se puede observar que la medida de TC es un aspecto de vital importancia para el diseño de las turbinas y que proporciona información muy útil a los ingenieros para optimizar sus diseños.

5.4. Análisis de alternativas

En el punto anterior se han nombrado de forma superficial los tipos de sensores que se utilizan para la medida de TC. En este punto se expondrá cada uno de ellos haciendo especial hincapié en sus puntos fuertes y débiles a la hora de las mediciones.

5.4.1. Sensores capacitivos

Este tipo de sensor es bastante habitual debido a su simplicidad, bajo coste y robustez, pero poseen una resolución espacial muy baja y un rango de medición muy corto [15]. Además, requieren calibración previa a su uso y requieren que los álabes sean de material conductor.

Su modo de funcionamiento se basa en la variación de la capacidad del sensor cuando los álabes pasan por su posición dentro de su rango de acción o “spot size”.

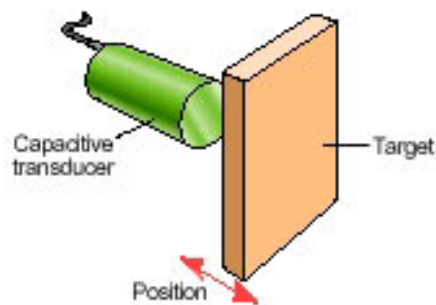


Ilustración 1: Funcionamiento de sensor capacitivo. Fuente: Machine Design.com

Como aspecto técnico a destacar, son sensores capaces de realizar medidas de Blade Tip Timing (BTT) [16-18] y de TC de forma simultánea.

5.4.2. Sensores de corriente de inducción o corriente de Foucault

Este tipo de sensor es muy ligero y de bajo coste, y permite llevar a cabo la medición del TC sin contacto con el álabe. Además, permite la medición de TC y BTT de forma simultánea [19-21] al igual que los sensores capacitivos.

Las principales desventajas de este sistema son que los campos magnéticos que se inducen en el proceso de medición se pueden ver influenciados por la temperatura, por las vibraciones de baja frecuencia y por la forma del álabe, por lo que requieren exhaustivas calibraciones de antemano una vez se saben las características del entorno en el que se van a probar. Debido a su naturaleza, requieren que los álabes y la carcasa de la turbina cumplan determinadas características ferromagnéticas.

Su funcionamiento se basa en la variación de campo magnético que se produce cuando un álabe pasa por su zona de influencia. En ese momento la bobina de inducción que posee el sensor detecta esa variación y ese es el dato que se procesa para saber el valor de TC en cada momento.

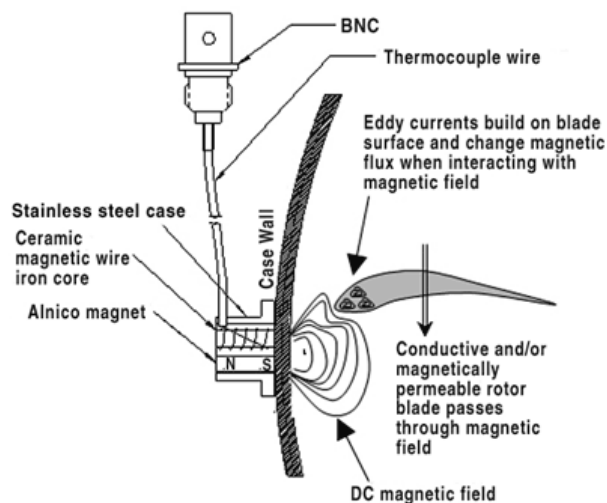


Ilustración 2: Funcionamiento de sensor de corriente de inducción. Fuente: von Flotow, A., 2004, Through-the-Case Eddy Current Sensors

Una variante de este tipo de sensores son los “discharging probe sensors”, que requieren de álabes que sean conductores de electricidad y únicamente miden el menor valor de TC [22].

5.4.3. Sensores de microondas

Este tipo de sensores son capaces de funcionar a temperaturas elevadas con gran precisión y no se ven afectados por las condiciones del entorno o por contaminantes. Permiten realizar medidas sin entrar en contacto con el álabe y requieren de una capacidad de procesamiento posterior elevada debido a la naturaleza de su funcionamiento y una calibración previa para poder caracterizar correctamente la onda

transmitida y la reflejada [23-24].

Actúan de forma similar a un radar de corto alcance. Se basan en el estudio del cambio de fase que se sufre al recibir la onda reflejada que se había emitido. La fase de la onda reflejada se compara constantemente con la señal de referencia y de ahí se deduce el TC.

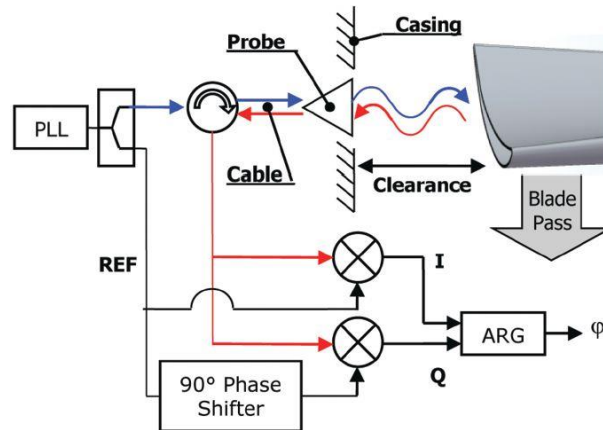


Ilustración 3: Funcionamiento de sensor de microondas. Fuente: techbriefs.com

5.4.4. Sensores de fibra óptica

Este tipo de sensor realiza una medición sin contacto con el álabe y ofrece las múltiples ventajas que poseen las fibras ópticas. Son sensores de pequeño tamaño, insensibles a las interferencias electromagnéticas y que no requieren de instrumentación compleja para funcionar. Además, son capaces de ofrecer un gran ancho de banda de funcionamiento con gran resolución y sensibilidad, y tienen muchas posibilidades de configuración según las necesidades del momento [25-29].

Entre los aspectos negativos, destacar que son sensibles a la contaminación del sensor (suciedad en la fibra transmisora o receptora), y que tienen elementos que son sensibles a la alineación correcta para su funcionamiento.

Su funcionamiento se basa en el análisis de la luz reflejada que se recoge en los distintos anillos que posee el bundle.

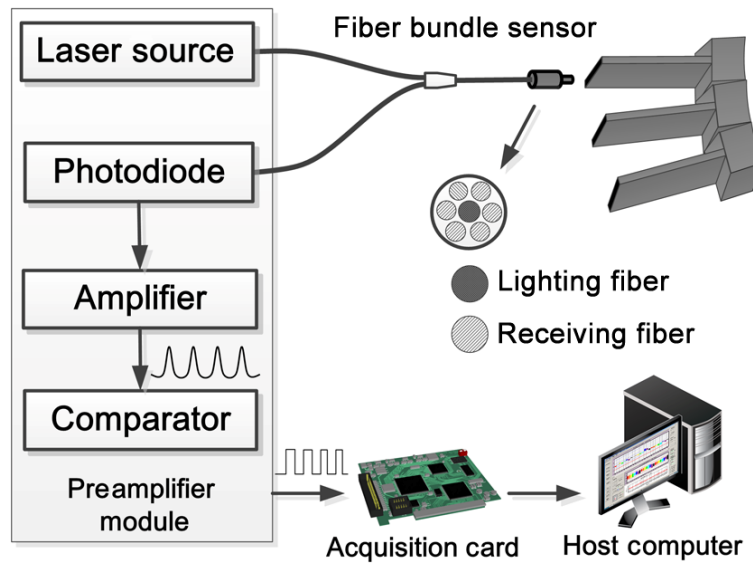


Ilustración 4: Funcionamiento del sensor de fibra óptica. Fuente: opticalengineering.spiedigitallibrary.org

5.4.5 Criterios de selección

Antes de exponer los criterios de selección, es importante resaltar dos puntos que hay que considerar:

1. El entorno en el que van a estar los sensores es un entorno hostil. Las temperaturas a las que tienen que trabajar son muy elevadas y deben soportar el estrés térmico. Además, las exigencias mecánicas también son elevadas debido a las vibraciones, presiones y otros efectos causados por la temperatura (posibles dilataciones, etc.). Aspectos como el aire ionizado o gas corrosivo también tienen que resultar inofensivos para el sensor.
2. Debido a que las señales que tiene que recoger son extremadamente pequeñas, sus características eléctricas tienen que ser estables y sus prestaciones excelentes.

Estas dos condiciones son indispensables para poder hacer unas medidas fiables de TC.

A continuación se exponen los criterios de selección que se han tenido en cuenta a la hora de elegir el tipo de sensor para la medición de TC:

- Medición con o sin contacto: A la hora de realizar mediciones de TC es importante que el sensor no afecte ni interrumpa el funcionamiento normal de la turbina, es decir, que se valorará de forma positiva el hecho de que ofrezca una medición sin contacto.
- Tamaño y peso del sensor: Debido a la naturaleza de las mediciones y a la posición en la que van situados en la turbina (con el sensor integrado en la carcasa), deben ser lo más pequeños y ligeros posible de forma que afecten de la menor forma posible al diseño e integridad de la turbina.

- **Coste:** Como es habitual en todas las soluciones de ingeniería, se valora mejor aquella posibilidad que es capaz de ofrecer solución al problema propuesto de la forma más barata y/o sencilla posible.
- **Sensibilidad frente a interferencias:** Los sensores deben funcionar en un entorno en el que existen muchas piezas metálicas que pueden interferir en el proceso de medición, de modo que se valorará positivamente el sensor que ofrezca mejor rendimiento sin verse afectado por ello.
- **Instrumentación requerida:** Al igual que resultaba importante que el coste del sensor fuese lo más bajo posible, también resulta importante todo el equipamiento necesario para el procesado y puesta en marcha del sensor. Se valorará el hecho de que sea lo más simple y sencillo de usar.
- **Resolución:** Tal y como se ha expuesto en apartados anteriores, las distancias a las que se trabaja en la medición del TC son muy pequeñas (del orden de los milímetros o inferior), de modo que el sistema de sensado que se utilice debe tener una gran resolución cuando trabaje con esas longitudes, con el fin de tener la medición más cercana a la realidad posible
- **Ancho de banda:** Cuanto mayor sea el ancho de banda que nos ofrezca el dispositivo, más opciones nos dará para ajustarlo a nuestras necesidades. Un mayor ancho de banda permitirá muestrear a una mayor velocidad en caso de que la turbina que se esté examinando lo requiera.
- **Sensibilidad frente a contaminación:** En este punto se contempla la posibilidad de que el sensor se vea afectado por aspectos que se han comentado en apartados anteriores como el estar expuestos a gases corrosivos, posible suciedad de aceite, etc. Se valorará el hecho de que sean capaces de soportar estas condiciones y afecten lo menos posible a su funcionamiento.

Todos los puntos anteriores se ponderarán sobre 10, y el método de medición que obtenga el mejor resultado de la suma de todas las ponderaciones, será el tipo de sensor que se examinará y se modelará en Matlab.

5.4.6. Comparativa y conclusión

Una vez se han expuesto los criterios que se van a tener en cuenta para cada tipo de sensor, en este punto se valorará cada uno para definir cuál de ellos es el que ofrece un mejor rendimiento para la medición de TC.

	Capacitivo	Corriente inducida	Microondas	Fibra óptica
Medición con o son contacto	10/10	10/10	10/10	10/10
Tamaño y peso del sensor	7/10	8/10	10/10	10/10
Coste	10/10	9/10	6/10	7/10
Sensibilidad frente a interferencias	6/10	6/10	2/10	10/10
Instrumentación requerida	7/10	7/10	7/10	8/10
Resolución	7/10	8/10	10/10	10/10
Ancho de banda	3/10	5/10	8/10	9/10
Sensibilidad frente a contaminación	10/10	10/10	10/10	3/10
Total	60/80	63/80	63/80	67/80

Tabla 1: Resultado de la comparativa

Por tanto, la mejor opción para la medida de TC de acuerdo con los criterios que se han expuesto en este documento es la de hacer uso de **sensores de fibra óptica**. Además, es subrayable el hecho de que el sensor de fibra óptica expuesto en este documento se ha utilizado en condiciones más favorables que en un motor real, ya que se ha utilizado en un túnel de viento y además en el compresor, que es la parte limpia de un motor real.

5.5. Análisis de riesgos

Los riesgos que se tienen a la hora de realizar cualquier proyecto hay que tenerlos siempre en consideración ya que pueden afectar al desarrollo del mismo de forma muy importante. Por eso, en este punto se van a presentar una serie de posibles riesgos que pueden afectar al proyecto, cada uno de ellos con su correspondiente impacto y sus respectivas soluciones.

Los factores que se han tenido en cuenta para los riesgos han sido dos:

- Probabilidad de ocurrencia: Sirve para medir cuál es la probabilidad de que el suceso que se exponga ocurra.
- Impacto en caso de ocurrencia: En el caso de que el suceso mencionado ocurra, el efecto que ello conllevaría en el sistema y sus repercusiones.

La importancia de cada uno de los factores se va a medir en una escala de tres grados

que se va a repartir de la siguiente forma:

- Grado 1: En este punto se incluyen los hechos de poca probabilidad o bajo impacto.
- Grado 2: Aquí pondremos los sucesos de probabilidad media o impacto medio.
- Grado 3: Los sucesos que tengan un gran impacto o que sean muy probables estarán ligados a este grado.

Cuanto menor sea la probabilidad o el impacto, y menores sean sus grados, mejor para el proyecto, ya que eso significa que el proyecto podrá avanzar pese a que se puedan encontrar obstáculos en el camino.

Los riesgos que se han considerado se exponen a continuación. Posteriormente, mediante una matriz que tendrá como ejes la probabilidad de ocurrencia y el impacto en caso de ocurrencia, se podrá ver gráficamente su clasificación.

5.5.1. Problemas a la hora de comprender el modelo de sensor a modelar

Este riesgo se refiere a la dificultad a la hora de comprender los paper que sirven de guía para realizar el modelado en el programa de Matlab, como podría suceder a la hora de entender las formulaciones matemáticas y los parámetros que las componen.

Se ha fijado su probabilidad en grado 3 y su impacto en grado 3.

La solución que se contempla es la de acudir a personal del centro que sea capaz de dar respuesta a las dudas que surjan y redactar correos a los escritores de los paper preguntándoles sobre las cuestiones.

5.5.2. Problemas de programación del modelo del sensor

En este punto se contempla el riesgo de que la formulación matemática de los paper adaptada al modelo de software no se ajuste a los resultados reales del sensor.

Se ha fijado su probabilidad en grado 3 y su impacto en grado 2.

La solución que se adoptaría en este caso es la de realizar más mediciones de forma que se pudiese encontrar el motivo por el que se da esa diferencia entre las medidas reales y las simulaciones, si bien esto implicaría un retraso en el desarrollo del proyecto.

5.5.3. Problemas de suministro de equipamiento necesario para el proyecto

En el caso de que se requiera de otro equipamiento del que no se disponga en el laboratorio, será necesaria su adquisición. Teniendo en cuenta todo lo que ello conlleva (estar seguros de que se necesita y de que no hay en el laboratorio, mirar catálogos en fabricantes, pedir presupuesto, hacer el pedido y esperar la entrega), esto puede afectar al desarrollo del proyecto.

Se ha fijado su probabilidad en grado 2 y su impacto en grado 3.

La solución que se ha previsto para esta dificultad consiste en realizar una buena planificación de modo que se puedan prever las necesidades de antemano y hacer los pedidos con antelación.

5.5.4. Averías de instrumentos necesarios para el proyecto

Se contempla la posibilidad de que alguno de los equipos que se requieren para poder realizar las mediciones o la programación de la simulación se averíe. Esto supondría un retraso leve en el desarrollo del proyecto hasta volver a tener el sistema completo en marcha de nuevo.

Se ha fijado su probabilidad en grado 2 y su impacto en grado 2.

La solución que se contempla es la de hacer uso de los equipos que haya en el laboratorio y que se puedan utilizar en caso de que nadie más los esté usando. En caso de que no haya equipos de sustitución o estén todos en uso, se tendrá que adquirir equipo nuevo.

5.5.5. Bajas por enfermedad u otros compromisos

Bajas por enfermedad u otros compromisos. Esto supondría un retraso leve en el desarrollo del proyecto.

Se ha fijado su probabilidad en grado 2 y su impacto en grado 1.

La solución prevista es planificar con antelación en caso que haya algún compromiso ineludible, en el caso de baja por enfermedad poco se puede hacer hasta recuperarse y reincorporarse al trabajo.

5.5.6. Matriz del análisis de riesgos

Los riesgos que se han expuesto en los puntos anteriores se van a representar en una matriz de manera que podamos ver de una manera más clara la clasificación de los mismos en función del impacto y probabilidad.



Grado 3			Problemas de programación del modelo del sensor.
Grado 2	Bajas por enfermedad u otros compromisos.	Averías de instrumentos necesarios para el proyecto.	Problemas a la hora de comprender el modelo de sensor a diseñar. Problemas de suministro de equipamiento necesario para el proyecto.
Grado 1			
	Grado 1	Grado 2	Grado 3

Tabla 2: Matriz de análisis de riesgos

6. METODOLOGÍA

Este punto servirá para poder exponer el desglose de las tareas que se han llevado a cabo para realizar este trabajo, así como su duración.

6.1. Descripción de tareas, fases, equipos o procedimientos

Las fechas de comienzo y final del trabajo han sido las siguientes:

- Comienzo: 1 de febrero de 2016
- Fin: 13 de agosto de 2016
- Duración total: 28 semanas

El proyecto se ha dividido en cinco fases distintas pero todas englobadas dentro del mismo proyecto.

- Fase 1: Introducción al proyecto. Primeros pasos del proyecto, en los que se requiere la lectura de papers e información referente al mismo para saber el contexto del proyecto que se va a llevar a cabo, definición del trabajo que se va a realizar y primera toma de contacto con las mediciones. Esta fase abarca desde el 1 de febrero al 11 de marzo. Las tareas que contiene son:
 - Tarea 1.1: Lectura de los papers suministrados por el director y el instructor del proyecto. Esta tarea incluye entender y anotar las dudas para su resolución. Esta tarea ocupa desde el 1 de febrero al 24 de febrero.
 - Tarea 1.2: Aclaración de las dudas que han surgido a raíz de la lectura de los papers. Esta tarea ocupa 1 día, el 25 de febrero.
 - Tarea 1.3: Definición del trabajo que se va a realizar en el proyecto. Esta tarea se realiza el 26 de febrero.
 - Tarea 1.4: Primera toma de contacto con el sistema de medición. Esta tarea comprende 2 semanas, del 29 de febrero al 11 de marzo.
- Fase 2: Primera etapa del desarrollo del proyecto propiamente dicho y que abarca una gran parte del proyecto. En esta fase se llevan a cabo las mediciones de experimentales de variación de T^a , láser y configuración del sensor, y se diseña el programa de simulación. Esta fase comienza el 14 de marzo y finaliza el 30 de mayo. Sus tareas son:
 - Tarea 2.1: En esta tarea se lleva toda la instrumentación necesaria para las mediciones desde el laboratorio a las instalaciones de Leioa donde se van a realizar las medidas. Esta tarea ocupará 1 semana, del 14 al 18 de marzo, ya que se pueden presentar problemas a la hora de

ponerlo en marcha correctamente en una ubicación distinta a la del laboratorio habitual.

- Tarea 2.2: Adquisición de todas las medidas que se requieren para tener los datos sobre el comportamiento de los sensores. Teniendo en cuenta que para cada configuración cada medida requiere un día entero, esta tarea ocupa varios días, desde el 21 de marzo al 1 de abril.
- Tarea 2.3: Desmontaje del sistema de medición y devolución del mismo al laboratorio de Bilbao. Esta tarea también incluye su montaje y dejarlo en funcionamiento tal y como estaba antes de su uso. Esta tarea ocupa 2 días, el 4 y 5 de abril.
- Tarea 2.4: Redacción del informe sobre las medidas de Leioa. Esta tarea ocupa una semana, desde el 6 de abril al 15 de abril.
- Hito 1: Informe de las medidas experimentales.
- Tarea 2.5: Programación del programa de simulación en base a los paper recomendados. Esta tarea se comprende entre el 18 de abril y el 5 de mayo.
- Tarea 2.6: Comparación de los datos de las medidas reales con las simulaciones del programa creado. Esta tarea se realiza el 6 de mayo.
- Tarea 2.7: Correcciones en el programa para ajustar los resultados de la simulación y los datos reales. Esta tarea se lleva a cabo entre el 9 de mayo y el 19 de mayo.
- Tarea 2.8: Validación de los resultados del programa. Esta tarea ocupa 1 día, el 20 de mayo.
- Tarea 2.9: Redacción de toda la documentación referente al programa de simulación y su comparación con los datos reales. Esta tarea se lleva a cabo la semana del 23 al 27 de mayo.
- Hito 2: Informe de la fase 2.
- Fase 3: Caracterización del comportamiento del sensor en función del ángulo de incidencia y de la reflectividad del objetivo. Esta fase está comprendida entre el 30 de mayo y el 9 de julio. Sus tareas son:
 - Tarea 3.1: Realización de las medidas del comportamiento del sensor en función del ángulo de incidencia. Tarea comprendida entre el 30 de mayo y el 10 de junio.
 - Tarea 3.2: Estudio del efecto de la reflectividad del objetivo en el comportamiento del sensor. Esta tarea se realiza entre el 13 de junio y el 15 de ese mismo mes.

- Tarea 3.3: Implementación de los resultados obtenidos en el programa de simulación. La duración de esta tarea se estima entre el 16 de junio y el 24 de junio.
- Tarea 3.4: Correcciones en el programa para ajustar los resultados de la simulación y los datos reales. Esta tarea se realiza entre el 27 de junio y el 29 de junio.
- Tarea 3.5: Validación de los resultados del programa. Esta tarea ocupa 2 días, el 30 de junio y el 1 de julio.
- Tarea 3.6: Redacción de toda la documentación referente al estudio del ángulo de incidencia y la reflectividad. Esta tarea dura 5 días, del 4 de julio al 8 de julio.
- Hito 3: Informe de la fase 3.
- Fase 4: Estudiar la sensibilidad del sensor en función de diferentes procesados de las señales que proporciona. Fase comprendida entre el 11 de julio y el 22 de julio.
 - Tarea 4.1: Estudio de los resultados obtenidos por la variación de las señales de salida. Esta tarea se realiza entre el 11 de julio y el 15 de julio.
 - Tarea 4.2: Redacción de todo lo referente al estudio de la variación de las señales de salida. Se lleva a cabo entre el 18 de julio y el 21 de julio.
 - Hito 4: Informe de la fase 4.
- Fase 5: Redacción, corrección y entrega de toda la documentación generada a lo largo del proyecto. Esta última fase se llevará a cabo entre el 25 de julio y el 13 de agosto.
 - Tarea 5.1: Puesta en común de todos los documentos necesarios para la memoria a entregar. Dura 4 días, entre el 25 y 28 de julio.
 - Tarea 5.2: Informe final con todo lo desarrollado, analizado y simulado para realizar este trabajo. Esta tarea se lleva a cabo durante 11 días, entre el 29 de julio y el 12 de agosto.
 - Hito 5: Informe de la fase 5. Este hito indica que se ha llegado al final del trabajo y que se ha redactado la memoria del mismo.

Por último, destacar que a lo largo de todo el proyecto, independientemente de la fase en la que estuviese, se ha llevado a cabo la tarea de control y gestión del proyecto. Esta tarea ocupó la totalidad de la duración del trabajo y sirvió para tener bajo control

por parte del director del proyecto todo el trabajo realizado. Su duración fue la misma que la del proyecto.

6.2. Cronograma

En la siguiente página se plantea un Diagrama de Gantt del desarrollo del proyecto aquí expuesto, donde se pueden apreciar las diferentes duraciones de cada apartado, y los hitos que se han creído convenientes para el mismo.

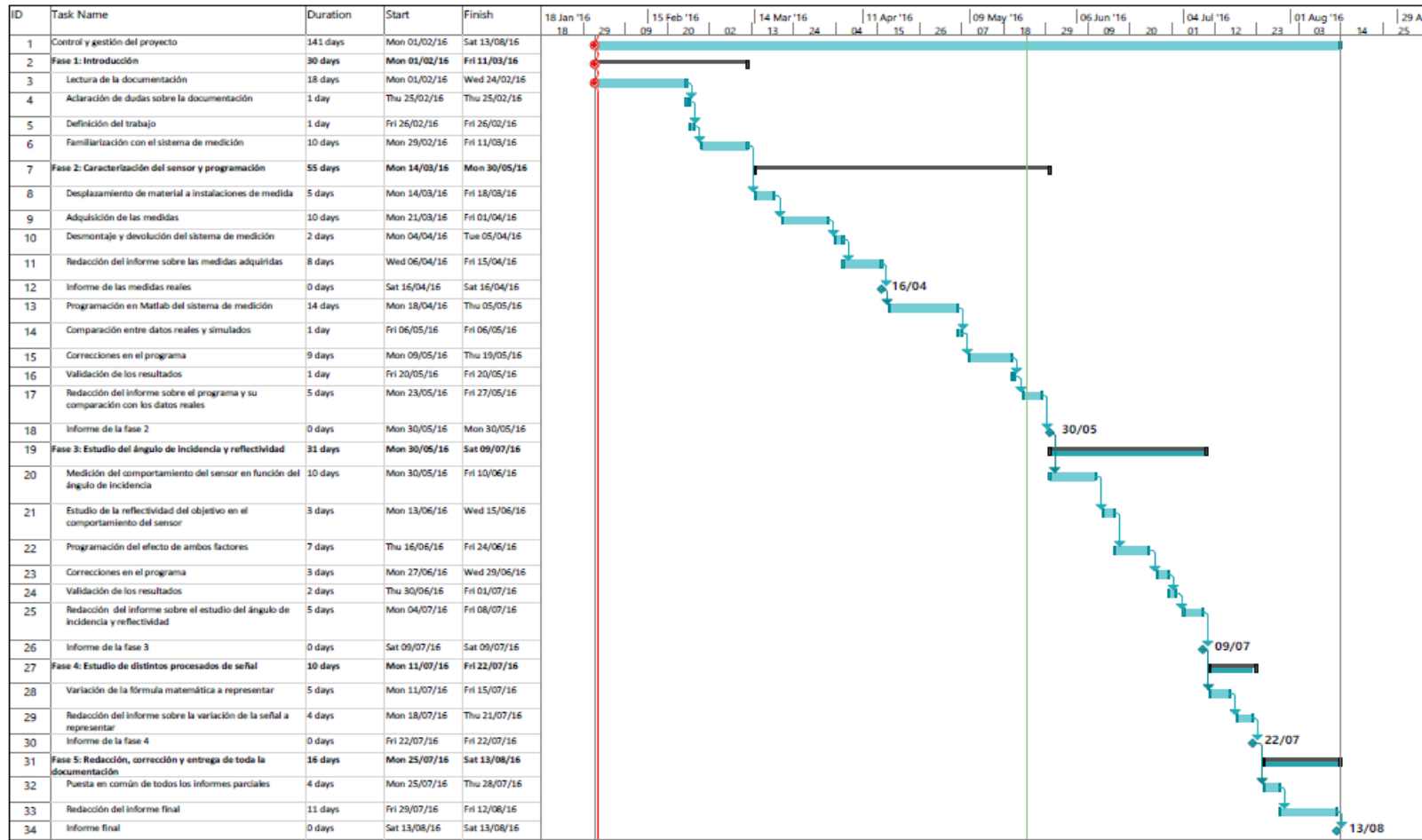


Tabla 3: Diagrama de Gantt/Cronograma del proyecto

7. CÁLCULOS

En este punto se realizará una descripción del método seguido, la solución que se ha adoptado para llevar a cabo este proyecto y sus correspondientes resultados.

Tal y como se ha explicado en puntos anteriores, el proyecto que se expone en este documento consta de varias fases interrelacionadas entre sí pero que se han desarrollado de forma consecutiva para conseguir los objetivos que se habían fijado al comienzo del mismo. Una vez aclarado esto, en este punto se van a mostrar, de forma cronológica tal y como se ha podido ver en el cronograma, los pasos que se han seguido.

7.1. Familiarización

El desarrollo de esta fase ha sido simplemente de lectura y familiarización con los instrumentos y métodos a seguir, por lo que no hay nada destacable sobre la solución adoptada para el proyecto.

7.2. Programa de simulación

En esta fase se han llevado a cabo medidas para caracterizar el comportamiento de determinados sensores en distintas situaciones y el programa de simulación que se corresponde con su funcionamiento.

7.2.1. Objetivos de la toma de medidas reales

Se han realizado mediciones mediante las cuales se han obtenido datos sobre el comportamiento real de los sensores (tanto trifurcado como cuatrifurcado) bajo distintas condiciones térmicas, de humedad, configuración de funcionamiento y láser emisor. Éstas se han llevado a cabo en las instalaciones de Leioa, en concreto, en la cámara climática allí instalada.

Estas mediciones han consistido en llevar a cabo el mismo tipo de medición bajo configuraciones diferentes a fin de tener cubierto el mayor rango posible de casuísticas. Con la combinación de los parámetros previamente mencionados se ha pretendido tener el mayor espectro de casos posible para poder caracterizar el funcionamiento de los sensores bajo todo tipo de condición. Las medidas que se han tomado para su posterior procesado han sido las tensiones recogidas mediante fotodetectores (la descripción del montaje se explicará más adelante) y que se corresponden con dos de los anillos de fibras receptoras de los que consta el bundle que se haya estado utilizando en cada momento.

Se han obtenido las curvas de calibración para todas las configuraciones experimentadas tanto de temperatura y de ganancia como de tipo de láser. En esas curvas se han identificado las regiones lineales I y II, de forma que se han podido analizar y evaluar la influencia de la temperatura, de las configuraciones de los

fotodetectores y del láser que se haya estado usando en cada momento en las distintas regiones.

Por último, se ha comparado el rendimiento del sensor trifurcado con el sensor cuatrifurcado para el caso en el que el fotodetector del que se obtiene V1 (conectado al anillo receptor más cercano al centro del bundle y que consta de 6 fibras) y el fotodetector del que se obtiene V2 (conectado al anillo receptor más lejano del centro del bundle) tengan una ganancia de 10 y 30 dB respectivamente, y para el caso en el que ambos tengan una ganancia simétrica de 20 dB. Para determinar su comportamiento se ha mostrado la relación de tensiones $V2/V1$ que hay para cada caso concreto que se ha probado en el laboratorio. Ambos sensores, tanto trifurcado como cuatrifurcado, se han probado con ambos láseres.

Tras llevar a cabo estas medidas se debe ser capaz de valorar el impacto de la temperatura en el funcionamiento de los sensores, el impacto de la configuración de la ganancia de los fotodetectores, el efecto que tiene el uso de un láser u otro y por último una comparativa de rendimiento entre los dos tipos de sensores que se han utilizado.

7.2.2. Instalaciones en las que se han realizado las medidas y montaje para las medidas

Las medidas se han llevado a cabo en las instalaciones de Leioa. En concreto se han realizado en la nave FEDER, que es en la que se encuentra la cámara climática marca CTS modelo C-70/200 que se ha utilizado en las mediciones (más detalles en el Anexo I) para simular distintas condiciones de temperatura. A continuación, se muestran las imágenes del lugar descrito:



Ilustración 5: Nave en la EHU en Leioa en la que se realizaron las medidas



Ilustración 6: Parcela en la que se han realizado las mediciones

Es una parcela destinada a la fabricación y otros experimentos relacionados con la fibra óptica, por lo que contiene máquinas, herramientas y equipamiento para ello.



Ilustración 7: Interior de la parcela

En una esquina del interior de la parcela, cercana a la cámara climática, se ha instalado todo el montaje necesario para llevar a cabo el experimento, tal y como se puede ver en las siguientes imágenes. El montaje para ambos láseres y bundles es análogo. En este punto se muestran las imágenes para los montajes con los dos láseres que se han utilizado porque tienen ligeras diferencias entre sí (alimentación del láser, tamaño del láser...), no así los montajes con los bundles, que visualmente son exactamente iguales y a simple vista solo difieren en que uno posee un revestimiento de aluminio (en realidad poseen más características diferentes que están expuestas en el Anexo I).



Ilustración 8: Detalle del montaje en la parcela



Ilustración 9: Montaje desde otra perspectiva

En ellas se pueden apreciar las dos partes del montaje: la parte exterior a la cámara climática compuesta por los equipos de medición y el PC (y la alimentación del láser en el caso del láser 2); y la parte interior de la cámara, en el que está el montaje de medición propiamente dicho y que será controlado por la parte externa.

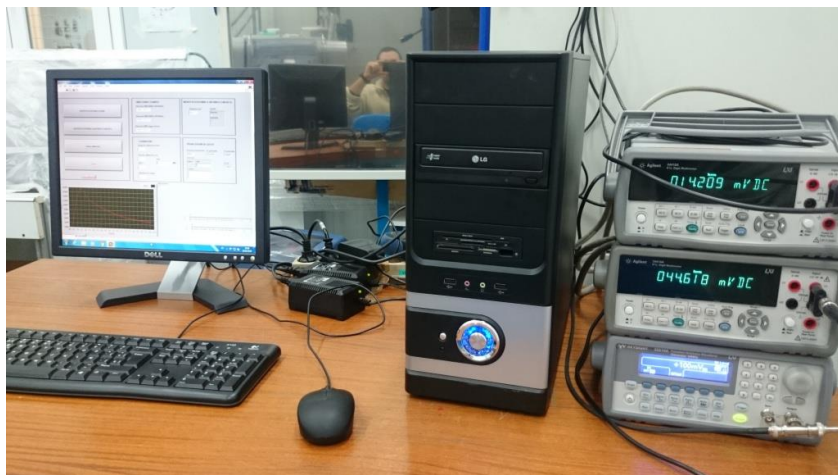


Ilustración 10: Parte exterior del montaje con el láser 1



Ilustración 11: Parte exterior del montaje con el láser 2

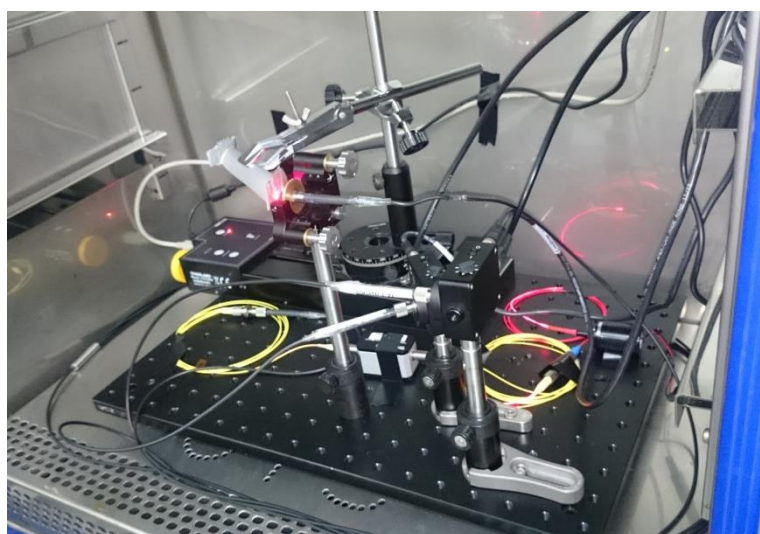


Ilustración 12: Parte interior del montaje con el láser 1

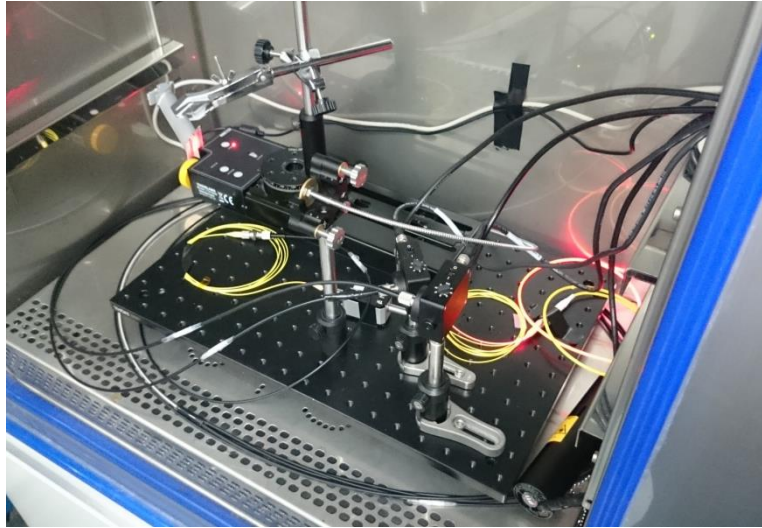


Ilustración 13: Parte interior del montaje con el láser 2

Ambas partes se comunican por una abertura que posee la cámara en un lateral. Por esta misma abertura van también los cables de alimentación que se requieran para los elementos internos. Esta abertura se tapona con un tapón propio de la cámara que evita que haya fugas de calor en el habitáculo (la temperatura se ha comprobado introduciendo un termopar en la cámara que no ha afectado a las medidas). Se ha tenido en cuenta la longitud de estos cables para la disposición de los equipos en la mesa contigua a la cámara climática de forma que no queden tirantes ni puedan ocasionar ningún impedimento a las partes móviles del interior de la cámara.

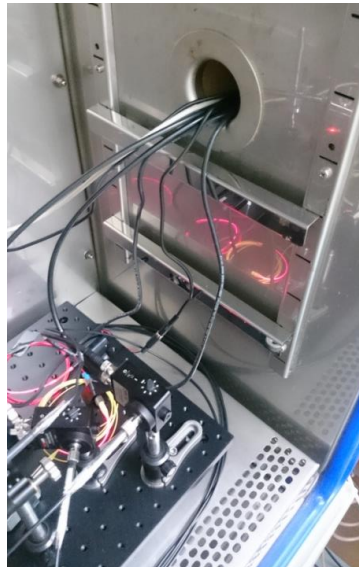


Ilustración 14: Cableado de alimentación y comunicación que conecta el interior con el exterior



Ilustración 15: Parte exterior del cableado que conecta interior y exterior con el tapón colocado

Entrando más en detalle en el montaje de medición interno, en primer lugar se va a mostrar un diagrama de bloques del sistema de medición que se utilizará con el fin de que se puedan entender mejor las explicaciones que se indican en este apartado.

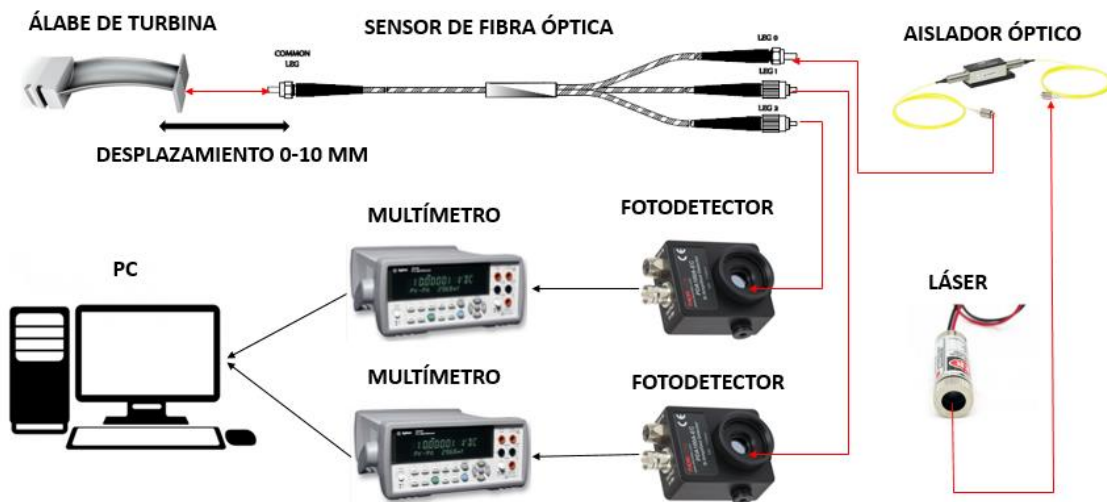


Ilustración 16: Diagrama de bloques básico de los ensayos a realizar

Una vez visto el diagrama de bloques, se va a detallar cada uno de los componentes que lo forman y cómo deben funcionar. Comenzando por el motor, está conectado al PC vía USB y es el encargado de mover la plataforma sobre la que se desplaza el álabe. Es importante que nada obstruya su desplazamiento:



Ilustración 17: Detalle de los cables de alimentación y comunicación del motor

El soporte que se monta sobre la plataforma del motor y que sostiene el álabe mantendrá a éste en una posición fija e idéntica para todas las mediciones, y su brazo habrá que ajustarlo de forma que la parte plana iluminada del álabe quede enfrentada al láser, es decir, que éste incida perpendicularmente. Para ello, dispone de varias ruletas que permiten ajustar su posición.

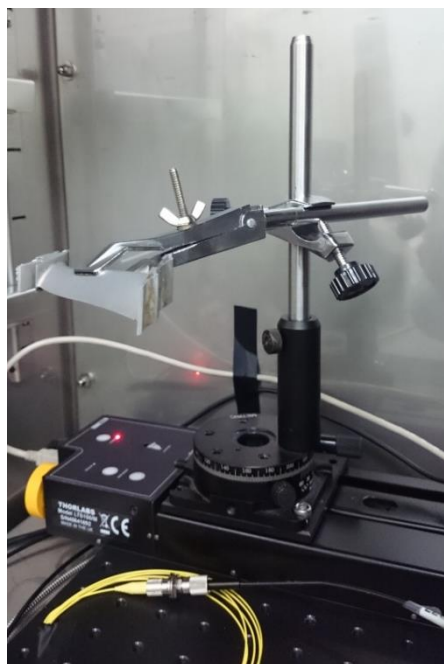


Ilustración 18: Mecanismo de soporte del álabe

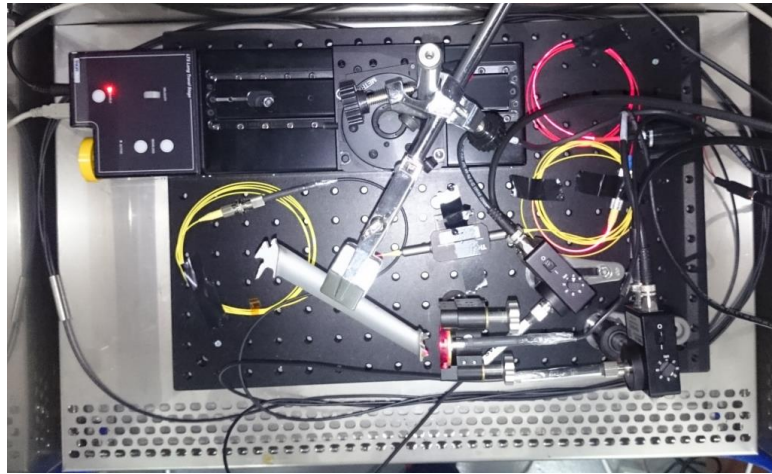


Ilustración 19: Vista cenital del álab e el láser

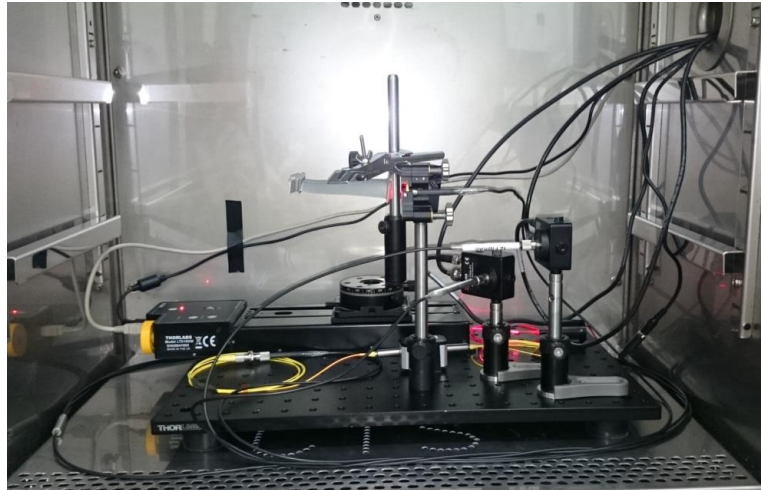


Ilustración 20: Álab e láser tienen que estar enfrentados

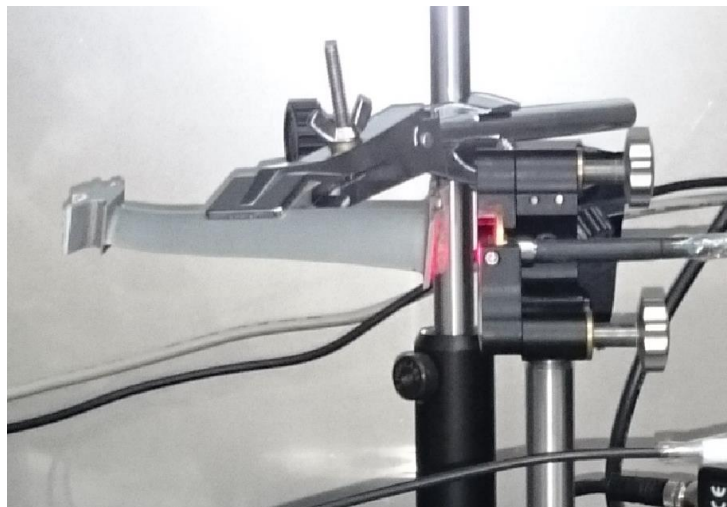


Ilustración 21: Detalle de perpendicularidad

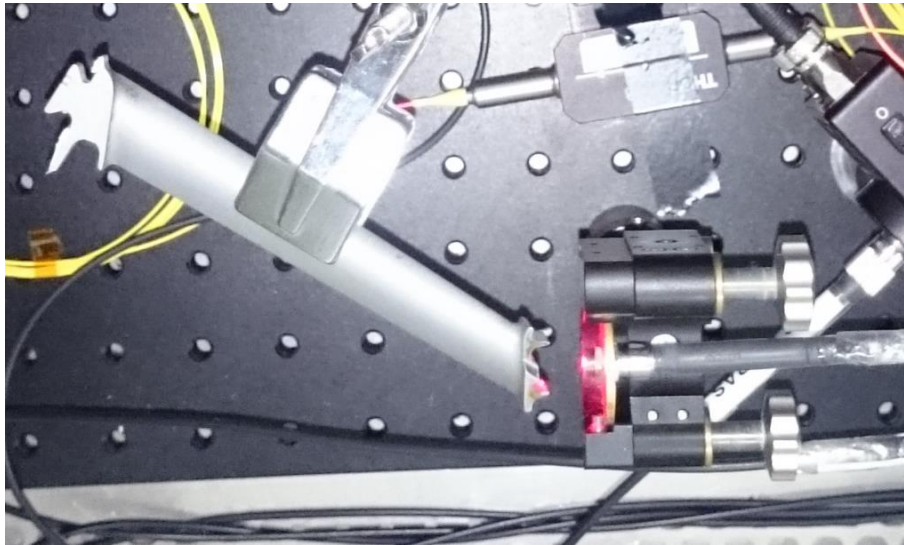


Ilustración 22: Detalle de perpendicularidad en plano cenital

Los fotodetectores 1 y 2 estarán conectados a las patas leg 2 y leg 3 (o leg 4 en el caso del bundle cuatrifurcado) respectivamente del bundle que se esté usando en cada momento, siendo siempre el fotodetector identificado como 1 el encargado de medir V1 y el fotodetector 2 el encargado de medir V2. El aislador se conecta directamente con leg 1, la pata encargada de transmitir la luz del láser. Es vital asegurarse de que estas conexiones se hacen perfectamente para evitar pérdidas de señal que arruinen las medidas.

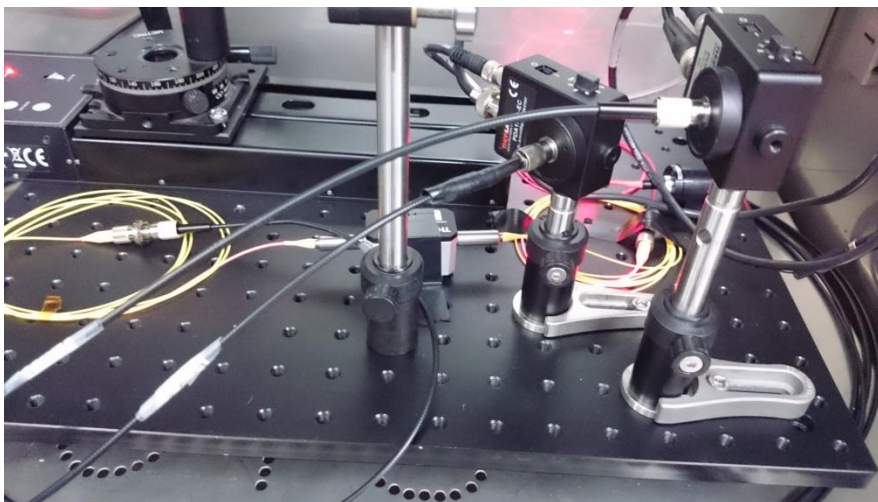


Ilustración 23: Conexión de los fotodetectores con el bundle

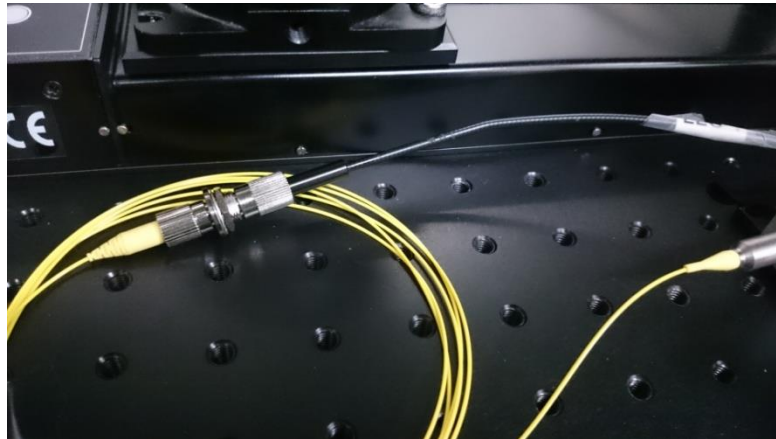


Ilustración 24: Conexión entre bundle y aislador óptico

Como se ha indicado previamente, será necesario cambiar la ganancia de los fotodetectores para hacer distintas pruebas. Este proceso se realiza moviendo una pequeña ruleta en la parte superior del fotodetector que permite ajustar la ganancia en pasos de 10 dB.

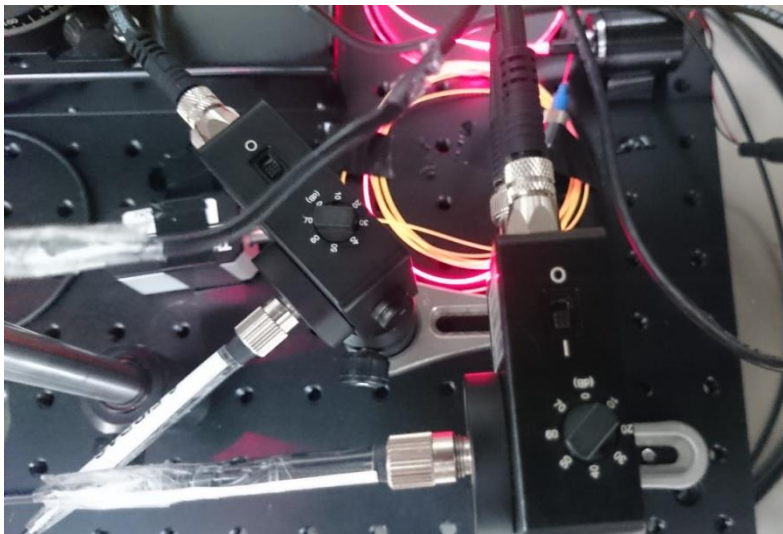


Ilustración 25: Detalle de la ruleta para ajustar la ganancia

La información sobre la luz recibida en los fotodetectores será enviada a los multímetros que están fuera de la cámara climática y conectados mediante cables coaxiales con conector BNC.

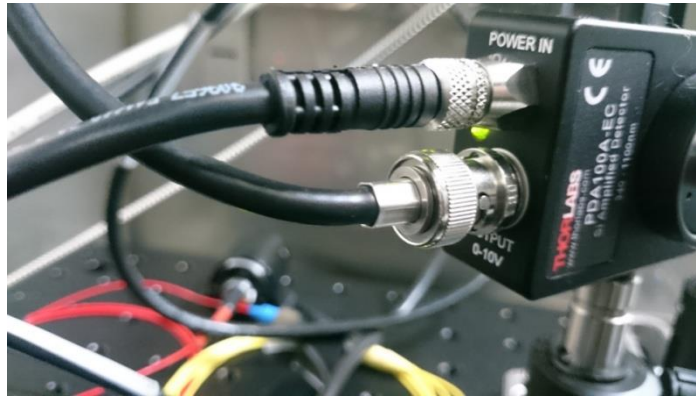


Ilustración 26: Conexión BNC de los fotodetectores

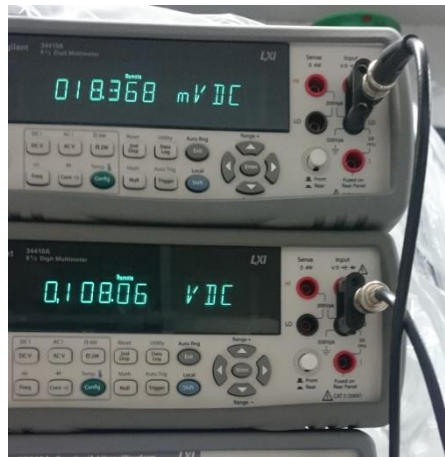


Ilustración 27: Detalle de entrada a los multímetros de la señal de los fotodetectores

La pata común del bundle (tanto trifurcado como cuatrifurcado) se situará en el soporte que se muestra a continuación y que se puede ajustar mediante una llave Allen tal y como se ve en las siguientes ilustraciones:

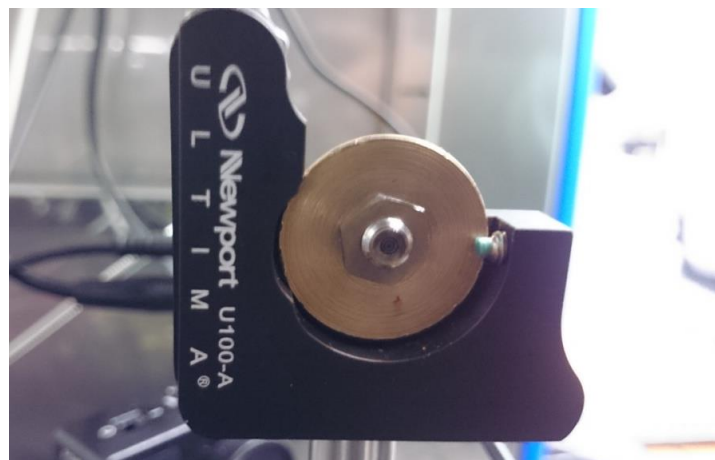


Ilustración 28: Imagen frontal del soporte de la pata común del bundle

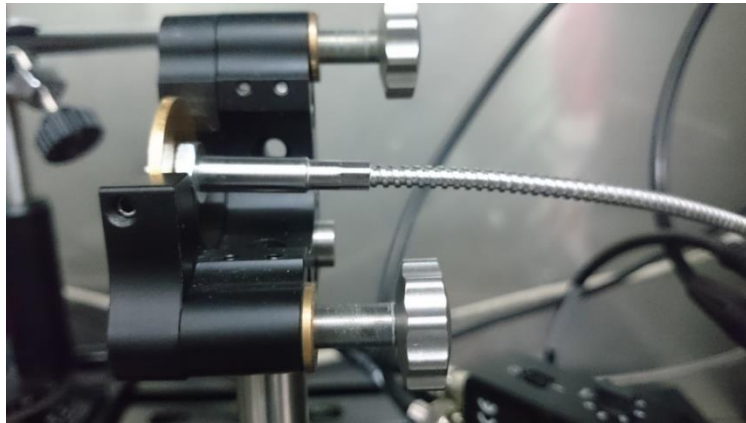


Ilustración 29: Imagen lateral del soporte de la pata común con el bundle insertado

Por último, el aislador óptico y el láser estarán conectados entre sí, con cuidado de poner el aislador en el sentido de emisión del láser atendiendo a las flechas que tiene indicadas en su parte superior. La conexión con ambos láseres es idéntica y todos los conectores se han fijado con cinta a la placa de montaje para dejarlos lo más estable posible.

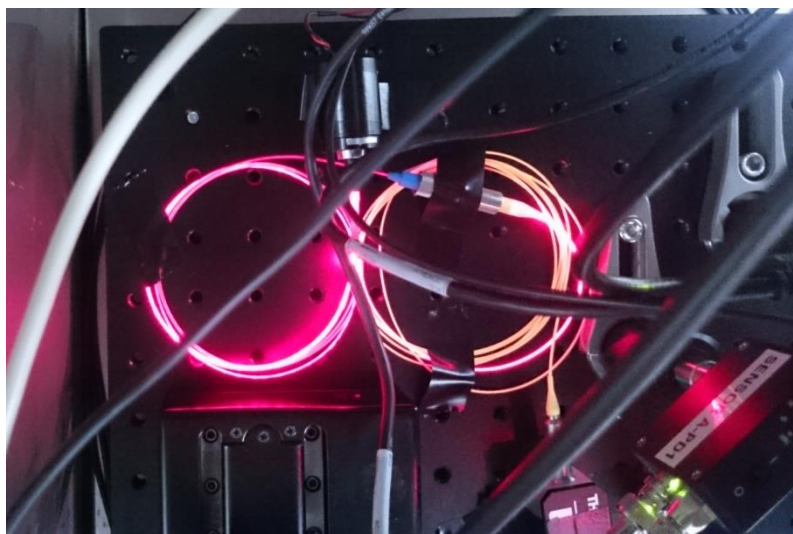


Ilustración 30: Conexión entre el láser de la prueba 1 y el aislador óptico fijado con cinta

Para evitar que los cables eléctricos obstruyan algún desplazamiento requerido en la medida o que muevan y/o desajusten alguno de los componentes, se han fijado mediante cinta adhesiva a las paredes. Además, respecto a la fibra óptica, se ha fijado a la plataforma de modo que se minimicen los posibles movimientos dentro del habitáculo y también para evitar pérdidas de señal por curvatura. Otros elementos de volumen considerable como el láser también se han fijado con el fin de evitar potenciales problemas como movimientos indeseados.

Una vez se tiene el montaje interior acabado, se cierra la puerta de la cámara climática asegurándose de que la puerta no atrape ningún cable, y a partir de ahí no se tiene visión del interior.



Esta descripción del montaje interno es válida para todas las medidas que se han realizado. Los únicos cambios que se han hecho (cambio de ganancia, cambio de bundle y cambio de láser) no han variado el esquema del montaje tal, solamente los resultados. La única diferencia subrayable consiste en que el tamaño del láser 2 es significativamente mayor que el del láser 1.

En cuanto a la parte externa del montaje, es idéntica para todos los ensayos que se han hecho salvo cuando se ha usado el láser 2, que tiene alimentación especial (sus características de funcionamiento también son diferentes de las del láser 1). Se tienen principalmente el PC, los multímetros y el generador de funciones, que están conectados mediante cables GPIB para poder pasar la señal de forma simultánea a todos ellos.

El generador de funciones será el encargado de enviar la señal de trigger a los multímetros de forma simultánea mediante cables con conexión BNC.



Ilustración 31: Detalle de la salida dividida en dos que está conectada al trigger externo de los multímetros



Ilustración 32: Conexión de la salida del generador con el trigger externo de los multímetros

La única variación reside en la alimentación de los láseres, ya que el láser 2, debido a sus mejores prestaciones, posee una alimentación específica (explicada en el anexo I) que se ha colocado sobre el PC por motivos de longitud de cables, mientras que la alimentación del láser 1 es la habitual y va directamente conectado al ladrón situado sobre la mesa.

Todo el montaje estará controlado mediante un programa hecho en LabView que se detalla con más precisión en el anexo II.

7.2.3. Método de medición utilizado

A continuación se expone la metodología llevada a cabo para la realización de todas las medidas que van a permitir el estudio del efecto de la temperatura en el funcionamiento de los sensores de fibra óptica a la hora de medir la distancia entre el álabe y la carcasa de la turbina. El equipamiento utilizado viene descrito en el anexo I, de modo que en este apartado únicamente se expone su funcionamiento.

En primer lugar, el primer paso consiste en asegurarse de que el álabe y el láser estén perpendiculares y de que éste incida sobre una superficie plana y lisa (en el apartado anterior hay fotos al respecto). Una vez eso esté comprobado, el siguiente paso es acercar el álabe lo máximo posible al soporte del bundle de forma que se pueda tener una medida con un offset muy pequeño. Este valor de offset es el que se tendrá que mantener para toda la tanda de medidas, por lo que es importante recordarlo y respetarlo. Estando en este punto, la posición respecto de la posición de Home (posición con la que se asegura que se parte de una posición de referencia, posición 0

mm) será la posición inicial de medida. Tras estas comprobaciones, el montaje ya está preparado para medir.

Antes de comenzar con la primera medida, es necesario esperar un tiempo estimado de (como mínimo) 30 minutos de modo que el láser que se emplee en cada momento tenga tiempo de calentarse y funcionar de forma estable. De este modo evitamos irregularidades de comportamiento. En cualquier caso, este tiempo de calentamiento se puede aprovechar para ir aclimatando la cámara a la temperatura deseada, ya que la cámara climática tarda aproximadamente 40 minutos en estabilizarse en la temperatura que se le indique. Además del láser, este tiempo puede aprovecharse para encender el resto de componentes y comprobar su correcto funcionamiento (LabView, motor, multímetros, fotodetectores...).

Una vez comprobado que todo está correctamente, se puede proceder a medir. El primer paso para medir consiste en llevar el álabe a la posición de Home del motor, para desde ahí ir a la posición inicial de medida calculada previamente.

Desde Home nos movemos hasta la posición de offset indicada previamente pero sin pasarse del offset, ya que si nos pasamos, eso significará que el álabe ha golpeado el soporte del bundle, lo que implicará que se habrá desalineado y habrá que comenzar el proceso configuración de nuevo y repetir las medidas que se hayan hecho hasta el momento. Llegados al punto de offset, álabe y bundle deben estar muy cerca:

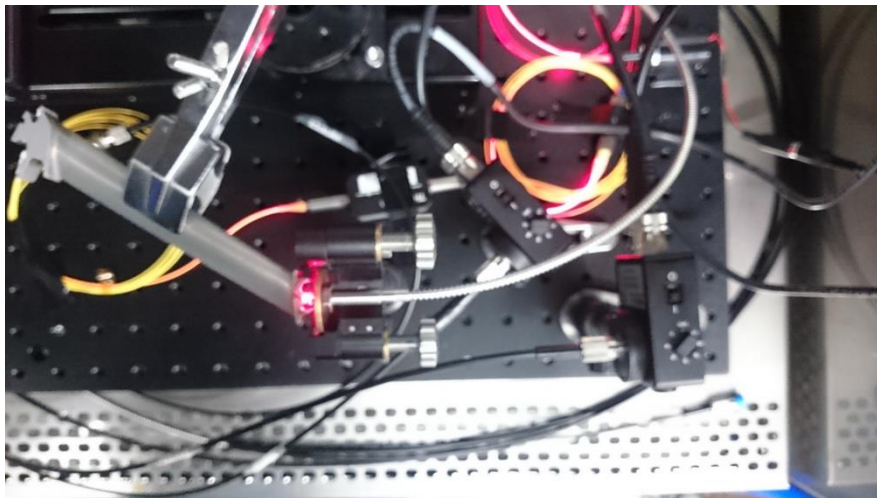


Ilustración 33: Posición de offset

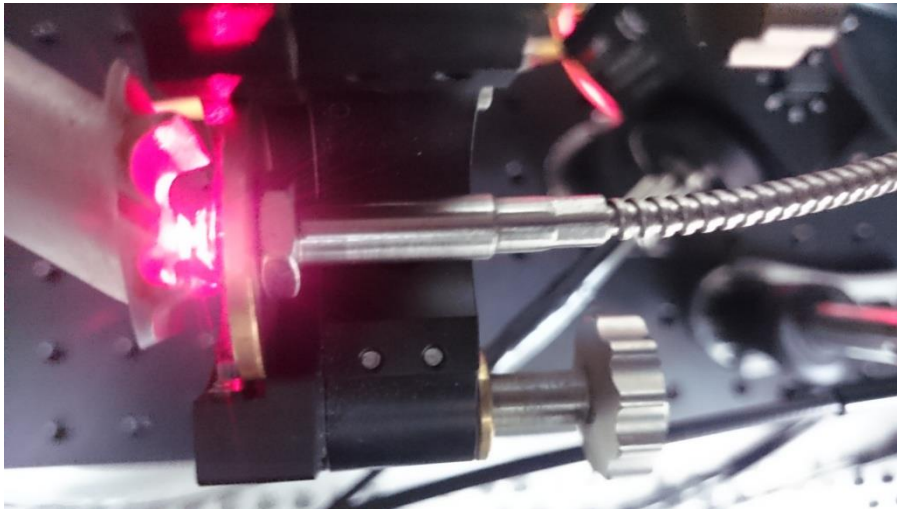


Ilustración 34: Detalle de la posición de offset

A partir de ahí, mediante el programa de LabView, se configurará la medición de la forma que el usuario desee. Se puede configurar el rango de calibración, el paso de calibración, el número de muestras y NLPC (nonlinear predictive control, método para estimar valores futuros). En el caso que nos ocupa, se ha cubierto un rango de 10mm con paso de 25 micrómetros (aproximadamente 20 minutos de duración cada toma de medidas). Una vez configurado, se da al botón iniciar calibración. El resultado de este proceso es la obtención de la curva de calibración para el caso determinado.

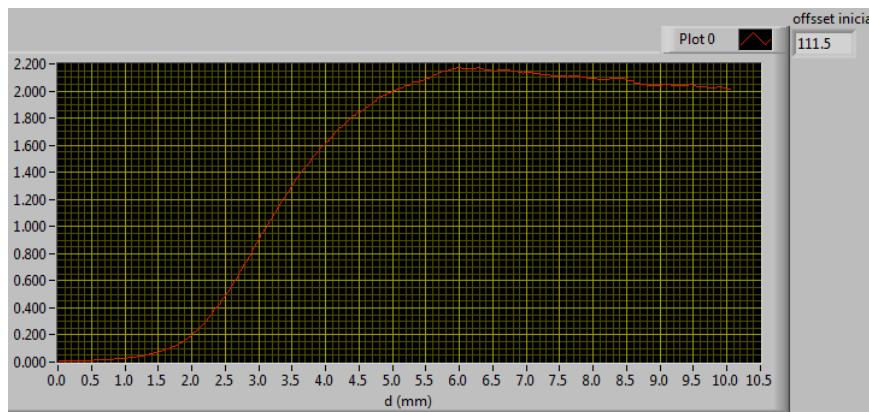


Ilustración 35: Curva de calibración obtenida en un caso concreto

Para minimizar posibles errores, en este experimento se han llevado a cabo cuatro repeticiones para cada caso y se ha promediado el valor. De esta forma se pueden descartar y/o minimizar aquellas medidas que difieran mucho del valor medio.

Una vez se tienen todas las medidas, el programa de LabView devuelve los resultados de ambos fotodetectores en cada iteración del programa y su cociente $V2/V1$ en forma de archivo de texto (extensión txt). Para procesarlos, se trasladan a un Excel y ahí se manipulan para lograr las gráficas deseadas y obtener así las líneas de tendencia para cada una de las regiones lineales que interesan. En etapas futuras del proyecto se contempla la posibilidad de mostrar otra interacción entre los valores $V1$ y $V2$ distinto

del cociente, pero en este caso siempre se mostrará $V2/V1$.

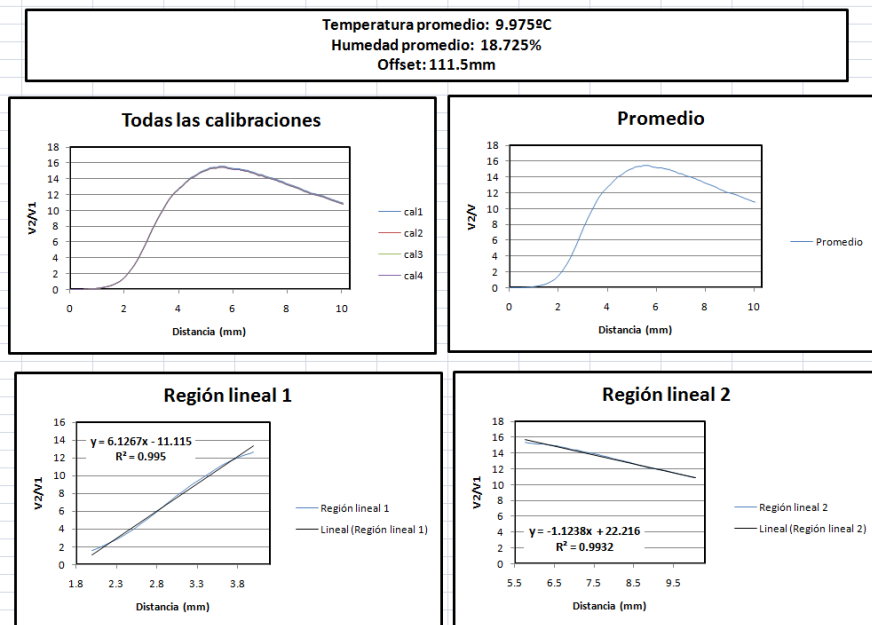


Ilustración 36: Ejemplo de resultados obtenidos tras medición y procesado en Excel

Una vez se tienen todos los datos de un caso concreto, salvo que se deba cambiar el álabe o el bundle, bastará con cambiar el parámetro que se desee (ganancia de los fotodetectores, temperatura, cambio de láser...) y repetir el proceso. En el caso de que accidentalmente, o por la sustitución de un elemento, se vea afectado el offset, habrá que recalcular un nuevo offset y realizar las medidas con ese nuevo valor.

7.2.4. Condiciones de medición teniendo en cuenta los equipos que van dentro de la cámara climática

Uno de los aspectos importantes a tener en cuenta antes de realizar las mediciones es el de considerar el margen térmico de funcionamiento de los equipos que van a ir en el interior de la cámara climática. En concreto, los equipos que se van a ver sometidos a variación de temperatura y humedad son el láser, fotodetectores, motor y aislador óptico. Se han consultado sus correspondientes datasheets para ver sus márgenes de funcionamiento.

El láser que se ha utilizado en las primeras mediciones es de Frankfurt Laser Company, modelo HSML-0660-20-FC (que se ha llamado láser 1), del que se ha consultado su datasheet para ver las especificaciones y rango de funcionamiento. El rango de temperaturas que soporta va desde los -10°C hasta los 50°C . Ahora hace falta comprobar que los demás elementos que van dentro de la cámara climática también soporten este rango.

Aislador: Marca Thorlabs y modelo Visible Fiber Optic Isolators with SM Fiber (650 - 670 nm). No tiene limitación de temperatura.

Motor: Marca Thorlabs modelo LTS 150. El rango de temperaturas que soporta

va desde los -20°C a los 40°C .

Fotodetectores: Marca Thorlabs modelo PDA100A-EC. Rango de funcionamiento entre 10°C y 40°C .

Por tanto, las pruebas se tienen que realizar en un rango que va desde los 10°C a 40°C debido a que los fotodetectores y el motor limitan el margen térmico. Se realizarán en ese rango en pasos de 10°C . Estas pruebas se llevarán a cabo la cámara climática de Leioa indicada previamente.

En cuanto a las segundas pruebas que se han realizado, todos los componentes materiales que se han usado han sido los mismos salvo el láser, que en este caso ha sido de la marca Power Technology modelo IQ1C30(643-80)F2/547 (que se ha llamado láser 2). Este láser, tras consultarlo en el datasheet, tiene como margen térmico un rango que va de los 15°C a los 35°C , por lo que las pruebas tendrán que estar limitadas a ese rango. Como conclusión, para los ensayos con este láser se han programado pruebas a 15°C , 20°C , 30°C y 35°C .

En cuanto a los bundles de fibra óptica que se han utilizado, ambos poseen tolerancias a temperaturas mucho más elevadas que los márgenes térmicos de los componentes aquí indicados, así que los bundles no van a ser elementos limitantes en ningún caso.

En caso de que (por el motivo que sea), haya que cambiar algún otro componente por otro diferente o de otra marca, habrá que comprobar siempre su margen térmico de funcionamiento antes de llevar a cabo ninguna medida.

7.2.5. Programa de medidas llevado a cabo

Tal y como se ha visto en el apartado anterior, para el primer láser se llevaron a cabo medidas con dos bundles (trifurcado y cuatrifurcado) a cuatro temperaturas diferentes: 10°C , 20°C , 30°C y 40°C en las instalaciones de Leioa.

Se ha hecho uso de dos sensores de medición de TC: el primero de ellos hace uso de un haz de fibras (también llamado bundle) trifurcado, mientras que el segundo hace uso de un haz de fibras cuatrifurcado (en el Anexo I hay disponibles más fotos de las distintas patas de cada bundle).

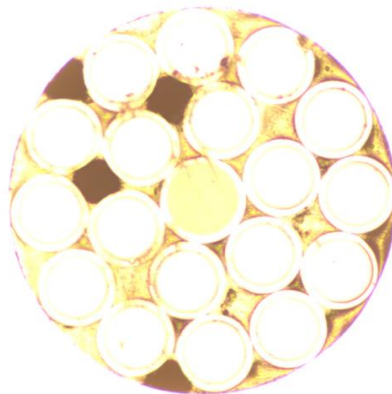


Ilustración 37: Pata común del bundle trifurcado

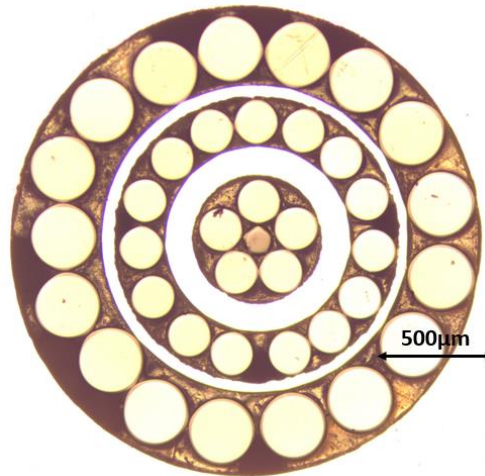


Ilustración 38: Pata común del bundle cuatrifurcado

Los sensores se han probado bajo unas determinadas condiciones, tanto de temperatura como de ganancia de los fotodetectores (la humedad se anotó pero no se controló debido a que el objetivo es el estudio del efecto de la temperatura en el sensor). En primer lugar se tomaron las medidas para el sensor con haz trifurcado y una configuración de ganancia asimétrica 10-30, donde 10 dB son para la medida de V1 y 30 dB para V2 y para todas las temperaturas a medir que se decidan (10, 20, 30 y 40 grados centígrados en este caso); y posteriormente con una ganancia simétrica de 20 dB para ambos fotodetectores y para las mismas temperaturas de antes. Después, se realizaron las mismas medidas para el sensor con haz cuatrifurcado midiendo la diferencia entre el anillo receptor más cercano al centro y el anillo receptor más externo. De forma adicional, para este bundle de haz cuatrifurcado se hicieron medidas con una relación de ganancia de 10-40.

El rango de medidas que se analizaron fue de 10 mm en pasos de 25 micras para obtener una buena resolución en los resultados. Las medidas comenzaron desde el punto más cercano posible del bundle al álabe dejando siempre un margen (offset) que se debe tener en cuenta. Cada una de las mediciones duró alrededor de 20 minutos. El punto desde el que se comienza la medición (offset) se anotó y fue el mismo en todas las mediciones en aras de obtener resultados fiables.

Las pruebas realizadas con el segundo láser fueron idénticas en configuración de ganancias pero no en las temperaturas, que fueron 15, 20, 30 y 35 grados centígrados debido a la limitación de temperaturas que impone este láser ni por el bundle a utilizar, que fue únicamente el cuatrifurcado.

El interés de hacer las pruebas con dos láseres diferentes está basado en que el láser 2 es mucho más estable que el láser 1, ya que compensa mejor las variaciones temperatura y emite mayor potencia. De este modo se puede valorar también el efecto que tiene el uso de uno u otro tipo de láser.

7.2.6. Resultados de las medidas experimentales

Una vez se ha explicado todo lo relacionado con el proceso de medición y con cómo se han obtenido las medidas, es el momento de enseñar los resultados que se han tenido.

Se comienza por las medidas hechas con el primer láser y el bundle trifurcado con ganancia asimétrica de 10-30 para los fotodetectores, siendo el de 10 dB el fotodetector de V1. Para no saturar el documento con gráficas y no ser repetitivo, solo se mostrarán las gráficas de la primera medición realizada, correspondiente a 10°C. El resto de resultados y medidas se encuentran en los archivos Excel que se han generado y que se pueden consultar si así se desea.

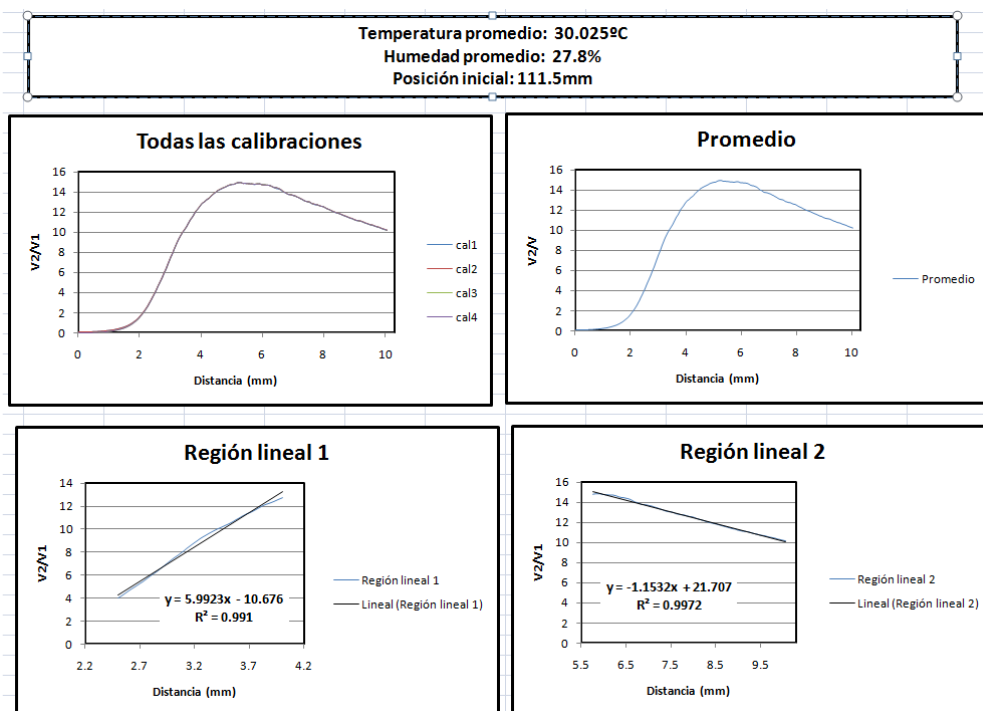


Ilustración 39: Resultados de bundle cuatrifurcado con ganancias 10-30 y 10°C

En la imagen se pueden apreciar todos los datos relativos a las cuatro medidas realizadas, (valores medios de temperatura, humedad, offset y gráficas). En las gráficas referentes a las regiones lineales se ha indicado también la línea de tendencia junto con su fórmula y coeficiente de determinación (R^2). En el caso de la primera región se ha considerado la zona comprendida entre los 0.3 y 1 mm, mientras que para la región dos se han tenido en cuenta los valores entre 3 y 7 mm. Esto es igual para todas las medidas realizadas con esta configuración.

De acuerdo con lo indicado en el párrafo anterior, y teniendo en cuenta que lo que nos interesa para hacer el análisis es lo que ocurre en las regiones lineales, se indicarán los resultados en forma gráfica y de tabla de modo que sean más fáciles de interpretar. Todos los valores que se muestran a partir de este punto son los valores promediados obtenidos a partir de cuatro mediciones con la misma configuración. Junto con la

gráfica de todos los casos de temperatura promediados, se mostrarán las gráficas de las curvas de la región I y II linealizadas para ver las diferencias de pendientes y se mostrarán tablas con las diferencias de pendientes y distancias para poder hacer un análisis con datos concretos.

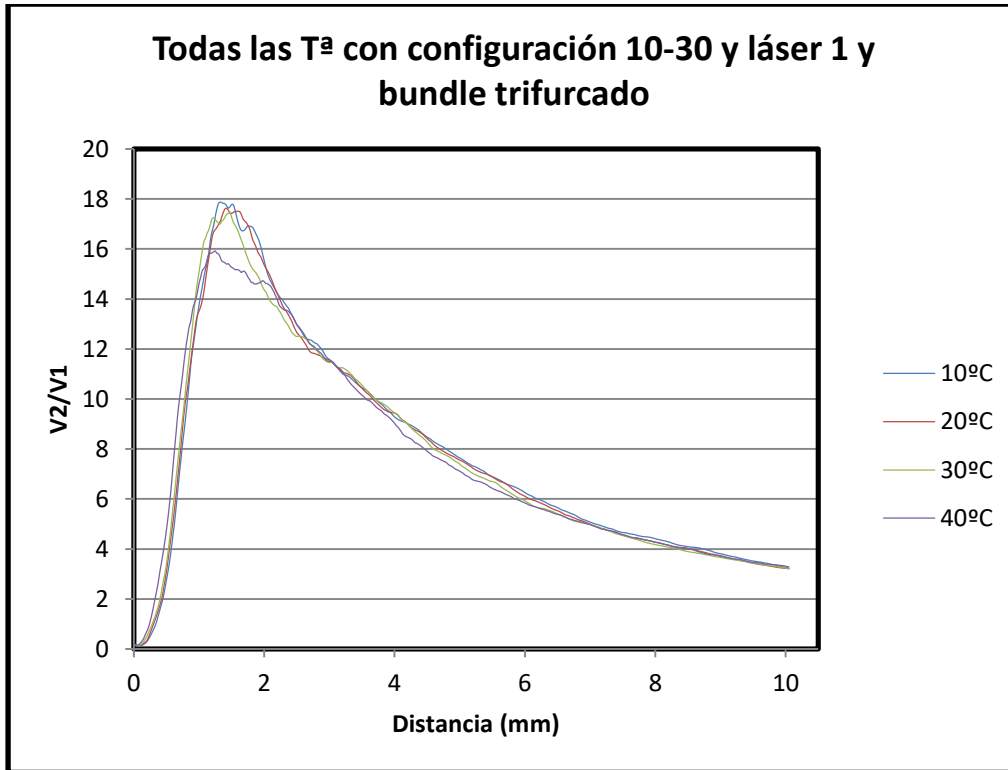


Ilustración 40: Resultados para 10-30, láser 1 y bundle trifurcado

Si nos centramos en las regiones lineales de la curva, se tiene lo siguiente:

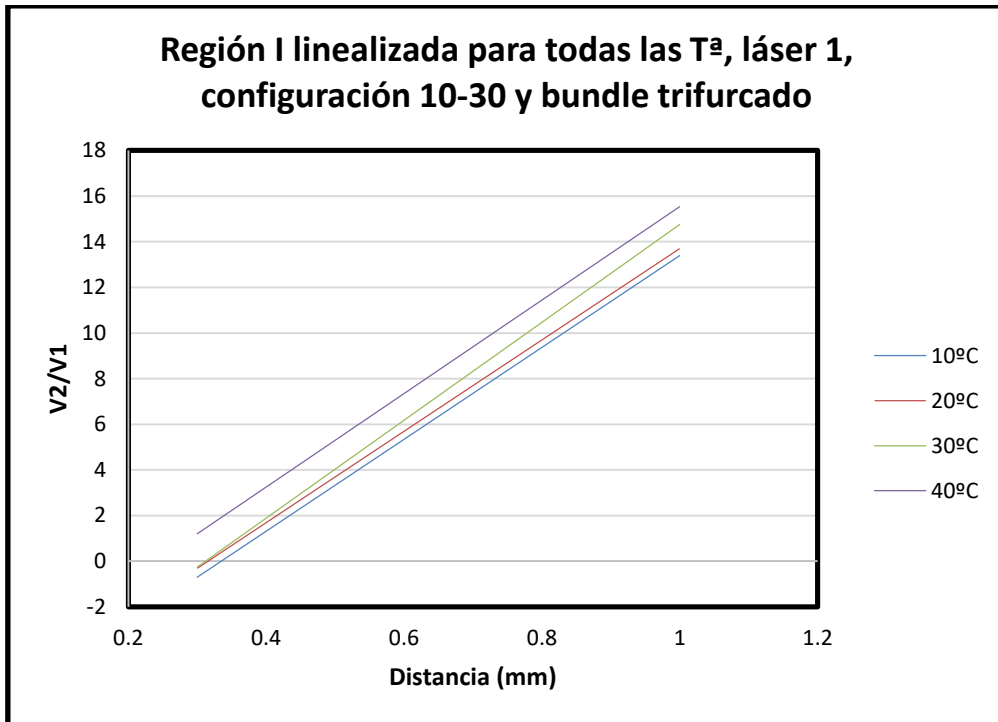


Ilustración 41: Curvas linealizadas de la región I

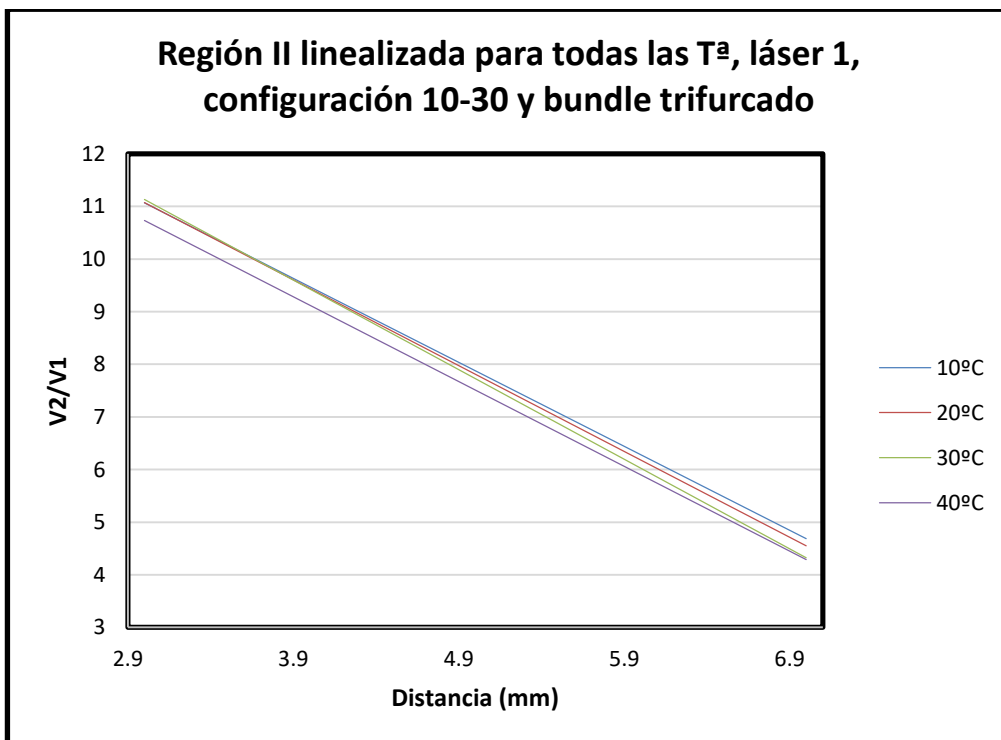


Ilustración 42: Curvas linealizadas de la región II

Matemáticamente, los valores de estas representaciones son:

Serie	Ecuación de región I linealizada	R ² región I	Ecuación de región II linealizada	R ² región II
10°C	20.126x-6.7347	0.9803	-1.5951x+15.853	0.9873
20°C	20.009x-6.3123	0.986	-1.6301x+15.962	0.9862
30°C	21.442x-6.6879	0.9875	-1.7018x+16.237	0.9794
40°C	20.474x-4.9386	0.9882	-1.6106x+15.564	0.963
Variación máxima de pendiente (adimensional)	1.433	0.0079	0.1067	0.0243
Variación máxima de pendiente (%)	7.161	0.805	6.689	2.523
Variación máxima del factor independiente (adimensional)	1.796	-	0.673	-
Variación máxima del factor independiente (%)	36.36	-	4.32	-

Tabla 4: Resultados para 10-30, láser 1 y bundle trifurcado

V2/V1	Distancia (mm) a 10°C	Distancia (mm) a 20°C	Distancia (mm) a 30°C	Distancia (mm) a 40°C	Variación (mm)	Variación (%)
4	0.575	0.55	0.53	0.432	0.143	24.86
8	0.74	0.72	0.69	0.61	0.13	17.56
12	0.91	0.9	0.86	0.775	0.135	14.83
14	1.01	1.05	0.945	0.93	0.12	11.42

Tabla 5: Tabla de distancias de la región I

V2/V1	Distancia (mm) a 10°C	Distancia (mm) a 20°C	Distancia (mm) a 30°C	Distancia (mm) a 40°C	Variación (mm)	Variación (%)
10	3.7	3.66	3.7	3.54	0.16	4.32
8	4.79	4.69	4.6	4.43	0.36	7.51
6	6.19	6.075	5.95	5.825	0.365	5.89
5	7.075	6.99	6.975	6.92	0.155	2.19

Tabla 6: Tabla de distancias de la región II

En este caso se puede ver que para ambas regiones el valor obtenido para 40°C se aleja de las demás medidas aunque todas tengan una forma de curva común. En cuanto a las otras tres temperaturas, tienen valores muy similares, con la salvedad del punto cercano al máximo, en el que actúan de forma diferente.

En cuanto a la región I, si unimos la diferencia de pendientes elevada (7.161%) a la diferencia de la tabla de distancias, se puede concluir que para este caso en esta región la temperatura afecta demasiado como para ser utilizada, especialmente para la medida de 40°C, que es el límite de temperatura de funcionamiento de los fotodetectores.

En cuanto a la región II, los valores tanto de diferencia de pendiente como de distancias son menores que los logrados en la región anterior, pero teniendo en cuenta que para este caso también se tiene una diferencia de pendientes elevada (6.689%) y que la diferencia de distancias llega a ser de 0.365 nm (8.12%), se puede decir que la temperatura afecta demasiado al comportamiento de esta configuración de medidas como para considerarlo utilizable.

A continuación se van a mostrar de la misma forma los resultados obtenidos para el láser 1 y el bundle trifurcado pero con la configuración de ganancia simétrica para los fotodetectores (20 dB ambos).

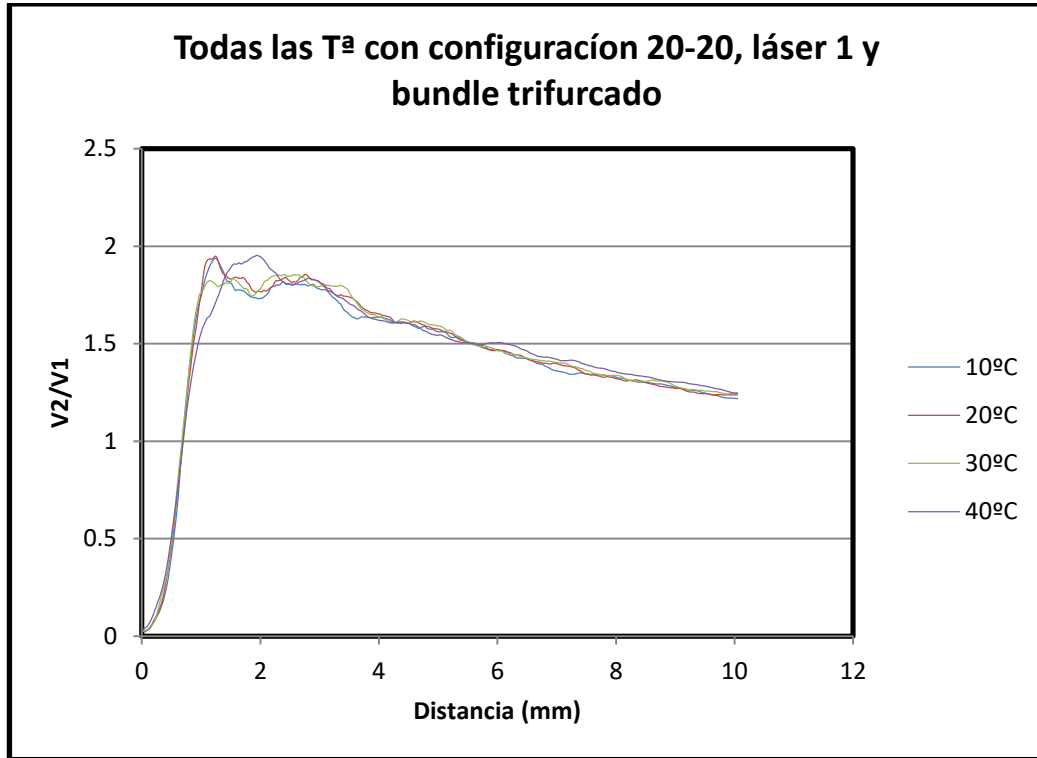


Ilustración 43: Resultados para 20-20, láser 1 y bundle trifurcado

Las curvas linealizadas de ambas regiones de esta configuración son:

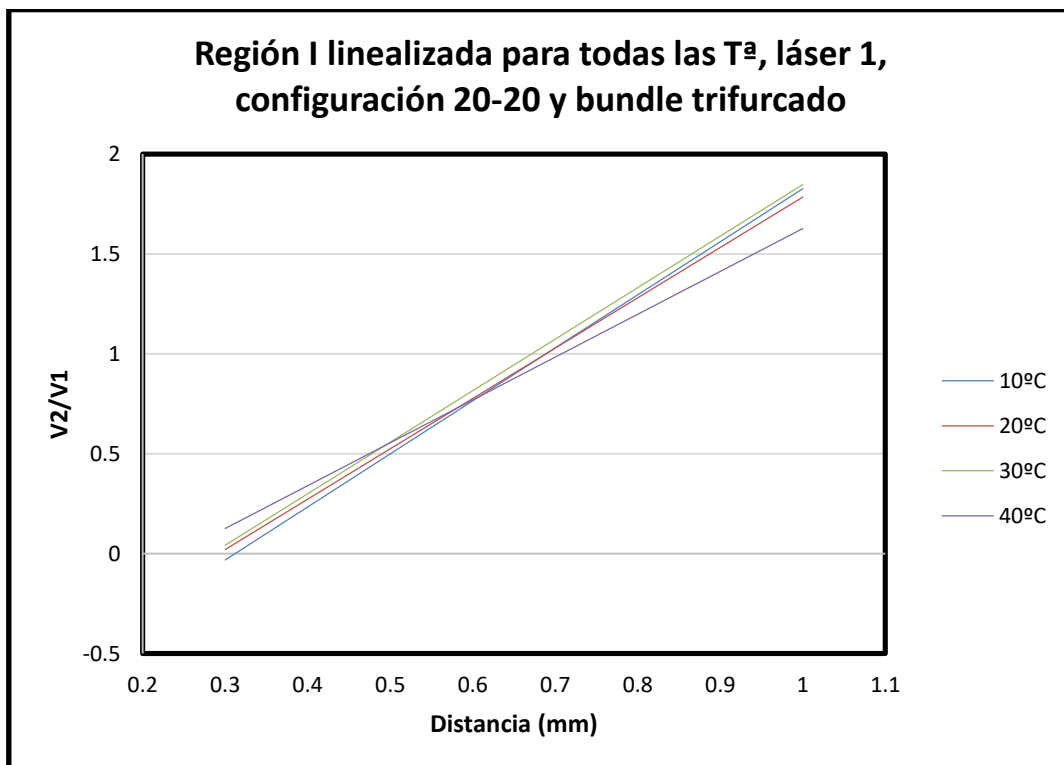


Ilustración 44: Curvas linealizadas de la región I

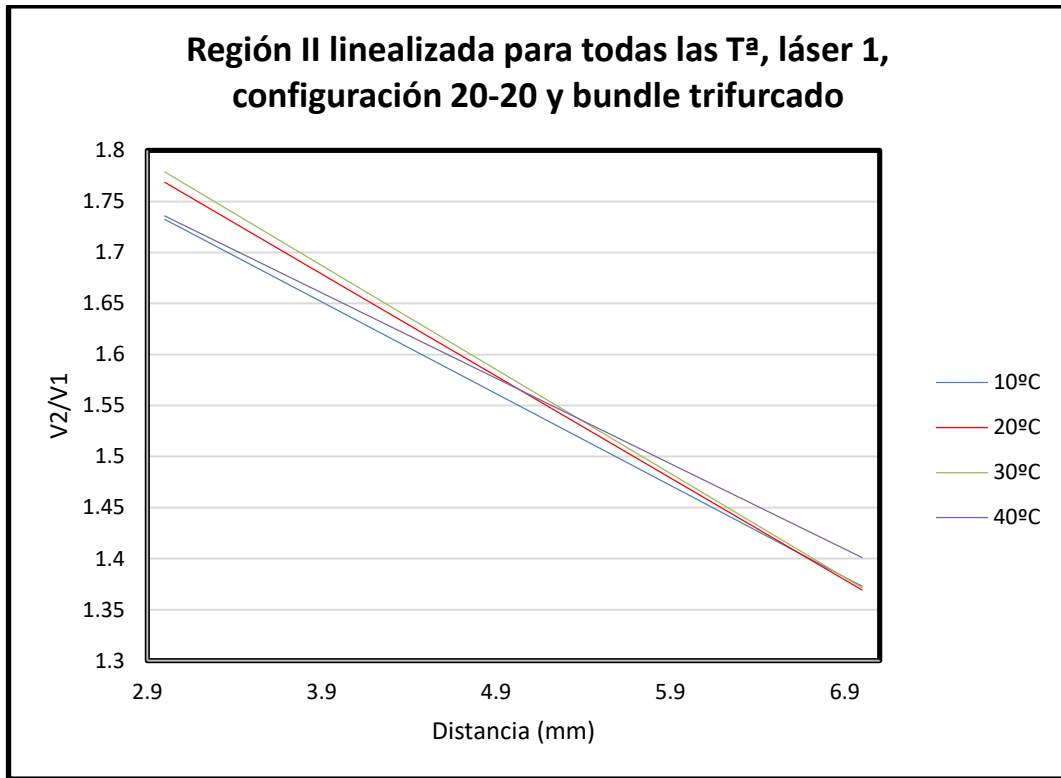


Ilustración 45: Curvas linealizadas de la región II

Y los valores matemáticos de estas gráficas:

Serie	Ecuación de región I linealizada	R ² región I	Ecuación de región II linealizada	R ² región II
10°C	2.6555x-0.8286	0.984	-0.0899x+2.0022	0.9717
20°C	2.5207x-0.7358	0.9932	-0.0999x+2.0685	0.9842
30°C	2.5799x-0.7322	0.99	-0.1019x+2.0847	0.9591
40°C	2.1453x-0.5179	0.9933	-0.0837x+1.9869	0.9293
Variación máxima de pendiente (adimensional)	0.5102	0.0093	0.0182	0.0549
Variación máxima de pendiente (%)	23.782	0.945	21.744	4.562

Variación máxima del factor independiente (adimensional)	0.3107	-	0.0978	-
Variación máxima del factor independiente (%)	59.99	-	4.92	-

Tabla 7: Resultados para 20-20, láser 1 y bundle trifurcado

V2/V1	Distancia (mm) a 10°C	Distancia (mm) a 20°C	Distancia (mm) a 30°C	Distancia (mm) a 40°C	Variación (mm)	Variación (%)
0.5	0.537	0.52	0.515	0.49	0.047	8.75
1	0.687	0.69	0.675	0.7	0.025	3.57
1.5	0.86	0.875	0.84	0.95	0.11	11.57

Tabla 8: Tabla de distancias de la región I

V2/V1	Distancia (mm) a 10°C	Distancia (mm) a 20°C	Distancia (mm) a 30°C	Distancia (mm) a 40°C	Variación (mm)	Variación (%)
1.7	3.35	3.675	3.65	3.525	0.325	8.84
1.6	4.525	4.5	4.825	4.53	0.325	6.73
1.5	5.63	5.6	5.525	5.55	0.105	1.86
1.4	6.66	6.775	7.125	7.4	0.74	10

Tabla 9: Tabla de distancias de la región II

En este caso los resultados para la región I tienen pendientes que varían mucho más si las comparamos con el caso anterior (23.782% frente a 7.161%); y lo mismo pasa en la segunda región, que tiene menor valor de pendiente que el caso anterior pero los valores difieren más entre sí, siendo la medida de 40°C la que más se diferencia (al igual que pasaba en el caso anterior).

Con esta configuración, la diferencia entre pendientes es mayor que para la primera configuración. En cuanto a diferencia de distancias, la variación es menor en la primera región, pero no en la segunda. En general, se puede decir que esta configuración se ve afectada por la temperatura de forma similar a la primera que se ha mostrado, ya que la variación de distancias en la región I es similar (0.11 mm en este caso y 0.143 mm en el anterior) y en la región II también exceptuando la medida de 40°C que da valores demasiado elevados comparados con el resto de temperaturas. De forma análoga a lo visto en el caso anterior, para la región I el rango de temperaturas entre 10°C y 30°C ofrece resultados similares y sería utilizable, mientras que la región II tiene resultados muy diferentes entre las distintas

temperaturas como para poderse usar para medir.

Los siguientes resultados que se van a mostrar son los referentes al bundle cuatrifurcado con el láser 1. En esta configuración la región I es mayor (de 2 a 4 mm) y la región 2 similar (de 5.75 a 10 mm) al caso anterior. El orden en el que se van a mostrar los resultados es: Primero con configuración 10-30, luego con 10-40, luego 20-20 y por último con 0-40.

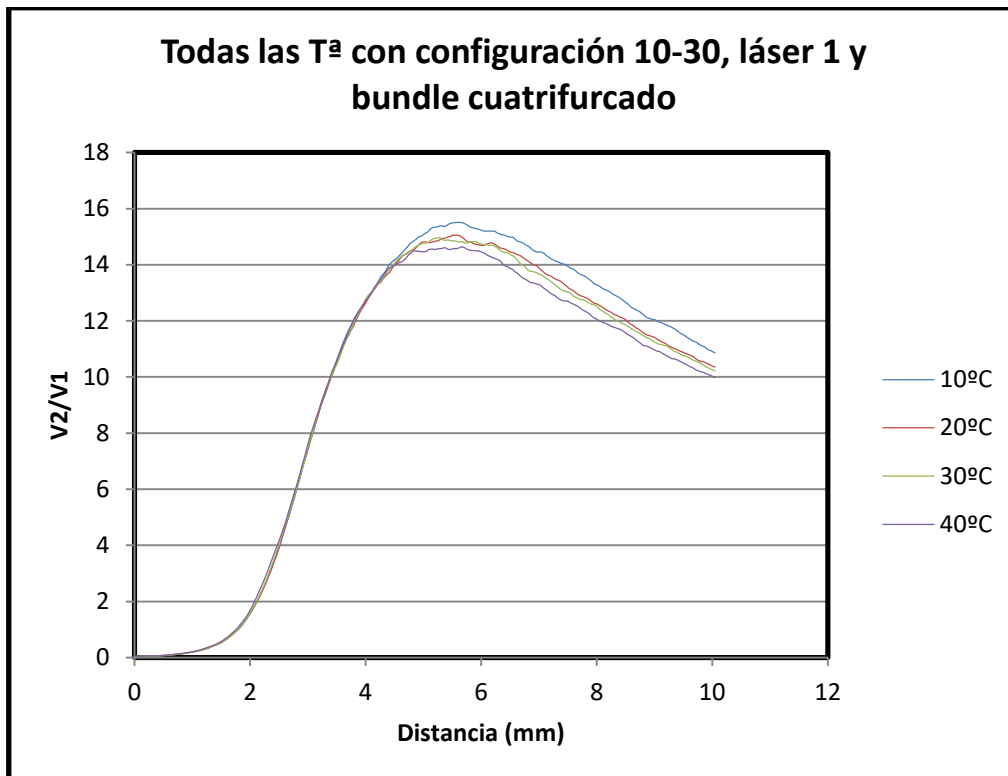


Ilustración 46: Resultados para 10-30, láser 1 y bundle cuatrifurcado

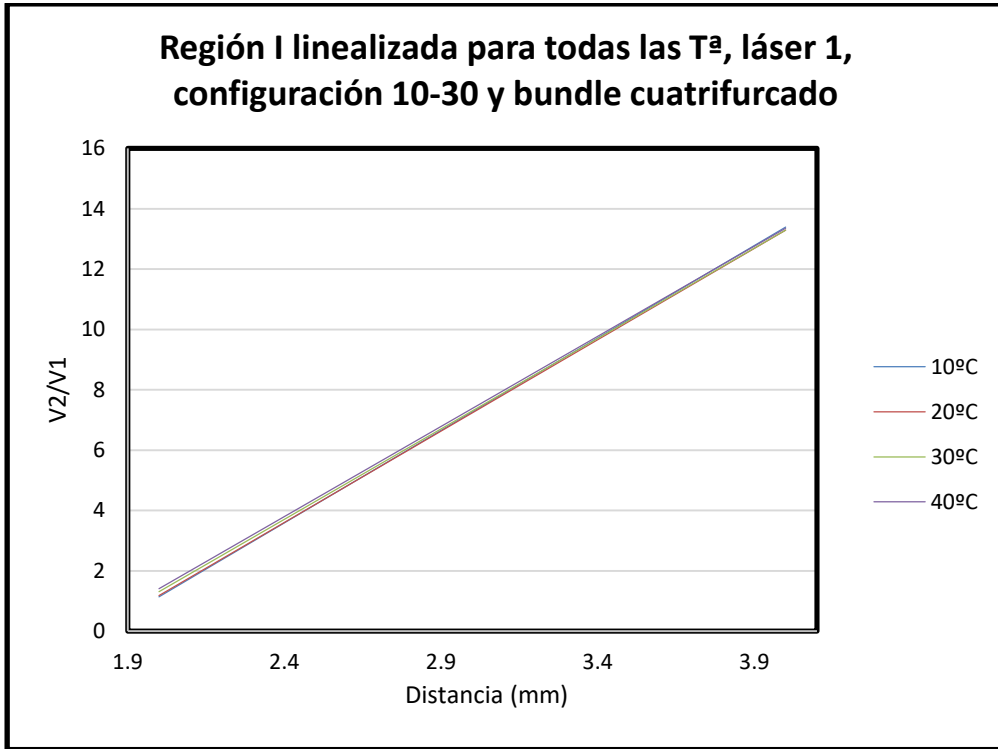


Ilustración 47: Curvas linealizadas de la región I

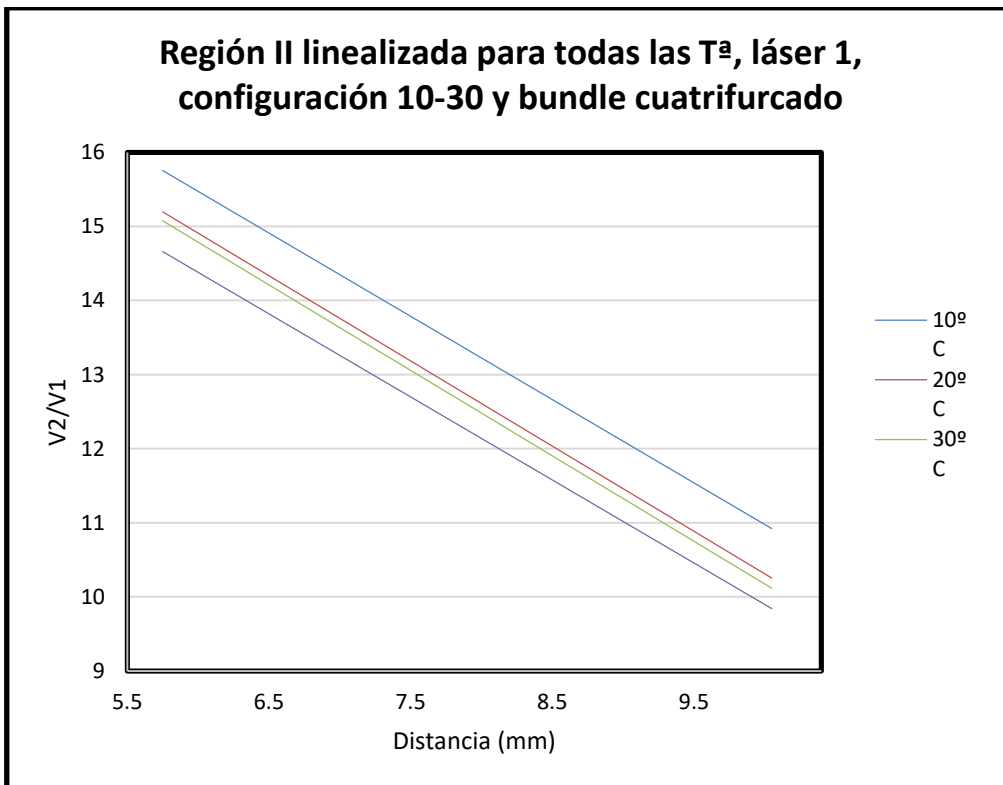


Ilustración 48: Curvas linealizadas de la región II

Los valores que se han obtenido al linealizar han sido:

Serie	Ecuación de región I linealizada	R ² región I	Ecuación de región II linealizada	R ² región II
10°C	6.1267x-11.115	0.995	-1.1238x+22.216	0.9932
20°C	6.0557x-10.932	0.9947	-1.1494x+21.806	0.9943
30°C	5.9923x-10.676	0.991	-1.1532x+21.707	0.9972
40°C	5.9738x-10.54	0.9955	-1.1206x+21.104	0.9981
Variación máxima de pendiente (adimensional)	0.1529	0.0045	0.0326	0.0049
Variación máxima de pendiente (%)	2.559	0.454	2.909	0.493
Variación máxima del factor independiente (adimensional)	0.575	-	1.112	-
Variación máxima del factor independiente (%)	5.45	-	5.27	-

Tabla 10: Resultados para 10-30, láser 1 y bundle cuatrifurcado

V2/V1	Distancia (mm) a 10°C	Distancia (mm) a 20°C	Distancia (mm) a 30°C	Distancia (mm) a 40°C	Variación (mm)	Variación (%)
4	2.525	2.5125	2.5	2.47	0.055	2.17
8	3.085	3.09	3.08	3.06	0.03	0.97
12	3.785	3.835	3.812	3.79	0.045	1.3

Tabla 11: Tabla de distancias de la región I

V2/V1	Distancia (mm) a 10°C	Distancia (mm) a 20°C	Distancia (mm) a 30°C	Distancia (mm) a 40°C	Variación (mm)	Variación (%)
14	7.45	6.91	6.7	6.385	1.065	14.29
13	8.25	7.635	7.53	7.2	1.05	12.72
12	9.05	8.525	8.35	8.05	1	11.05
11	9.91	9.36	9.285	8.97	0.94	9.48

Tabla 12: Tabla de distancias de la región II

En este caso se ve claramente que para la región I apenas importa la temperatura a la que se trabaje ya que todas las curvas se superponen, la diferencia entre pendientes es pequeña y además su variación de distancia también es pequeña (por debajo de los 55 μm). En cuanto a la región II sí que hay diferencias, ya que las curvas para las temperaturas tienen una gran diferencia entre sí en cuanto a distancias se refiere, y no en cuanto a pendientes porque son muy parecidas. Para este caso se puede decir que la temperatura solo afecta a la región II mientras que la región I permanece muy estable frente a variaciones de temperatura.

Los siguientes resultados son para la misma configuración pero con una relación de ganancias de 10-40:

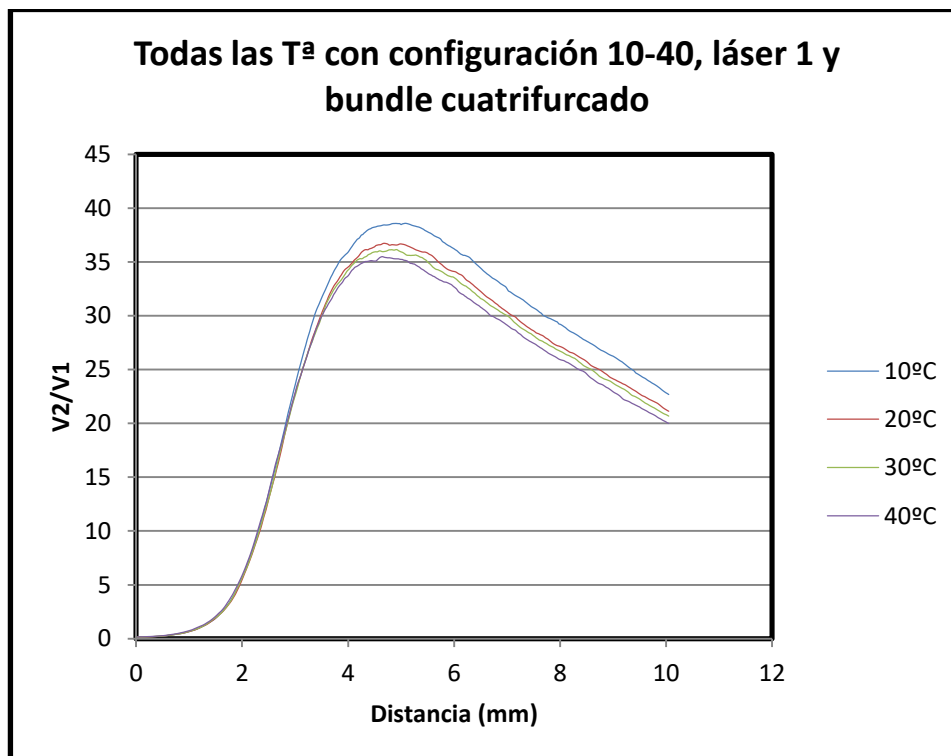


Ilustración 49: Resultados para 10-40, láser 1 y bundle cuatrifurcado

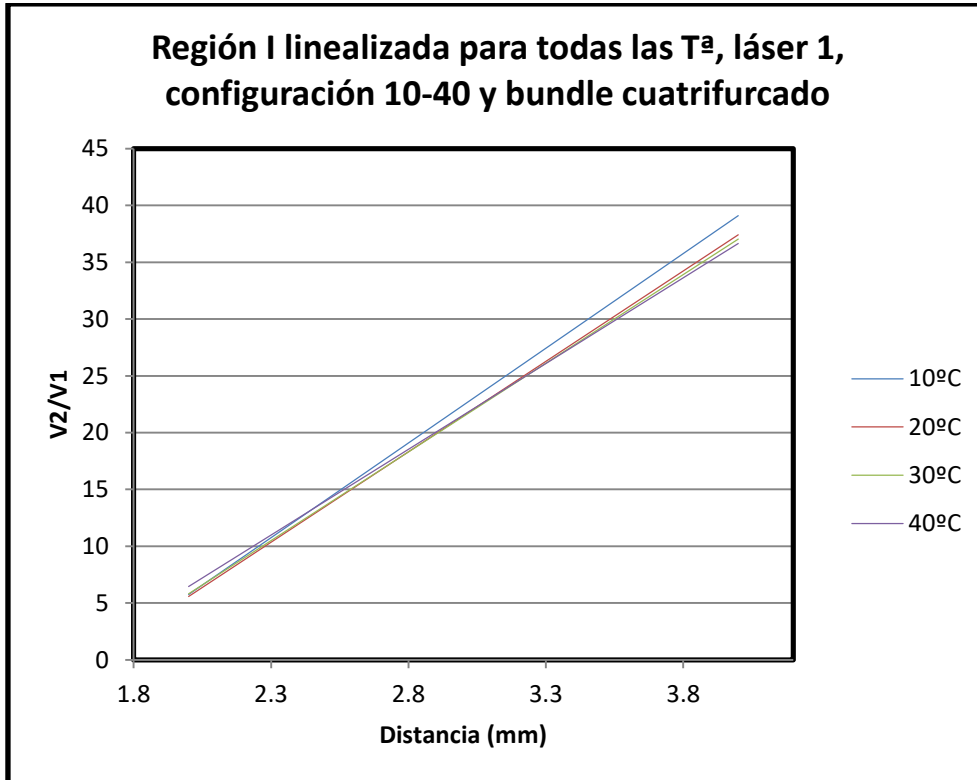


Ilustración 50: Curvas linealizadas de la región I

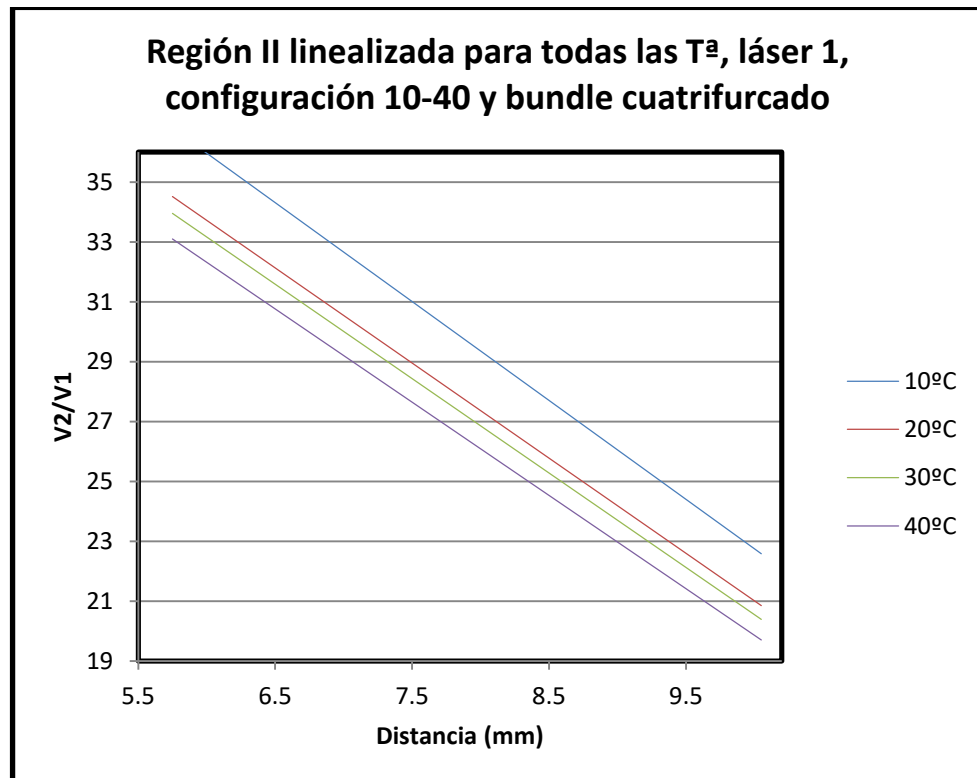


Ilustración 51: Curvas linealizadas de la región II

Serie	Ecuación de región I linealizada	R ² región I	Ecuación de región II linealizada	R ² región II
10°C	16.676x-27.601	0.987	-3.3039x+55.791	0.998
20°C	15.921x-26.265	0.9881	-3.1777x+52.79	0.9966
30°C	15.614x-25.416	0.9873	-3.1539x+52.091	0.998
40°C	15.099x-23.743	0.985	-3.1151x+51.013	0.9983
Variación máxima de pendiente (adimensional)	1.577	0.0031	0.1888	0.0017
Variación máxima de pendiente (%)	10.44	0.31	6.06	0.17
Variación máxima del factor independiente (adimensional)	3.858	-	4.778	-
Variación máxima del factor independiente (%)	16.24	-	9.36	-

Tabla 13: Resultados para 10-40, láser 1 y bundle cuatrifurcado

V2/V1	Distancia (mm) a 10°C	Distancia (mm) a 20°C	Distancia (mm) a 30°C	Distancia (mm) a 40°C	Variación (mm)	Variación (%)
10	2.31	2.33	2.32	2.29	0.04	1.71
15	2.58	2.61	2.62	2.57	0.05	1.9
20	2.825	2.855	2.86	2.8	0.06	2.09
25	3.075	3.14	3.14	3.14	0.065	2.07

Tabla 14: Tabla de distancias de la región I

V2/V1	Distancia (mm) a 10°C	Distancia (mm) a 20°C	Distancia (mm) a 30°C	Distancia (mm) a 40°C	Variación (mm)	Variación (%)
35	6.37	5.7	5.5	5.13	1.24	19.46
30	7.69	7.1	7	6.68	1.01	13.13
25	9.35	8.73	8.59	8.37	0.98	10.48

Tabla 15: Tabla de distancias de la región II

Para esta configuración se tienen resultados muy parecidos a los de la configuración 10-30 en cuanto a distancias se refiere, estando ambos casos por debajo de las 65 micras en la región I y alrededor del milímetro en la región II. Esto nos indica que es una configuración que funciona bien independientemente de la temperatura en la región I pero que se ve afectado por la temperatura en la región II, especialmente para 10°C. La única diferencia destacable respecto al caso anterior es que en esta configuración la diferencia de pendientes es mayor en ambas regiones.

A continuación los resultados para la configuración 0-40 dejando el resto de elementos igual que en el caso anterior.

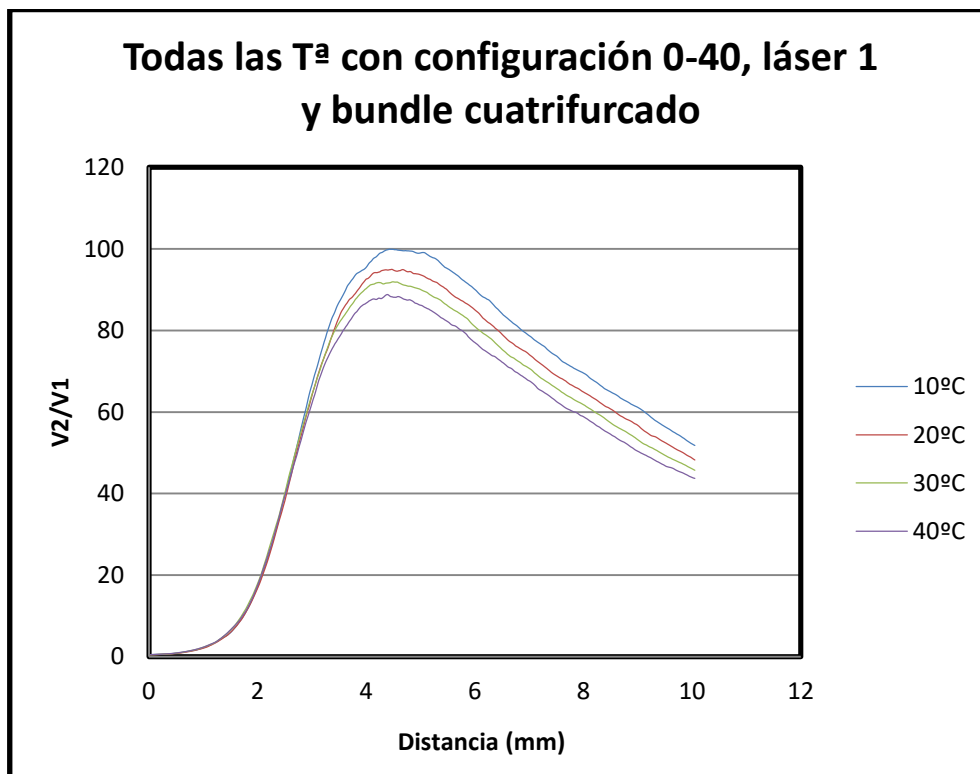


Ilustración 52: para 0-40, láser 1 y bundle cuatrifurcado

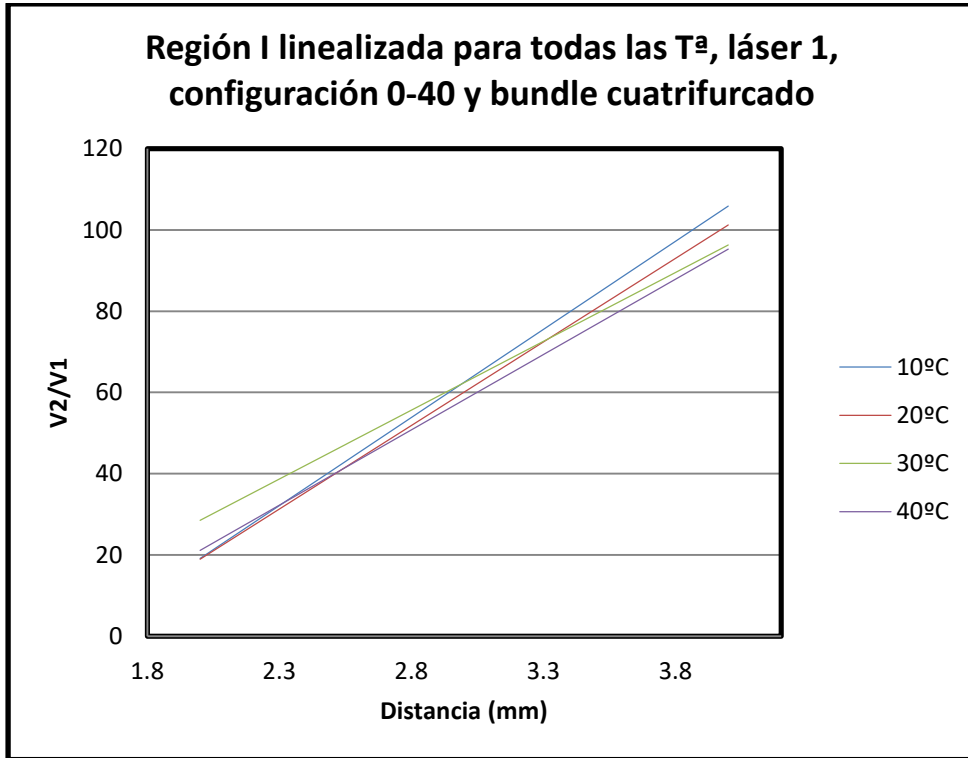


Ilustración 53: Curvas linealizadas de la región I

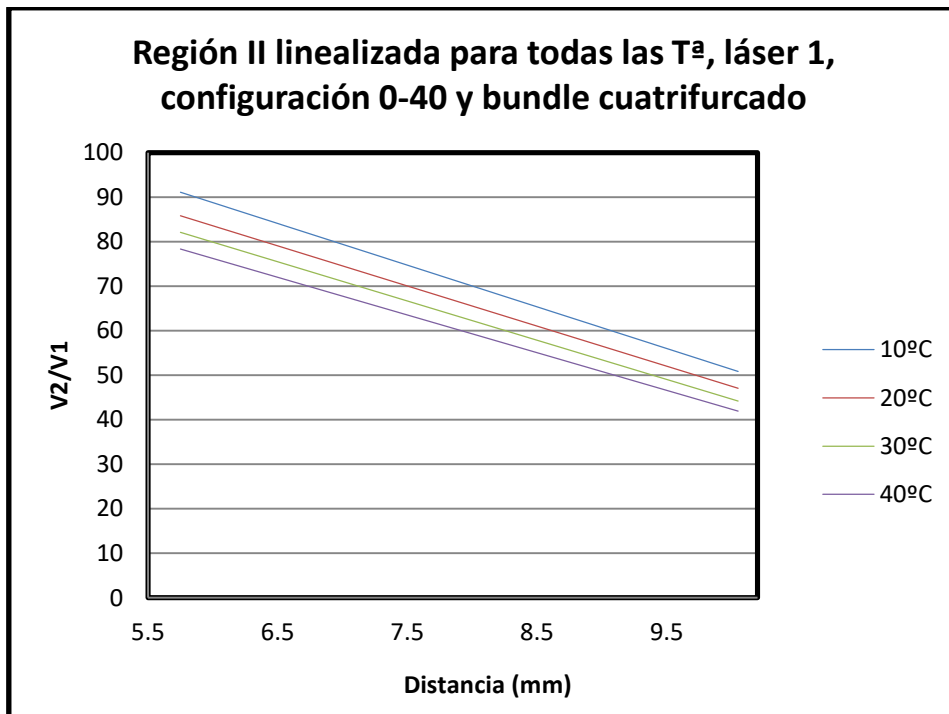


Ilustración 54: Curvas linealizadas de la región II

Serie	Ecuación de región I linealizada	R ² región I	Ecuación de región II linealizada	R ² región II
10°C	43.361x-67.575	0.9783	-9.3637x+144.94	0.9959
20°C	41.128x-63.295	0.9805	-9.0125x+137.63	0.9954
30°C	33.884x-39.239	0.9644	-8.8145x+132.77	0.9956
40°C	37.075x-53.022	0.9753	-8.4684x+127.03	0.9956
Variación máxima de pendiente (adimensional)	9.477	0.0161	0.8953	0.0005
Variación máxima de pendiente (%)	27.96	1.67	10.57	0.05
Variación máxima del factor independiente (adimensional)	28.336	-	17.91	-
Variación máxima del factor independiente (%)	72.21	-	14.09	-

Tabla 16: Resultados para 0-40, láser 1 y bundle cuatrifurcado

V2/V1	Distancia (mm) a 10°C	Distancia (mm) a 20°C	Distancia (mm) a 30°C	Distancia (mm) a 40°C	Variación (mm)	Variación (%)
40	2.51	2.535	2.33	2.52	0.205	8.08
60	2.87	2.915	2.915	2.95	0.08	2.71
80	3.29	3.41	3.42	3.575	0.285	7.97

Tabla 17: Tabla de distancias de la región I

V2/V1	Distancia (mm) a 10°C	Distancia (mm) a 20°C	Distancia (mm) a 30°C	Distancia (mm) a 40°C	Variación (mm)	Variación (%)
80	6.87	6.43	6.085	5.755	1.115	16.22
70	7.93	7.39	7.06	6.73	1.2	15.13
60	9.125	8.58	8.21	7.84	1.285	14.08

Tabla 18: Tabla de distancias de la región II

Para esta configuración los resultados muestran que hay demasiada diferencia de valores entre las distintas temperaturas como para poder usarse independientemente de la temperatura. Además, las pendientes tienen una gran variación lo que hace que cada curva tome una dirección distinta.

Ahora los resultados para la misma configuración y ganancia 20-20:

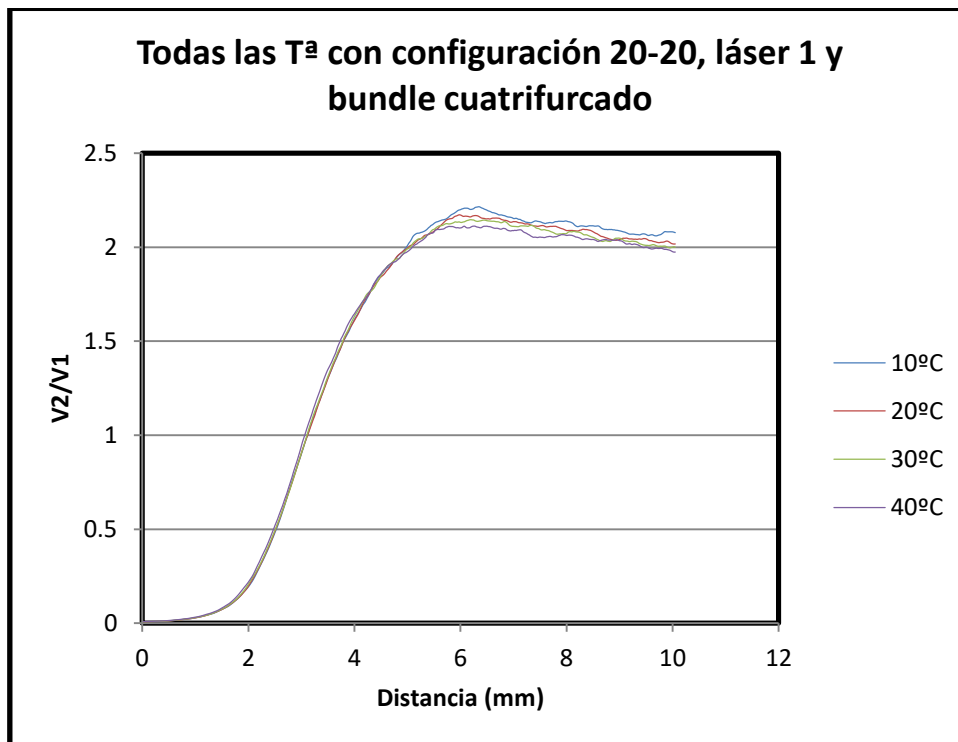


Ilustración 55: Resultados para 10-30, láser 1 y bundle cuatrifurcado

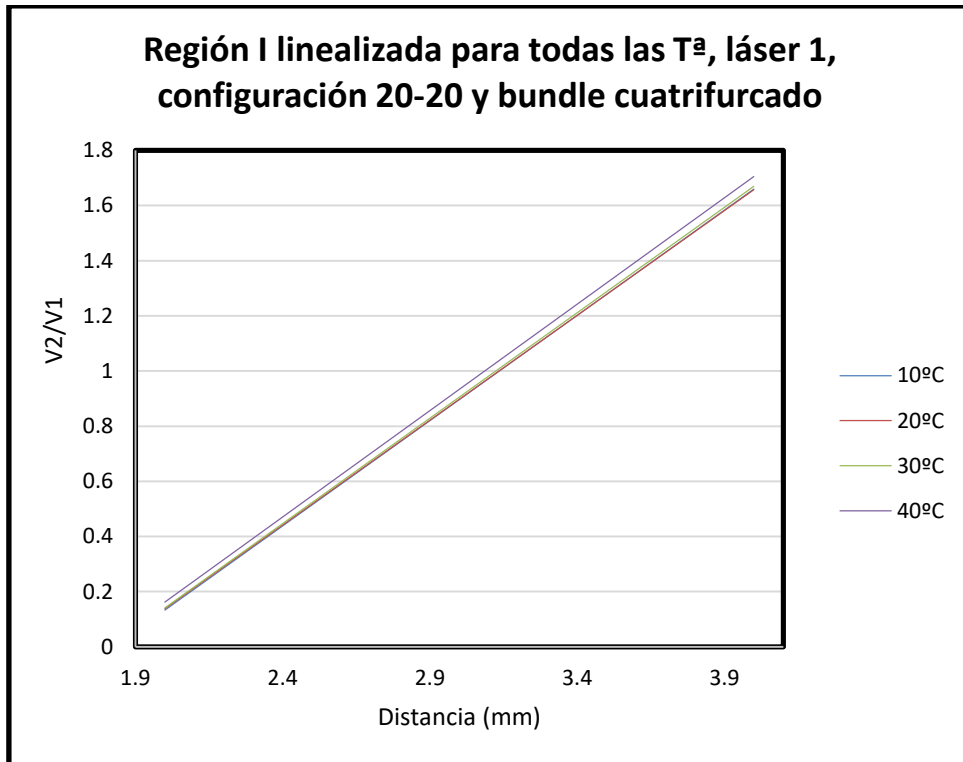


Ilustración 56: Curvas linealizadas de la región I

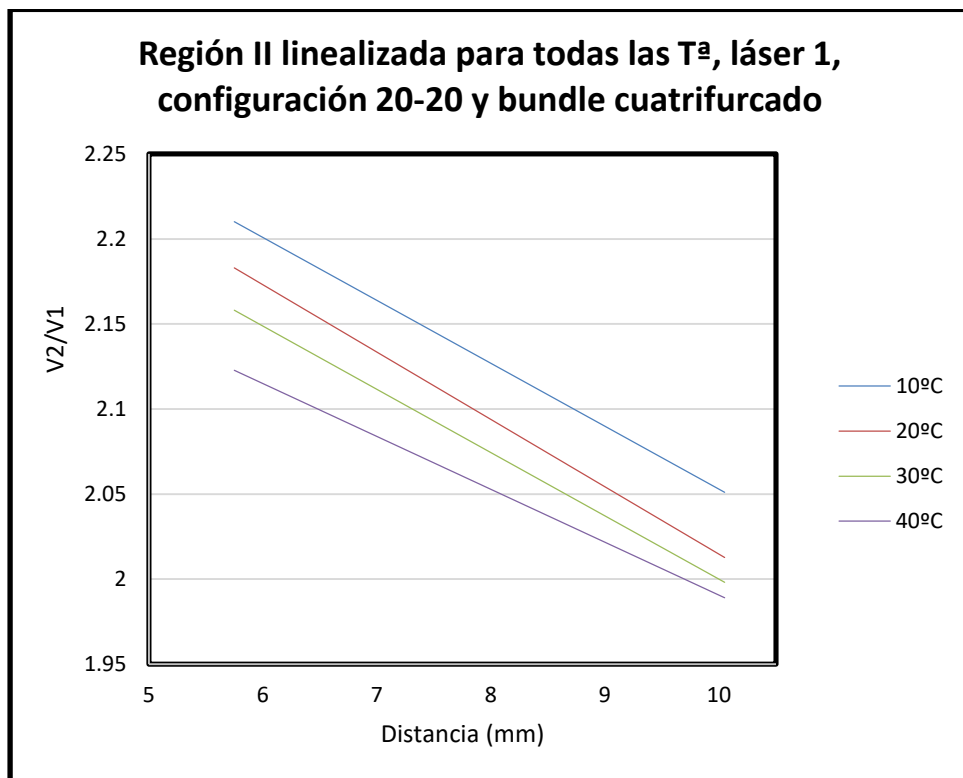


Ilustración 57: Curvas linealizadas de la región II

Serie	Ecuación de región I linealizada	R ² región I	Ecuación de región II linealizada	R ² región II
10°C	0.7633x-1.3936	0.9971	-0.037x+2.4229	0.9314
20°C	0.7598x-1.3818	0.9974	-0.0396x+2.4107	0.9761
30°C	0.7644x-1.3879	0.9969	-0.0372x+2.372	0.9522
40°C	0.7715x-1.3809	0.9966	-0.0311x+2.3016	0.9489
Variación máxima de pendiente (adimensional)	0.0117	0.0008	0.0085	0.0447
Variación máxima de pendiente (%)	1.539	0.08	27.331	4.799
Variación máxima del factor independiente (adimensional)	0.0127	-	0.1213	-
Variación máxima del factor independiente (%)	0.91	-	5.27	-

Tabla 19: Resultados para 20-20, láser 1 y bundle cuatrifurcado

V2/V1	Distancia (mm) a 10°C	Distancia (mm) a 20°C	Distancia (mm) a 30°C	Distancia (mm) a 40°C	Variación (mm)	Variación (%)
0.4	2.385	2.375	2.375	2.33	0.055	2.3
0.8	2.88	2.88	2.88	2.85	0.03	1.04
1.2	3.375	3.36	3.36	3.3	0.075	2.22
1.6	3.975	4	3.95	3.9	0.1	2.5

Tabla 20: Tabla de distancias de la región I

V2/V1	Distancia (mm) a 10°C	Distancia (mm) a 20°C	Distancia (mm) a 30°C	Distancia (mm) a 40°C	Variación (mm)	Variación (%)
2.1	8.66	7.88	7.45	6.65	2.01	23.21
2.075	9.135	8.54	7.77	7.23	1.905	20.85
2.05	10.05	8.75	8.52	8.225	1.825	18.15

Tabla 21: Tabla de distancias de la región II

Se trata de una gráfica que tiene características muy similares a la gráfica de configuración 10-30 y 10-40 con la salvedad de que en ambas regiones las diferencias de distancia son mayores (alrededor del doble en ambas respecto a los casos citados) y que la región II tiene una pendiente bastante menor (cercana a ser nula). Esto es típico de las configuraciones con ganancia simétrica. En la región I los resultados que se obtienen son prácticamente independientes de la temperatura de funcionamiento porque la variación de pendientes y distancias es muy baja, siendo solo reseñable el hecho de que es a 40°C donde se tienen las mayores diferencias. En la segunda región los valores ya son dependientes de la temperatura porque toman valores muy elevados si los comparamos con la primera región. Al igual que en casos vistos anteriormente, en la región I, especialmente en el margen que va desde los 10°C a los 30°C, se puede medir mientras que en la región II las diferencias son demasiado grandes como para considerarlo útil, es decir, el sensor es muy sensible a la variación de temperatura especialmente en la región II. En el caso de que se tuviese un entorno de poca variación térmica, entonces esta configuración sí resultaría útil.

A partir de aquí se acaban las pruebas con el láser 1. Los siguientes resultados son todos con el láser 2, que es el láser de Power Technology modelo IQ1C30(643-80)F2/547. Con este láser únicamente se han hecho pruebas con el bundle cuatrifurcado. Al estar usándose el mismo bundle cuatrifurcado que en todos los casos anteriores, los tamaños de las regiones del caso anterior se mantienen (de 2 a 4 mm la región I y de 5.75 a 10 mm la región II). En primer lugar, se muestran los resultados para ganancias 10-30:

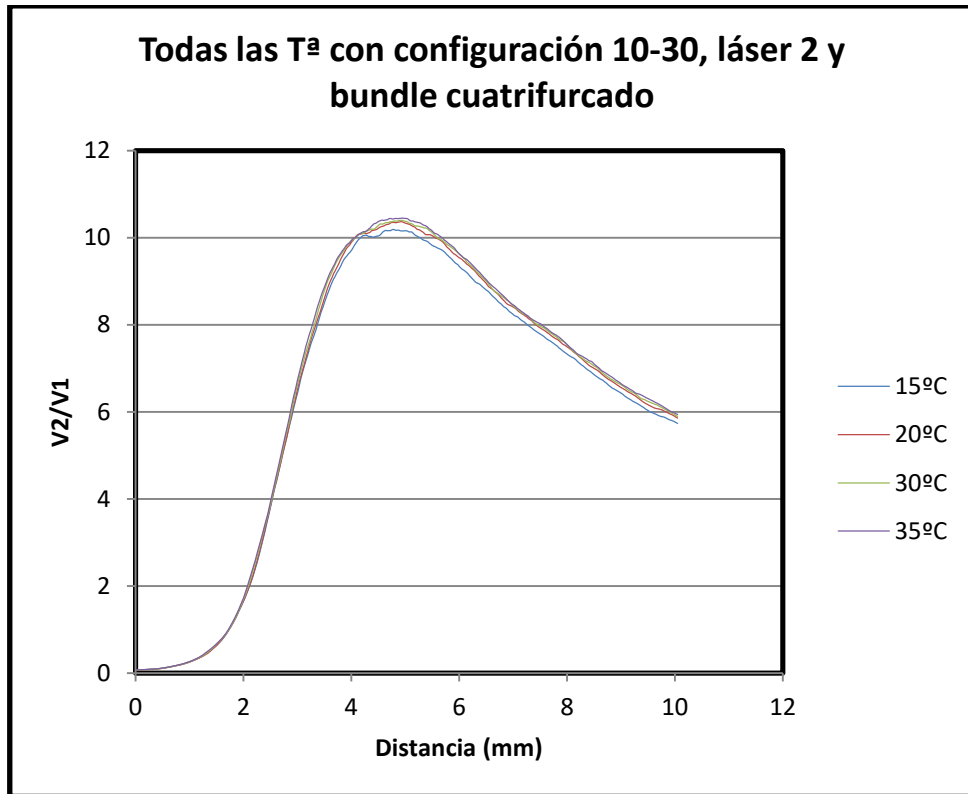


Ilustración 58: Resultados para 10-30, láser 2 y bundle cuatrifurcado

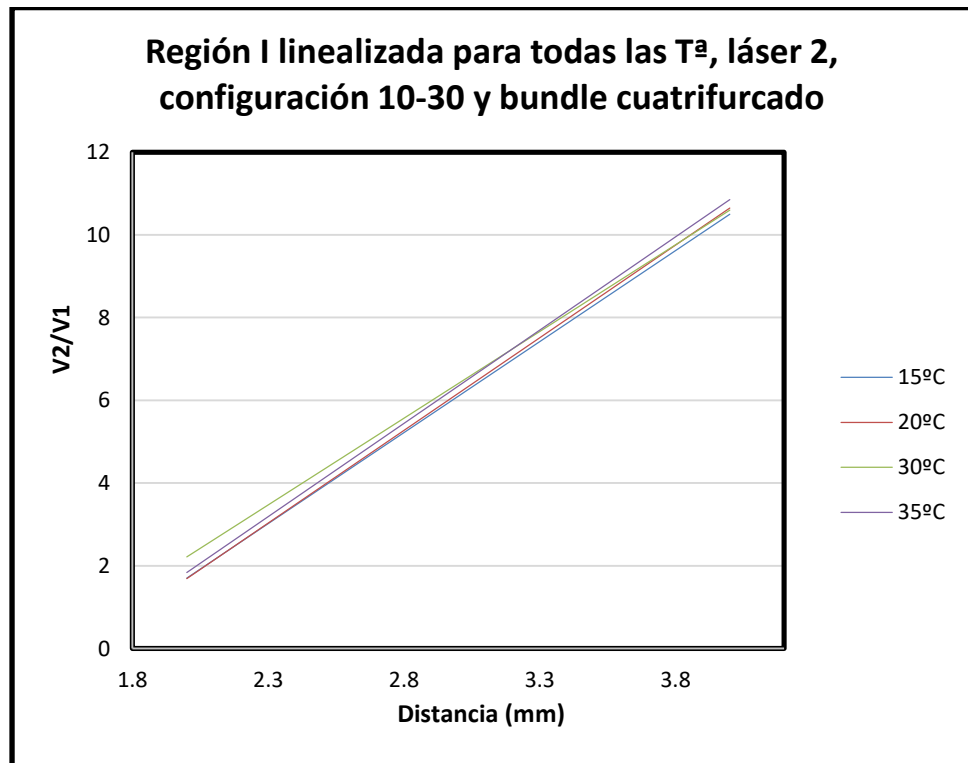


Ilustración 59: Curvas linealizadas de la región I

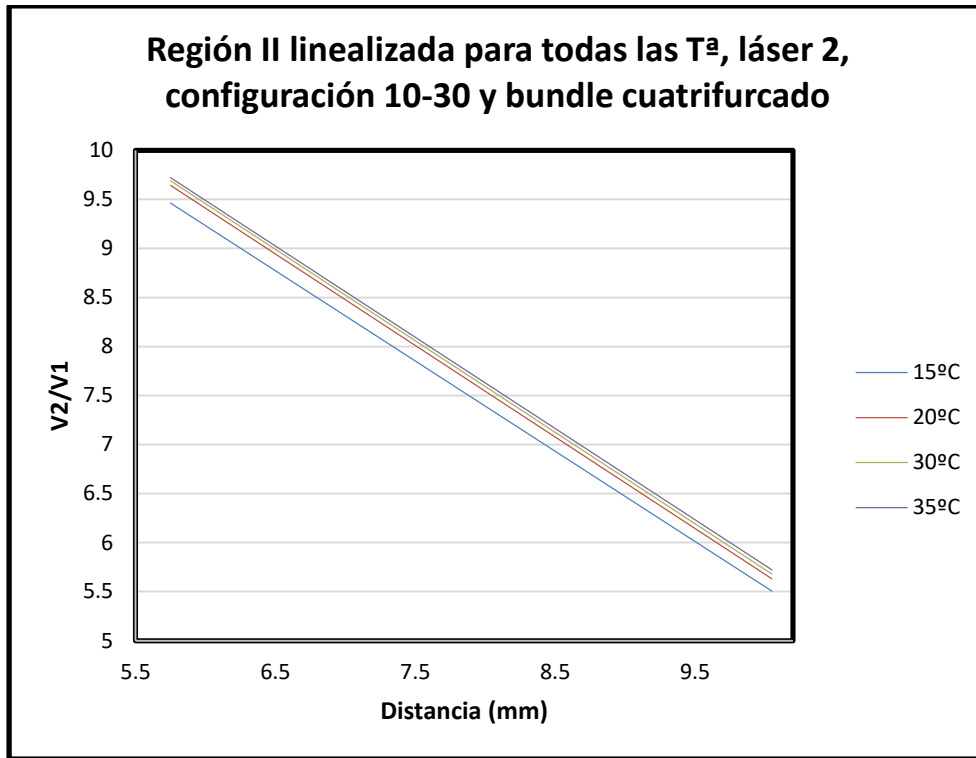


Ilustración 60: Curvas linealizadas de la región II

Serie	Ecuación de región I linealizada	R ² región I	Ecuación de región II linealizada	R ² región II
15°C	4.3985x-7.0956	0.988	-0.9203x+14.754	0.995
20°C	4.4789x-7.2677	0.9895	-0.9332x+15.009	0.9941
30°C	4.1914x-6.1679	0.9779	-0.9327x+15.053	0.9929
35°C	4.5077x-7.1784	0.985	-0.9303x+15.071	0.9926
Variación máxima de pendiente (adimensional)	1.075	0.0116	0.0129	0.0024
Variación máxima de pendiente (%)	7.546	1.186	1.401	0.241
Variación máxima del factor independiente (adimensional)	1.0998	-	0.317	-

Variación máxima del factor independiente (%)	17.83	-	2.14	-
--	-------	---	------	---

Tabla 22: Resultados para 10-30, láser 2 y bundle cuatrifurcado

V2/V1	Distancia (mm) a 15°C	Distancia (mm) a 20°C	Distancia (mm) a 30°C	Distancia (mm) a 35°C	Variación (mm)	Variación (%)
4	2.53	2.53	2.54	2.52	0.02	0.78
6	2.91	2.91	2.9	2.87	0.04	1.37
8	3.36	3.34	3.32	3.28	0.08	2.38
10	4.17	4.07	4.075	4.075	0.1	2.39

Tabla 23: Tabla de distancias de la región I

V2/V1	Distancia (mm) a 15°C	Distancia (mm) a 20°C	Distancia (mm) a 30°C	Distancia (mm) a 35°C	Variación (mm)	Variación (%)
9	6.28	6.47	6.5	6.525	0.245	3.75
8	7.26	7.425	7.45	7.525	0.265	3.52
7	8.35	8.5	8.57	8.6	0.25	2.9
6	9.55	9.825	9.9	9.925	0.375	3.77

Tabla 24: Tabla de distancias de la región II

A primera vista, en la región I los valores son muy parecidos para todas las temperaturas, cosa que se comprueba a ver la tabla de distancias en la que la variación es relativamente baja (100 micras como máximo en toda la banda de medición). Como contra, al mirar la tabla de pendientes, se observa que la diferencia en la región I entre las distintas temperaturas es elevada (7.546%). La segunda región da resultados mucho peores que la región I, ya que aunque la diferencia de pendientes es muy pequeña, la de distancias es demasiado grande. En esta región II es la medida de 15°C la que da valores muy diferentes del resto, por lo que se puede decir que en esta región se podría medir en un rango que va desde los 20°C a los 35°C.

A continuación con ganancias 20-20 para la misma configuración:

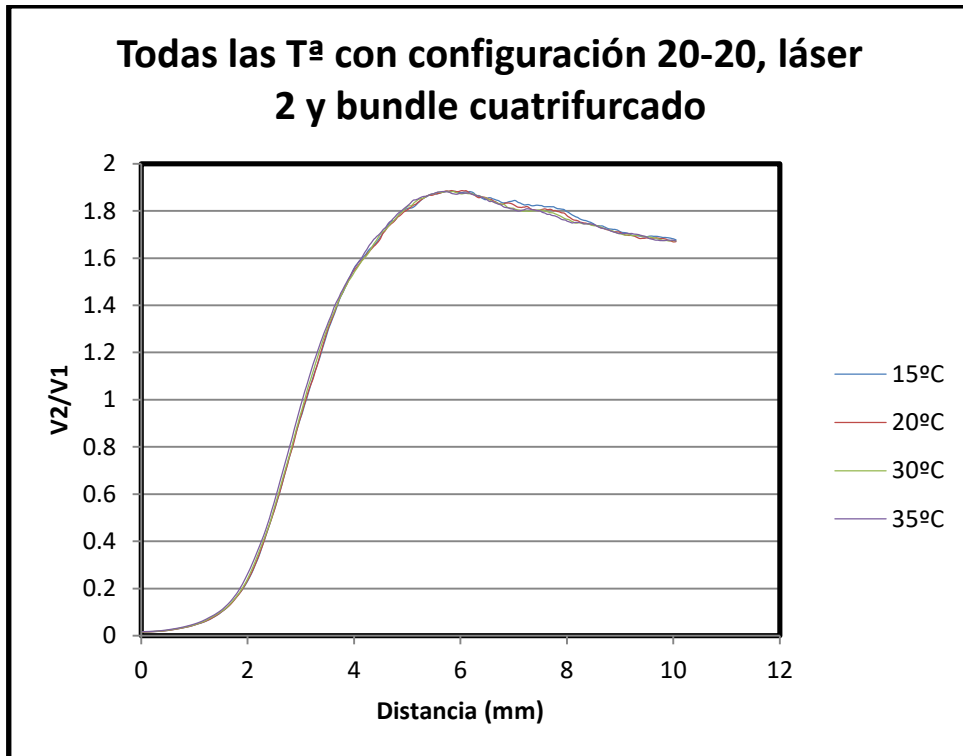


Ilustración 61: Resultados para 20-20, láser 2 y bundle cuatrifurcado

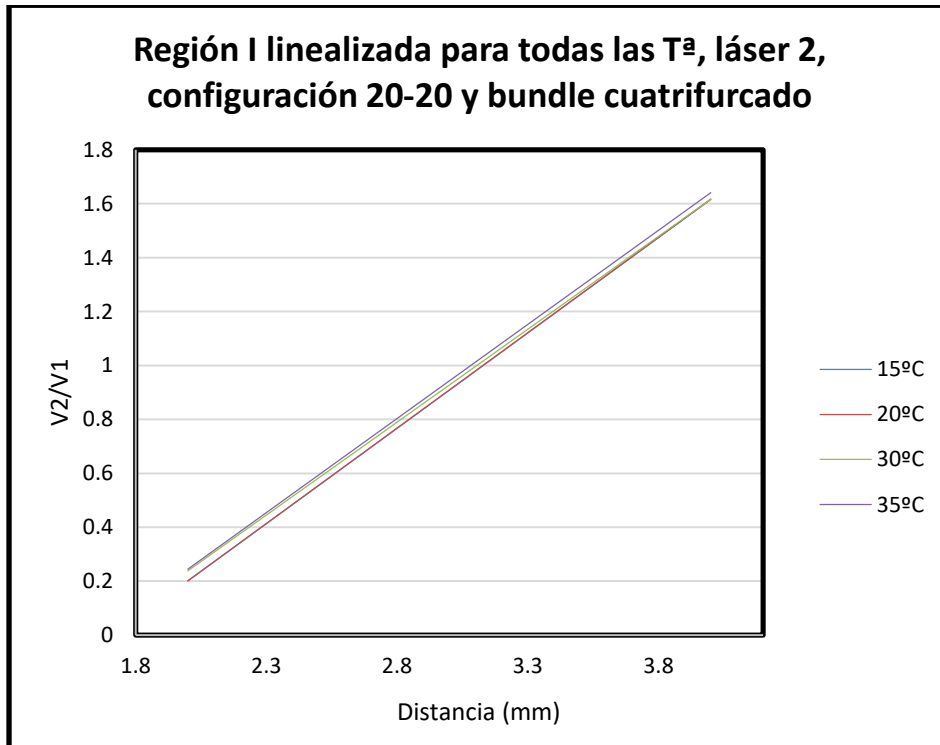


Ilustración 62: Curvas linealizadas de la región I

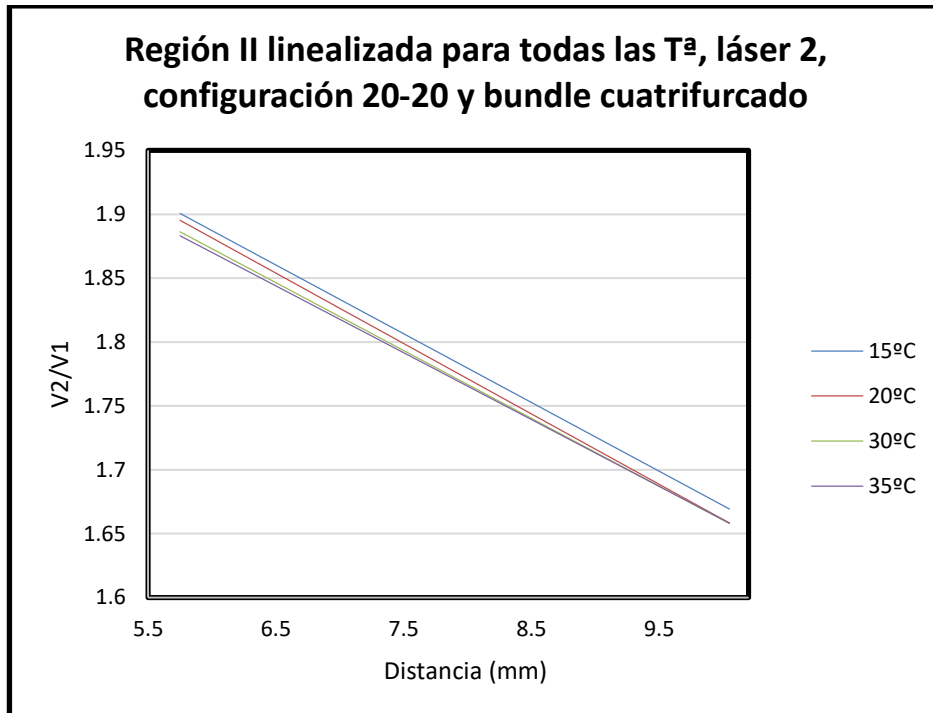


Ilustración 63: Curvas linealizadas de la región II

Serie	Ecuación de región I linealizada	R ² región I	Ecuación de región II linealizada	R ² región II
15°C	0.7075x-1.2145	0.9975	-0.0538x+2.21	0.9728
20°C	0.7076x-1.2134	0.9969	-0.0551x+2.2121	0.9862
30°C	0.6892x-1.1401	0.9895	-0.0531x+2.1916	0.9887
35°C	0.6982x-1.1518	0.9936	-0.0523x+2.1839	0.9888
Variación máxima de pendiente (adimensional)	0.0184	0.008	0.0028	0.016
Variación máxima de pendiente (%)	2.669	0.808	5.353	1.644
Variación máxima del factor independiente (adimensional)	0.0616	-	0.0282	-

Variación máxima del factor independiente (%)	5.34	-	1.29	-
--	------	---	------	---

Tabla 25: Resultados para 20-20, láser 2 y bundle cuatrifurcado

V2/V1	Distancia (mm) a 15°C	Distancia (mm) a 20°C	Distancia (mm) a 30°C	Distancia (mm) a 35°C	Variación (mm)	Variación (%)
0.4	2.31	2.31	2.3	2.26	0.05	2.16
0.8	2.83	2.85	2.83	2.78	0.07	2.45
1.2	3.38	3.375	3.34	3.31	0.07	2.07
1.6	4.16	4.18	4.19	4.14	0.05	1.19

Tabla 26: Tabla de distancias de la región I

V2/V1	Distancia (mm) a 15°C	Distancia (mm) a 20°C	Distancia (mm) a 30°C	Distancia (mm) a 35°C	Variación (mm)	Variación (%)
1.85	6.625	6.525	6.5	6.475	0.15	2.26
1.8	7.975	7.8	7.575	7.5	0.475	5.95
1.75	8.46	8.28	8.15	8.075	0.385	4.55
1.7	9.19	9.075	9.05	9.325	0.275	2.94

Tabla 27: Tabla de distancias de la región II

En este caso la región I las cuatro curvas se superponen entre sí, lo que hace que el valor de diferencia de pendiente sea pequeño y que la variación de distancia también sea pequeña (menor que 70 micras), lo que hace que se parezca a casos anteriores en los que no había apenas diferencia de distancias.

En la región II los valores tanto de diferencia dependiente como de distancia aumentan notablemente respecto de la región I y hacen que haya mucha diferencia entre las curvas como para que se puedan utilizar para medir. Estas variaciones las achaco a la franja que va desde los 6.5 a los 8 mm, en la que hay pequeñas variaciones entre las curvas.

A modo de resumen, en la siguiente tabla se muestran los valores más representativos de las medidas:

Bundle	Ganancias (dB)	Láser	Longitud región I (mm)	Longitud región II (mm)	Variación máxima pendiente región I (adimensional)	Variación máxima pendiente región II (adimensional)	Variación máxima distancias región I (mm)	Variación máxima distancias región II (mm)
Trifurcado	10-30	1	0.7	4	1.433	0.1067	0.143	0.365
Trifurcado	20-20	1	0.7	4	0.5102	0.0182	0.11	0.74
Cuatrifurcado	10-30	1	2	4.25	0.1529	0.0326	0.055	1.065
Cuatrifurcado	10-40	1	2	4.25	1.577	0.1888	0.065	1.24
Cuatrifurcado	0-40	1	2	4.25	9.477	0.8953	0.285	1.285
Cuatrifurcado	20-20	1	2	4.25	0.0117	0.0085	0.1	2.01
Cuatrifurcado	10-30	2	2	4.25	1.075	0.0129	0.1	0.375
Cuatrifurcado	20-20	2	2	4.25	0.0184	0.0028	0.07	0.475

Tabla 28: Resumen

Dado que interesa que a cualquier nivel (término, de uso de bundle, de configuración de ganancias...) el sensor sea lo más estable posible, vamos a considerar el siguiente criterio de calidad para elegir cuál es la mejor configuración según la región de medida que se quiera utilizar en cada caso: se considerará la mejor opción aquella que tenga la mínima diferencia de distancias entre los distintos casos térmicos, ya que eso indicará que la variación generada por la temperatura es despreciable. En caso de que las diferencias de distancia sean similares entre varios casos, se atenderá a la variación de pendiente y se elegirá como mejor aquella que tenga menor variación de la misma entre todas las temperaturas experimentadas. En el caso de que la variación también sea similar, se considerará mejor el caso que tenga mayores valores de pendiente, ya que permitirán utilizar equipos de menor resolución, lo que se supone que derivará en equipos de adquisición más baratos. Los resultados de las pruebas llevadas a cabo con los parámetros de distancia que se han mencionado están a continuación:

Bundle	Ganancias (dB)	Láser	Variación máxima distancias región I (mm)	Variación máxima distancias región II (mm)	Variación máxima pendiente región I (adimensional)	Variación máxima pendiente región II (adimensional)
Trifurcado	10-30	1	0.143	0.365	1.433	0.1067
Trifurcado	20-20	1	0.11	0.74	0.5102	0.0182
Cuatrifurcado	10-30	1	0.055	1.065	0.1529	0.0326
Cuatrifurcado	10-40	1	0.065	1.24	1.577	0.1888
Cuatrifurcado	0-40	1	0.285	1.285	9.477	0.8953
Cuatrifurcado	20-20	1	0.1	2.01	0.0117	0.0085
Cuatrifurcado	10-30	2	0.1	0.375	1.075	0.0129
Cuatrifurcado	20-20	2	0.07	0.475	0.0184	0.0028

Tabla 29: Resultados de la suma

Resultados del estudio del efecto de la T^a:

Para evaluar cómo ha afectado la T^a se va a hacer la comparación entre todos los casos ensayados. El resultado es que el caso que menos afectado se ve por la temperatura es:

- Si se quiere usar la región I: La configuración con el bundle cuatrifurcado con ganancias 10-30 y láser I en la que la región I sería de 2 mm, es la mejor configuración posible ya que es la que menor diferencia de distancias genera entre las distintas temperaturas (55 micras de distancia como máximo). Además, la diferencia de pendientes que hay en este caso también es muy

pequeña (0.1529).

- Si se quiere usar la región II: En este caso el mejor resultado lo ha dado el bundle trifurcado con el láser 1 y ganancias 10-30, donde la diferencia de distancias ha sido inferior a 365 micras. Otra configuración que ha dado buen resultado también es la que hace uso del bundle cuatrifurcado con el láser 2 y ganancias 10-30, que tiene una variación máxima de distancias 10 micras mayor que el de antes (375 micras de distancia máxima frente a 365 micras del caso anteriormente nombrado), pero su variación máxima de pendientes es aproximadamente 10 veces inferior (0.1067 frente a 0.0129).

Resultados del estudio del tipo de láser utilizado:

Para que la comparación entre láseres sea equitativa, se tienen que comparar casos idénticos en los que solo difiera el láser. Estos casos son en los que se ha usado el esquema con bundle cuatrifurcado y ganancias de 10-30 y 20-20. En ambos casos las longitudes de las regiones son iguales. Los resultados para esos casos han sido:

Bundle	Ganancias (dB)	Láser	Variación máxima distancias región I (mm)	Variación máxima distancias región II (mm)	Variación máxima pendiente región I (adimensional)	Variación máxima pendiente región II (adimensional)
Cuatrifurcado	10-30	1	0.055	1.065	0.1529	0.0326
Cuatrifurcado	10-30	2	0.1	0.375	1.075	0.0129
Cuatrifurcado	20-20	1	0.1	2.01	0.0117	0.0085
Cuatrifurcado	20-20	2	0.07	0.475	0.0184	0.0028

Tabla 30: Datos de los ensayos donde solo cambia el láser

En primer lugar hay que destacar que con ambos láseres ambas regiones son de idéntica longitud, por tanto en ese aspecto no hay diferencias que influyan en el resultado. Los resultados que se esperan si se hace uso de la misma configuración de medidas y se sustituye un láser por otro de mejor calidad, son que se tengan mejores números en cuanto a estabilidad y variación. Teniendo en cuenta que las características que destacan en este láser (refiriéndose al láser 2) son su capacidad para compensar efectos de la temperatura y que emite mayor potencia, lo hacen mejor para estas pruebas en las que precisamente se ha intentado ver el efecto de la temperatura en distintos casos. Sin embargo, los resultados experimentales han sido que el láser 1 ha dado una menor diferencia de distancias para la región I con la configuración de 10-30 (55 micras de diferencia). Esto es debido a que el sensor que se ha utilizado es capaz de compensar de forma realmente eficaz las variaciones de potencia emitidas por el láser, que en este caso están causadas por la variación de temperatura. Este hecho queda claramente demostrado especialmente en la región I. En esta región también se ha tenido un resultado con el láser 2 y configuración 20-20 que tiene una diferencia de distancias ligeramente mayor (70 micras frente a 55 micras), pero que a cambio tiene una diferencia de pendientes unas 10 veces inferior

(0.1529 frente a 0.0184).

En cuanto a la región II, los mejores resultados se logran al utilizar el láser 2 con la configuración de ganancias 10-30, ya que posee una variación máxima de distancias de 37.5 micras. La otra configuración que se ha probado para este láser es la correspondiente a la configuración 20-20, que ha dado como resultado una mayor variación de distancias que el caso anterior (48.5 micras frente a 37.5 micras) pero una menor variación máxima de pendientes menor (0.0028 frente a 0.0129). Como conclusión:

- Si se quiere usar la región I: el láser 1 con configuración 10-30 y bundle cuatrifurcado ofrece los mejores resultados en cuanto a variación máxima de distancias.
- Si se quiere usar la región II: el láser 2 con configuración 10-30 y bundle cuatrifurcado es la configuración que mejor comportamiento muestra.

Resultados del estudio del bundle utilizado:

La siguiente comparación a realizar es la que compara el bundle trifurcado con el bundle cuatrifurcado. Para ello, lo que se hará es seguir el mismo procedimiento y criterio usado hasta hora, en el que se comparan casos idénticos en los que solo varía el bundle utilizado y se valora mejor al que dé una suma de menor cantidad. En este caso, las situaciones a comparar son las siguientes:

Bundle	Ganancias (dB)	Láser	Variación máxima distancias región I (mm)	Variación máxima distancias región II (mm)	Variación máxima pendiente región I (adimensional)	Variación máxima pendiente región II (adimensional)
Trifurcado	10-30	1	0.143	0.365	1.433	0.1067
Cuatrifurcado	10-30	1	0.055	1.065	0.1529	0.0326
Trifurcado	20-20	1	0.11	0.74	0.5102	0.0182
Cuatrifurcado	20-20	1	0.1	2.01	0.0117	0.0085

Tabla 31: Resultados entre bundles diferentes

A diferencia de lo que pasaba en la comparación anterior, en este caso en el bundle trifurcado la región I es solamente de 0.7 mm, mientras que con el cuatrifurcado la región I es de 2 mm. Esta diferencia es importante, ya que si la región I es únicamente de 0.7 mm las medidas se verán muy limitadas debido a que en condiciones reales las mediciones se hacen a una distancia mayor. En cuanto a la región II, ambas son parecidas (4 mm frente a 4.25 mm) para ambos bundles.

El mejor resultado en la región I lo da el bundle cuatrifurcado en cualquiera de las dos configuraciones que se han probado siendo el mejor de ellos el que hace uso de una configuración 10-30 que logra una diferencia de distancias de 55 micras. Esto es positivo, ya que el bundle cuatrifurcado tiene una región I mucho mayor que el

trifurcado (casi 3 veces mayor). En cuanto a la región II pasa justo lo contrario, es mucho mejor el bundle trifurcado que el cuatrifurcado (0.365 mm frente a 0.74 mm). Por tanto, la elección dependerá de qué región se quiera usar para medir:

- Si se quiere usar la región I: el cuatrifurcado.
- Si se quiere usar la región II: el trifurcado.

Resultados del estudio de la configuración de ganancias:

Por último, queda comparar la configuración de ganancias (asimétrica contra simétrica). Siguiendo el mismo patrón de comparación seguido hasta ahora, se comparan solo los casos en los que solo varía la ganancia y todo lo demás es idéntico.

Bundle	Ganancias (dB)	Láser	Variación máxima distancias región I (mm)	Variación máxima distancias región II (mm)	Variación máxima pendiente región I (adimensional)	Variación máxima pendiente región II (adimensional)
Trifurcado	10-30	1	0.143	0.365	1.433	0.1067
Trifurcado	20-20	1	0.11	0.74	0.5102	0.0182
Cuatrifurcado	10-30	1	0.055	1.065	0.1529	0.0326
Cuatrifurcado	10-40	1	0.065	1.24	1.577	0.1888
Cuatrifurcado	0-40	1	0.285	1.285	9.477	0.8953
Cuatrifurcado	20-20	1	0.1	2.01	0.0117	0.0085
Cuatrifurcado	10-30	2	0.1	0.375	1.075	0.0129
Cuatrifurcado	20-20	2	0.07	0.475	0.0184	0.0028

Tabla 32: Resultados si solo cambia la ganancia

Para la región I los dos mejores resultados se han logrado con configuraciones que tienen diferencia de ganancias en los fotodetectores. En concreto, el mejor resultado se logra con configuración 10-30 (55 micras) y el segundo mejor con configuración 10-40 (65 micras). Aunque también es destacable que el tercer mejor resultado se ha logrado con una configuración 20-20 y que no está muy lejos de los valores logrados en los mencionados anteriormente (70 micras de distancia máxima).

En la región II los mejores resultados se obtienen con la configuración de ganancias 10-30 independientemente del bundle, ya que el mejor resultado se logra con el trifurcado (0.365 mm) y el segundo mejor con el cuatrifurcado (0.375 mm).

Como conclusión:

- Si se quiere usar la región I: La configuración 10-30 da el mejor resultado, pero

las configuraciones 10-40 y 20-20 logran resultados cercanos.

- Si se quiere usar la región II: hay que hacer uso de una configuración 10-30.

7.2.7. Conclusiones de los resultados de las medidas

Una vez se han expuesto los resultados de todas las medidas llevadas a cabo en las instalaciones de Leioa, es momento de mostrar las conclusiones a las que se ha llegado tras el análisis de los mismos.

En primer lugar hay que definir el rango de medidas que nos interesa. La región lineal I es más corta que la región lineal II pero ofrece mayor pendiente, por lo que servirían equipos de menor resolución ya que las variaciones de valores entre las medidas serían mayores que para la región II. Por el contrario, la región lineal I es muy corta (0.7 mm) y se encuentra a distancias muy pequeñas (entre 1.3 y 2 mm), lo que limita mucho su utilización. Para que la región lineal I sea mayor y de menor pendiente, se hace uso de bundles con configuraciones que poseen mayor distancia entre los anillos receptores (por eso el bundle cuatrifurcado tiene menor pendiente y mayor región lineal I que el trifurcado).

Por otro lado, si nos centramos en la región lineal II, se tiene cubierto un rango de distancia mayor (más de 4 mm y a distancias más largas) pero con menores variaciones de V_2/V_1 , es decir, harían falta dispositivos con mayor resolución porque las variaciones entre las medidas serían menores, pero a cambio se cubriría más distancia. A modo recordatorio, a continuación se muestra la tabla en la que aparecen las sumas de las variaciones máximas de cada región provocadas por la variación de T^a en función de la configuración de medida que se ha utilizado.

Bundle	Ganancias (dB)	Láser	Variación máxima distancias región I (mm)	Variación máxima distancias región II (mm)	Variación máxima pendiente región I (adimensional)	Variación máxima pendiente región II (adimensional)
Trifurcado	10-30	1	0.143	0.365	1.433	0.1067
Trifurcado	20-20	1	0.11	0.74	0.5102	0.0182
Cuatrifurcado	10-30	1	0.055	1.065	0.1529	0.0326
Cuatrifurcado	10-40	1	0.065	1.24	1.577	0.1888
Cuatrifurcado	0-40	1	0.285	1.285	9.477	0.8953
Cuatrifurcado	20-20	1	0.1	2.01	0.0117	0.0085
Cuatrifurcado	10-30	2	0.1	0.375	1.075	0.0129
Cuatrifurcado	20-20	2	0.07	0.475	0.0184	0.0028

Tabla 33: Resultados de la suma

Atendiendo a las características de cada una de las regiones que se han indicado

arriba y a las distancias que se desean medir en este experimento, interesa sobre todo que todas las medidas sean independientes de la temperatura para que ésta no influya en los resultados. De forma general, se puede decir que la parte más estable frente a las variaciones de temperatura ha sido la región I en todas sus variantes (como máximo ha dado diferencias de distancia de 285 micras), siendo la región II más inestable y con curvas bastante diferentes en función de la temperatura en determinados casos, especialmente los que hacen uso del bundle cuatrifurcado y láser 1.

Si se quisiera hacer uso de la región I, varias de las configuraciones que hacen uso del bundle cuatrifurcado sirven, teniendo distintas configuraciones tanto de ganancias como de láser utilizado, ya que en todas ellas la temperatura apenas afecta y además cubren una distancia mayor que la región I con el bundle trifurcado. En concreto, la mejor opción es la que tiene configuración 10-30, láser 1 y bundle cuatrifurcado porque es la que menor diferencia de distancias tiene por efecto de la temperatura, aunque la configuración con el mismo bundle y ganancia 10-40 también da buen rendimiento.

Los casos en los que la región II se ha mantenido más estable han sido los casos correspondientes a los últimos ensayos, con el láser 2 y el bundle cuatrifurcado, y el caso del bundle trifurcado con configuración 10-30 y láser 1. El mejor resultado de todos ellos ha sido el que hace uso del bundle trifurcado con ganancias 10-30 y láser 1, que ha tenido una diferencia de distancias de 365 micras entre las temperaturas experimentadas. Además, el hecho de usar esta configuración tiene la ventaja de que la pendiente es mayor que en el caso de ganancia simétrica, lo que permitiría tener mejor medida con instrumentación de menor resolución.

La decisión sobre la elección de la configuración a utilizar dependerá de la región que se vaya a utilizar en la medida, ya que tal y como se ha visto en la tabla de la página anterior, los resultados varían mucho en función de la región (y también dentro de cada región en función de la configuración). Por tanto, será decisión del usuario la elección de la configuración en función de la región que se vaya a utilizar. A modo de conclusión definitiva, se puede decir lo siguiente:

- Si se quiere medir en la región I: Bundle cuatrifurcado con ganancia asimétrica 10-30 y láser 1. Con los mismos elementos y una configuración asimétrica 10-40 también se obtienen buenos resultados.
- Si se quiere medir en la región II: Bundle trifurcado, ganancia asimétrica 10-30 y láser 1 es la configuración con mejores resultados. La configuración que hace uso del bundle cuatrifurcado, láser 2 y ganancia 10-30 también da buenos resultados, similares al mejor caso.

7.2.8. Conclusiones para el programa de simulación

Para poder llevar a cabo medidas fiables a cualquier temperatura, interesa que el funcionamiento del sensor sea lo más estable posible frente a las variaciones térmicas. A la vista de los resultados, la región I ha resultado ser mucho más estable que la región II en todas las configuraciones posibles, por lo que para este proyecto, el

programa de simulación tratará de obtener una curva de calibración lo más aproximada posible a esa región.

De acuerdo con las conclusiones que se han mostrado en apartados previos, para esa región los mejores resultados se han logrado haciendo uso del láser 1 independientemente del bundle, de modo que el programa se centrará en modelar la respuesta del sensor empleando ese láser de la mejor forma posible.

De la misma forma, debido a la estabilidad que presenta la región I frente a la T^a , se tomarán los datos correspondientes a la curva de 20°C de entre todas las calibraciones, aunque todas ellas son muy similares entre sí.

Como resumen, el programa simulará:

- La región I, ya que su variación por la T^a es mínima.
- El láser 1 (Láser de Frankfurt Technology).

7.2.9. Planteamiento matemático teórico seguido para el programa de simulación

Aunque ya se ha visto en apartados anteriores que los bundle de fibra óptica poseen unas ventajas muy interesantes en cuanto a sistema de medición se refiere, su modelado y cálculo de la función característica resultan complicados. El modelado del funcionamiento no depende únicamente de la distancia al objetivo, sino que otros factores influyen de forma determinante, factores como la configuración del bundle o parámetros físicos de las fibras utilizadas. Sin embargo, que sea difícil no supone que no se haya tratado de afrontar el problema, y existe una gran cantidad de publicaciones científicas que lo han abordado [30-39]. No obstante, el problema deriva de que la gran mayoría de estos documentos no son satisfactorios en los siguientes apartados:

- Precisión: Debido a que se han llevado a cabo simplificaciones muy gruesas, los modelos teóricos no se ajustan debidamente al bundle real.
- Aplicación: Los modelos teóricos que se plantean únicamente son válidos para determinados bundles, pero no para otros porque sus parámetros no se ajustan a todos los casos.
- Extensibilidad: Muchos modelos teóricos no se pueden aplicar a modelos de bundles, únicamente a pares de fibras.

Por tanto, teniendo en cuenta que para el proyecto que se desea desarrollar interesa que se puedan simular de forma precisa el mayor número posible de bundles, se ha decidido seguir el paper *Theoretical and experimental study on the optical fiber bundle displacement sensors* de los autores Huimin Cao, Youping Chen, Zude Zhou y Gang Zhang. En esta publicación científica se ha tratado de desarrollar un modelo matemático lo más preciso posible y válido para distintas configuraciones de bundle. El proceso que se ha seguido para ello ha consistido en primer lugar en diseñar el modelo matemático que regula la interacción de un par de fibras de este tipo de sensor para posteriormente extenderlo vía modelo integral o sumatorio a un bundle con más pares de fibras.

Modelo de un único par de fibras

Para llevar a cabo este análisis se han realizado varias asunciones: la fibra transmisora (TF) posee un núcleo de radio r_T y la receptora (RF) un núcleo de radio r_R , ambas fibras tienen idéntica apertura numérica (NA), la distancia entre los dos ejes de ambas es ρ , la potencia de luz emitida por TF es P_0 , y la reflectividad de la superficie del objetivo es δ .

La distribución de la intensidad de luz (o de densidad de potencia) emitida al final de la TF es el pilar sobre el que calcular la característica de modulación de este caso. Una distribución cuasi-gaussiana [40-42] es la que mejor encaja con estos hechos, de forma que se puede modelar la intensidad de esa luz de forma matemática [43-44]. La ecuación que lo representa es:

$$I(\rho, z) = \frac{P_0}{\pi q^2(z)} \exp\left[-\frac{\rho^2}{q^2(z)}\right] \quad (1)$$

Donde el radio efectivo del campo óptico de salida $q(z)$ está definido por:

$$q(z) = \sigma r_T \left[1 + \zeta \left(\frac{z}{r_T} \right)^\eta \tan(\arcsin(NA)) \right] \quad (2)$$

En esta fórmula η , ζ son dos parámetros que regulan la distribución de la intensidad de la luz y que están relacionados con las características de la fuente de luz y con la TF y σ es un parámetro relacionado con el índice de refracción del núcleo de la fibra, que si es de índice escalón, su valor es la unidad.

Aplicando simplificación geométrica, se puede considerar que la luz reflejada recibida en RF es el resultado de la luz emitida por una fibra situada a una distancia $2z$ de la TF, es decir, se podría aplicar el principio de imagen especular entre TF y RF, donde la separación entre TF y RF es $2z$ [45-50]. Aplicando ese principio, se tiene:

$$I_R(\rho, z) = \delta I(\rho, 2z) = \frac{\delta P_0}{\pi q^2(2z)} \exp\left[-\frac{\rho^2}{q^2(2z)}\right] \quad (3)$$

La potencia recibida es $P = \iint_A I_R(\rho, z) dA$, donde $A = \pi r_R^2$ es el área del núcleo de la RF. La intensidad en el centro de la fibra se puede usar para indicar de forma aproximada la intensidad promedio en la parte final de la fibra (la parte por donde se emite al aire la luz). Por tanto:

$$P(z) = I_R(\rho, z) A = \frac{\delta P_0 r_R^2}{\pi q^2(2z)} \exp\left[-\frac{\rho^2}{q^2(2z)}\right] \quad (4)$$

Si se define $f = [r_R^2/q^2(2z)] \exp[-\rho^2/q^2(2z)]$ como la función característica de modulación de un par de fibras, el modelo que simula este caso se puede expresar como:

$$P(z) = \delta P_0 f(r_T, r_R, NA, \rho, z) \quad (5)$$

Modelo sumatorio de bundle de fibra óptica

Para reducir al máximo el tamaño del bundle y poder fabricarlo, la disposición habitual de las fibras ópticas es la circular si tomamos una sección del bundle. Un bundle de radio R está compuesto por n_T fibras transmisoras y n_R fibras receptoras. Todas ellas (TF por un lado y RF por otro) poseen la misma NA y radio del núcleo r . Están organizadas en un entramado hexagonal completamente escalable.

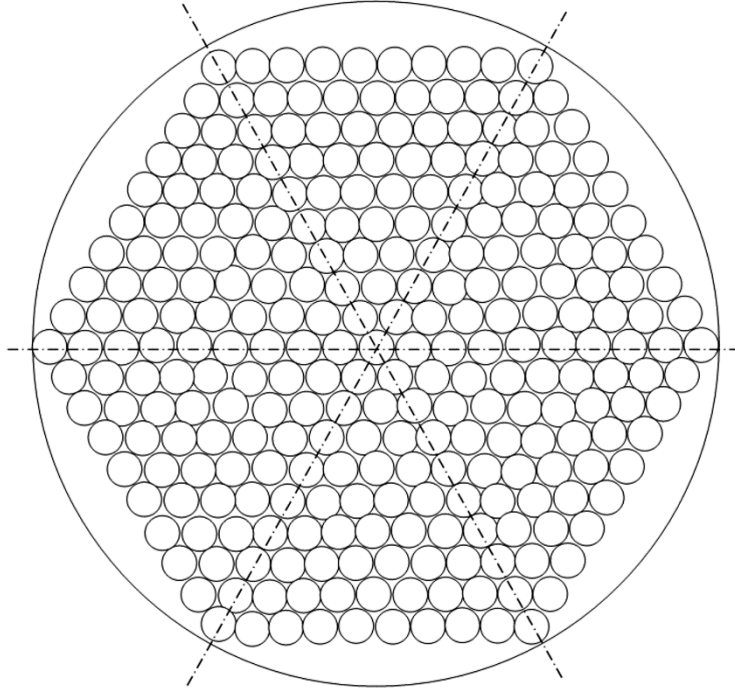


Ilustración 64: Sección transversal de modelo sumatorio. Fuente: opticalengineering.spiedigitallibrary.org

La fórmula de modulación característica del bundle es el sumatorio de la interacción de los pares de fibra $n_T n_R$. P_{ij} ($i=1, \dots, n_T, j=1, \dots, n_R$) es la potencia recibida por la j -ésima RF desde la i -ésima TF [23]. Si se asume que toda la potencia de luz emitida desde el final de cada TF tiene el mismo valor P_0 (lo que encaja en el hecho de que todas las TF son idénticas y están acopladas en una única fuente de luz colimada), la potencia total es:

$$P(z) = \sum_{i=1}^{n_T} \sum_{j=1}^{n_R} P_{ij}(z) = \delta P_0 \sum_{i=1}^{n_T} \sum_{j=1}^{n_R} f(r, NA, \rho_{ij}, z) = \delta P_0 F(n_T, n_R, r, NA, \rho_{ij}, z) \quad (6)$$

Donde $F = \sum_{i=1}^{n_T} \sum_{j=1}^{n_R} f(r, NA, \rho_{ij}, z)$ se define como la función característica de modulación de bundle de fibra. Teniendo en cuenta que δ , P_0 , r y NA son todos constantes, la modelación de z hasta P solo depende de la distancia entre los ejes de la fibra ρ , entonces $F = \sum_{i=1}^{n_T} \sum_{j=1}^{n_R} f(\rho_{ij})$.

Para calcular ρ se hará uso de del microscopio disponible en el laboratorio, con el que se podrán medir las distancias reales entre los ejes de fibra que se vayan a usar.

Estas imágenes se pueden consultar en el Anexo I.

Una vez se tiene la potencia recibida, esta se mide mediante dos fotodetectores que son los encargados de transformar esa intensidad en tensión, que es la magnitud que se va a representar. De acuerdo con el datasheet de los PD, esta conversión se realiza de la siguiente forma:

$$V_{out} = R(\lambda) * Transimpedancia * P(z) \quad (7)$$

Donde $R(\lambda)$ (A/W) es la responsividad del PD, cuya curva aparece dibujada en el propio datasheet y de acuerdo con las longitudes de onda con las que se va a trabajar variará muy poco (entre 0.41 y 0.43 aproximadamente); y la transimpedancia es un factor que también aparece indicado en el datasheet (Gain Hi-Z) y que varía para cada configuración de ganancia. Las unidades de la transimpedancia son V/A. Por último, se incluye la potencia recibida en la ecuación (6).

La representación que se hará será la que relacione las dos tensiones en los anillos concéntricos del bundle, de modo que su formulación matemática es:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{R_2(\lambda) * Transimpedancia(PD2) * P_2(z)}{R_1(\lambda) * Transimpedancia(PD1) * P_1(z)} \quad (8)$$

De modo que este es el procedimiento que se va a seguir para la programación del programa de simulación, que tal y como se ve en la formulación es el caso ideal ya que no hay factores externos que influyan. Para validarlo, al tratarse del caso ideal, se comprobará en primer lugar con un espejo como objetivo.

Otro aspecto a considerar es el offset, hay que tener en cuenta que la simulación y las medidas experimentales tienen un offset entre sí, ya que la simulación se puede realizar desde una distancia ideal de 0 mm entre álabe y haz láser (como si estuviesen en contacto), mientras que en la realidad (tal y como se ha visto en fotos a lo largo de este documento) existe un offset que hay que considerar. Una vez se tengan representadas ambas curvas (simulación y experimental), se debe variar el offset de la curva experimental para hacerla coincidir con la simulación.

7.2.10. Resultados de medidas con espejo (Caso ideal)

Siguiendo el planteamiento mostrado en el punto anterior, se programa en Matlab el script que hace la simulación de comportamiento del sistema de medición. Puesto que lo planteado es el caso ideal, se compararán los resultados del programa con las medidas obtenidas para el caso en el que el objeto iluminado sea un espejo (se le supone reflectividad total). Para ello, se sigue al pie de la letra el planteamiento, dejando los valores de los parámetros que venían por defecto en el paper *Theoretical and experimental study on the optical fiber bundle displacement sensors* de los autores Huimin Cao, Youping Chen, Zude Zhou y Gang Zhang. Esos valores son:

PARA EL ESPEJO	η	ζ	σ
Trifurcado láser 1	$1*1.12=1.12$	0.2	1
Cuatrifurcado láser 1	$1*1.12=1.12$	0.2	1

Tabla 34: Parámetros del caso ideal

En este caso, los resultados, para una T^a de 20°C (aunque para la región I debido a su estabilidad frente a T^a este dato no es relevante) han sido:

Para el caso de trifurcado, láser 1, 20-20, espejo:

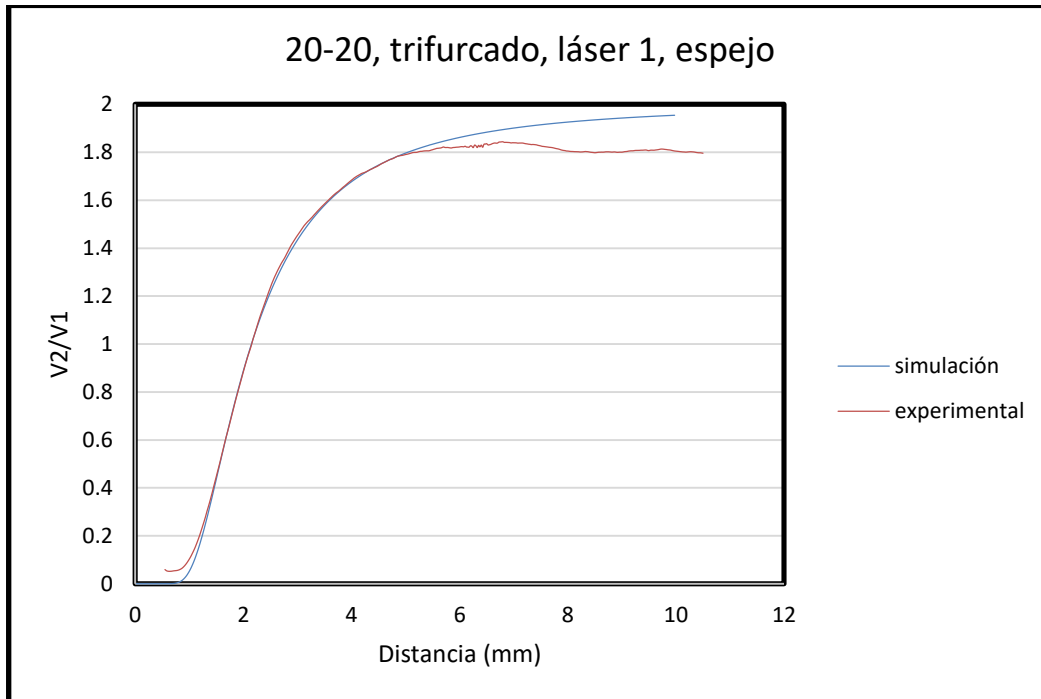


Ilustración 65: Trifurcado, 20-20, láser 1, espejo

Tras ajustar el offset para que ambas curvas se solapen al máximo en la región I, se tiene que el offset entre ambas curvas es de 525 micras. Con eso corregido, los valores entre las curvas características son:

V2/V1 (experimental)	Distancia en experimental (mm)	Distancia en Matlab (mm)	Variación (mm)
0.4	1.45	1.46	0.01
0.7	1.78	1.78	0
1	2.16	2.15	0.01
1.4	2.92	2.875	0.045

Tabla 35: Trifurcado, 20-20, láser 1, espejo

En cuanto a las pendientes:

	Pendiente de la curva simulada	Pendiente de la curva experimental	Variación (%)
Valor	0.741	0.7789	4.89

Tabla 36: Tabla de pendientes

Como se puede ver, ambas curvas se solapan más allá de la región I, por lo que se puede decir que en este caso el programa de simulación y los datos experimentales encajan para el caso ideal.

Para Trifurcado, láser 1, 10-30, espejo:

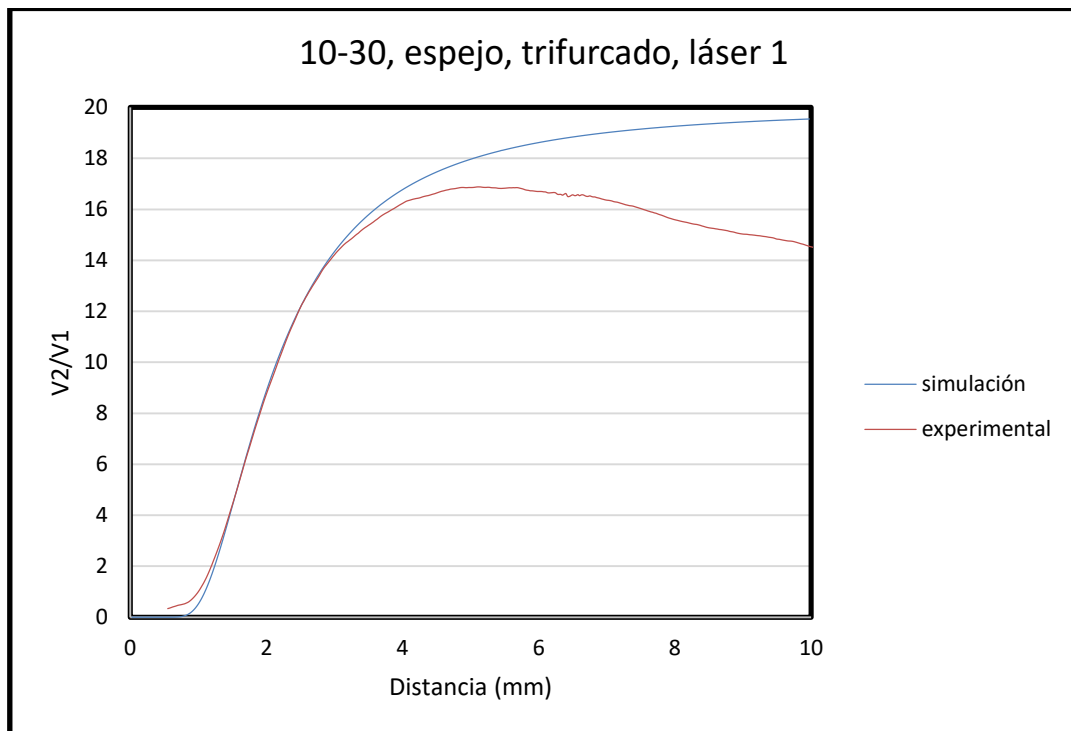


Ilustración 66: Trifurcado, 10-30, láser 1, espejo

Al igual que antes, se ha corregido un offset de 525 micras. En este caso la diferencia de distancias entre curvas características es:

V2/V1 (experimental)	Distancia en experimental (mm)	Distancia en Matlab (mm)	Variación (mm)
4	1.455	1.46	0.005
8	1.915	1.895	0.02
12	2.474	2.474	0
14	2.94	2.92	0.02

Tabla 37: Trifurcado, 10-30, láser 1, espejo

En cuanto a las pendientes de cada curva:

	Pendiente de la curva simulada	Pendiente de la curva experimental	Variación (%)
Valor	7.15	7.17	0.27

Tabla 38: Tabla de pendientes

Se puede ver que ambas curvas se solapan en la región I, de modo que se confirma que el programa de simulación funciona correctamente para el caso ideal con esta configuración.

Para Cuatrifurcado, láser 1, 20-20, espejo:

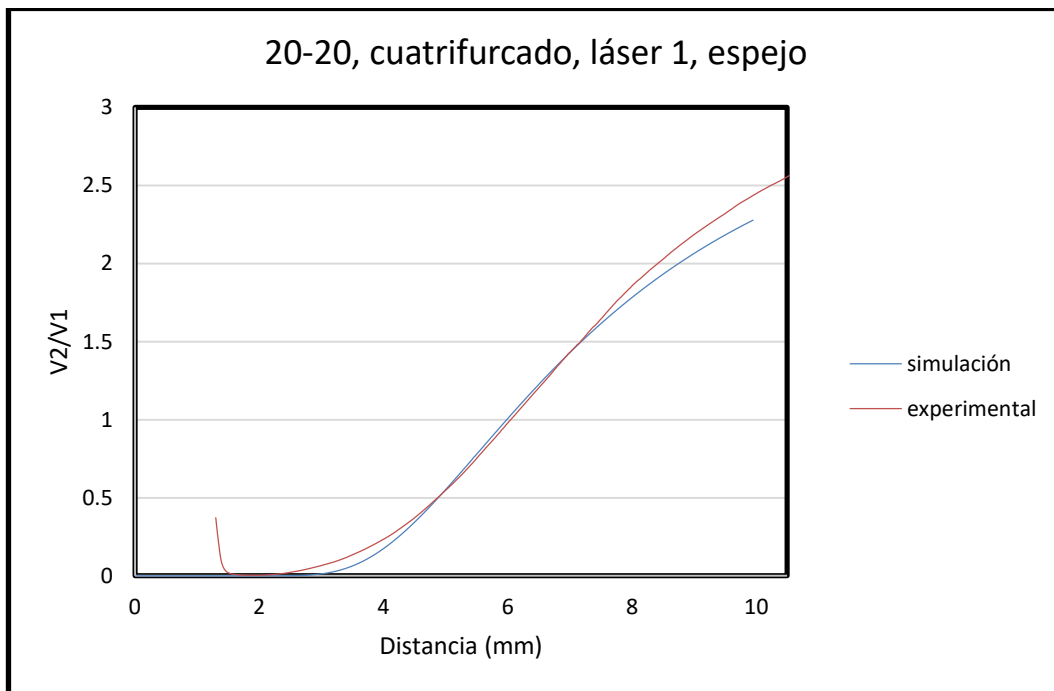


Ilustración 67: Cuatrifurcado, 20-20, láser 1, espejo

Tras corregirse un offset de 1300 micras, la tabla de distancias entre curvas características es:

V2/V1	Distancia en experimental (mm)	Distancia en Matlab (mm)	Variación (mm)
0.4	4.6	4.63	0.03
0.7	5.4	5.33	0.07
1	6.05	6	0.05
1.3	6.715	6.675	0.04
1.6	7.39	7.47	0.08

Tabla 39: Cuatrifurcado, 20-20, láser 1, espejo

En lo referente a las pendientes:

	Pendiente de la curva simulada	Pendiente de la curva experimental	Variación (%)
Valor	0.42	0.43	1.73

Tabla 40: Cuatrifurcado, 20-20, láser 1, espejo

De nuevo, en la región lineal I ambas curvas se solapan, por lo que se puede asegurar que el programa se ajusta al caso real.

Para Cuatrifurcado, láser 1, 10-30, espejo:

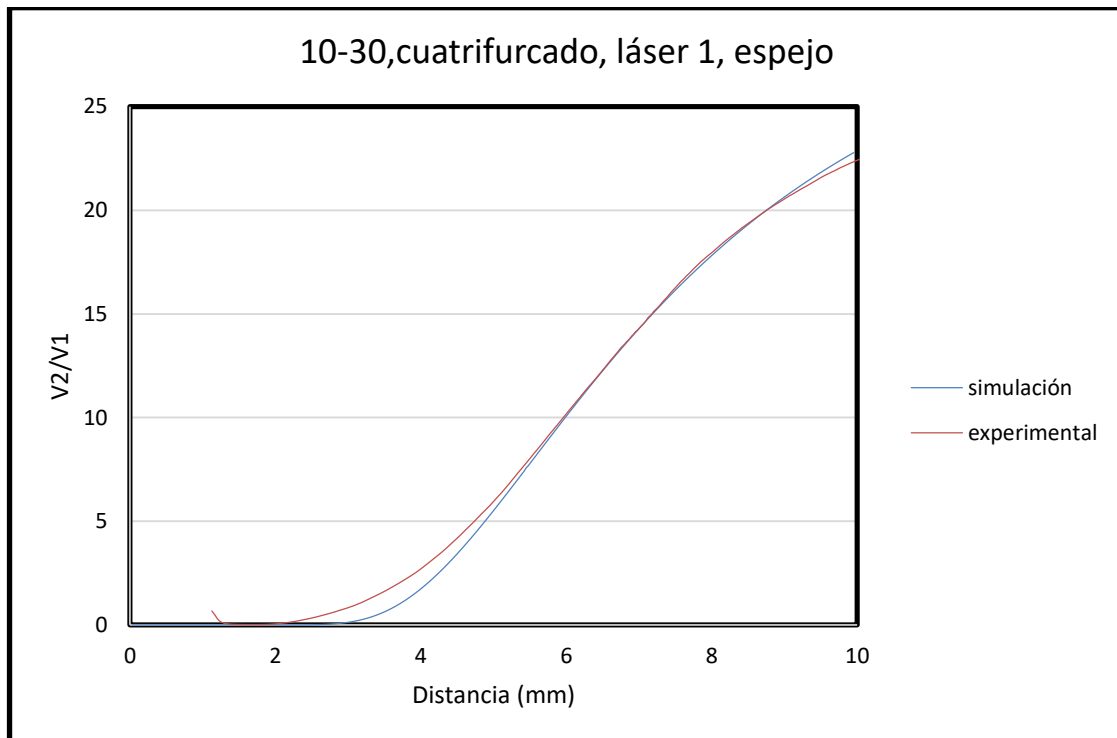


Ilustración 68: Cuatrifurcado, 10-30, láser 1, espejo

Una vez más, tras corregirse un offset de 1125 micras, la tabla de diferencia de distancias entre curvas características es:

V2/V1 (experimental)	Distancia en experimental (mm)	Distancia en Matlab (mm)	Variación (mm)
7	5.26	5.33	0.07
10	5.965	5.985	0.02
14	6.92	6.925	0.005
18	8.01	8.065	0.055
21	9.22	9.15	0.07

Tabla 41: Cuatrifurcado, 10-30, láser 1, espejo

En cuanto a las pendientes:

	Pendiente de la curva simulada	Pendiente de la curva experimental	Variación (%)
Valor	3.66	3.88	5.54

Tabla 42: Cuatrifurcado, 10-30, láser 1, espejo

En este caso también se tiene un comportamiento muy parecido entre simulación y experimental.

Para Cuatrifurcado, láser 1, 0-40, espejo:

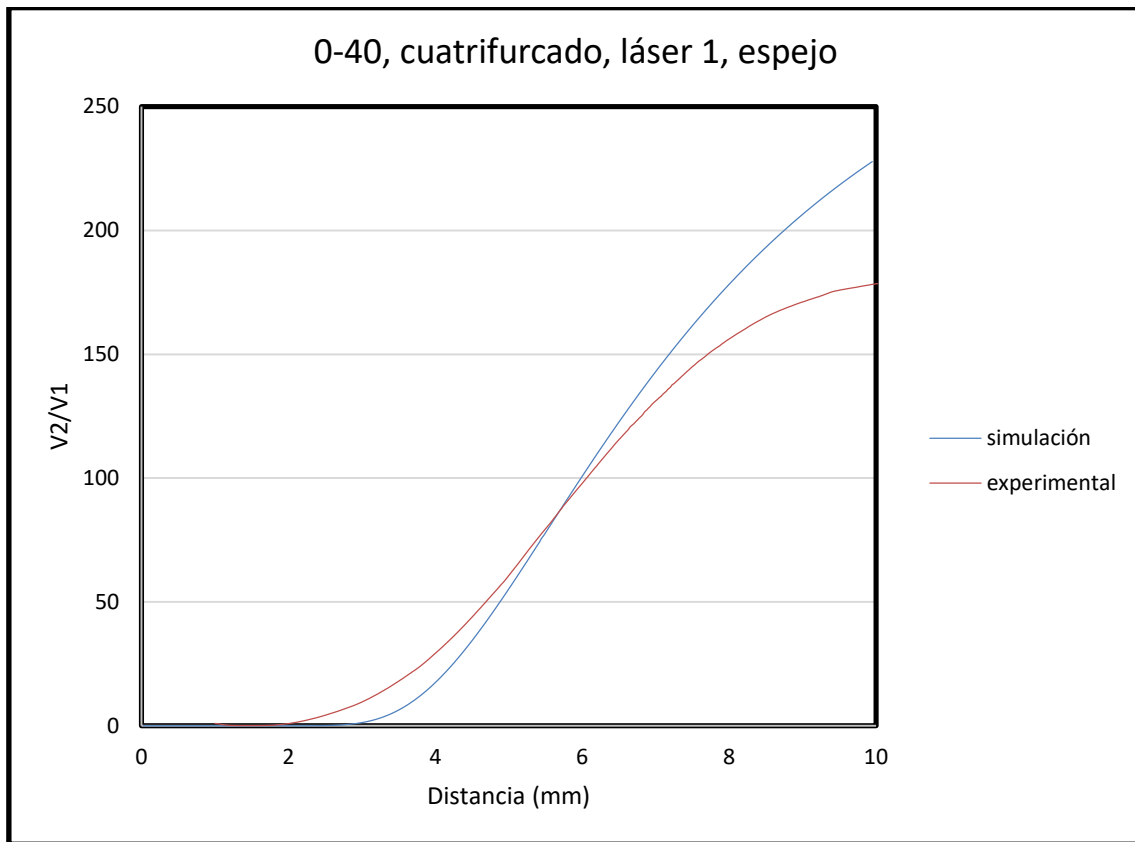


Ilustración 69: Cuatrifurcado, 0-40, láser 1, espejo

Tras corregir un offset de 1000 micras, se va a mostrar la tabla de diferencia de distancias. En este caso hay que tener en cuenta que si bien ambas curvas parecen muy distintas, para esta configuración el rango lineal utilizado para la medición es de alrededor de 1mm, por tanto, la tabla de diferencia de distancias entre curvas características se centrará en esa región:

V2/V1 (experimental)	Distancia en experimental (mm)	Distancia en Matlab (mm)	Variación (mm)
60	4.985	5.11	0.125
70	5.24	5.33	0.09
80	5.54	5.54	0
90	5.785	5.76	0.025
100	6.065	5.99	0.075
110	6.34	6.21	0.13

Tabla 43: Cuatrifurcado, 0-40, láser 1, espejo

Se puede apreciar que en la región acotada que se utiliza para la medición, la diferencia de distancias es pequeña, de un máximo de 130 micras. En cuanto a las pendientes:

	Pendiente de la curva simulada	Pendiente de la curva experimental	Variación (%)
Valor	45.45	36.84	18.95

Tabla 44: Cuatrifurcado, 0-40, láser 1, espejo

En este caso la diferencia de pendientes es elevada, pero ya ha quedado definido en la tabla anterior que la diferencia de distancias es pequeña, por lo que se puede decir que el programa de simulación se adapta bien a la medición experimental.

Por tanto, queda demostrado que para los casos mostrados el programa da unos resultados muy próximos a los datos recogidos de las mediciones. El siguiente paso consiste en probar el programa de simulación para el caso de que el objetivo a iluminar no sea el caso ideal del espejo sino que sea el álabe (menor reflectividad) y comprobar si ambas curvas (simulación y experimental) encajan.

7.2.11. Comparación de simulación y caso ideal

En este punto se van a comparar los datos que se logran con el programa de simulación manteniendo los parámetros del apartado anterior, es decir, los del caso ideal y a 20°C (aunque ya se sabe que la T^a no es un factor determinante en la región I), y variando solo los parámetros que afectan al objeto a iluminar (en este caso el álabe). Para poder valorar mejor esta transición al caso del álabe, se van a mostrar los mismos casos que se han probado para el espejo. Los resultados en cuanto a pendientes han sido:

Caso	Pendiente simulación	Pendiente experimental
Trifurcado, 10-30, láser 1	10.094	19.528
Trifurcado, 20-20, láser 1	0.7126	2.6555

Tabla 45: Diferencia entre pendientes experimental y curva de simulación

Como se puede ver, la diferencia en pendientes de estos dos casos es muy grande. De hecho, es tan grande que no merece la pena hacer una tabla de distancias ya que las diferencias serían demasiado grandes.

Esto indica que a la hora de pasar del caso ideal al caso real hay factores que hay que tener en cuenta que para el caso ideal no aparecen. Si atendemos al planteamiento matemático expuesto un apartado anterior, los factores que pueden ser los causantes de esta variación son:

- Los fotodetectores, cuya transimpedancia real no sea la transimpedancia que se indica en su datasheet.
- Los parámetros η y ζ que regulan el radio del campo óptico del cono de luz saliente de la fibra y que ilumina el álabe.

De modo que el siguiente paso consiste en conseguir el valor real de estos parámetros para introducirlos en el programa de simulación.

7.2.12. Caracterización de los fotodetectores

Si se atiende a las especificaciones del fabricante, los dos fotodetectores (PD1 y PD2), que son de la misma marca y modelo (Thorlabs PDA100A-EC), tienen las siguientes transimpedancias:

- Para 0 dB: $1.51 \cdot 10^3$ V/A
- Para 10 dB: $4.75 \cdot 10^3$ V/A
- Para 20 dB: $1.51 \cdot 10^4$ V/A
- Para 30 dB: $4.75 \cdot 10^4$ V/A
- Para 40 dB: $1.51 \cdot 10^5$ V/A

Por lo tanto, atendiendo a estos valores y al planteamiento matemático expuesto en puntos anteriores, para saber si realmente esos valores se corresponden con la realidad se debe medir la transimpedancia de los fotodetectores en una situación en la que tanto la eficiencia como la potencia se puedan simplificar y se tenga únicamente la relación de transimpedancias, es decir:

$$\frac{V2}{V1} = \frac{\text{Transimpedancia PD2}}{\text{Transimpedancia PD1}} \quad (9)$$

Esta situación se consigue midiendo ambas tensiones ($V1$ y $V2$) a la misma T^a para que la eficiencia se pueda simplificar, y haciendo que llegue a los dos anillos la misma potencia para que también se simplifique. De esta forma, se tienen unas relaciones de transimpedancias teóricas para las configuraciones que se han simulado para la caracterización del sensor, que son:

- $\frac{V2(20\text{ dB})}{V1(20\text{ dB})} = 1$
- $\frac{V2(30\text{ dB})}{V1(10\text{ dB})} = 10$
- $\frac{V2(40\text{ dB})}{V1(0\text{ dB})} = 100$

- $\frac{V_2 (40 \text{ dB})}{V_1 (10 \text{ dB})} = 31.798$

El proceso que se ha seguido para ver si estas relaciones teóricas se mantienen en la práctica ha consistido en llevar a cabo varias mediciones de distintas formas que se detallarán a continuación.

La primera forma de medición que se ha seguido ha consistido en conectar directamente un láser a los fotodetectores haciendo uso de un bundle disponible en el laboratorio. Para ello, se ha hecho uso de un Power Meter PM100 USB con el correspondiente fotodiodo adaptado a la longitud de onda del láser (660 nm).



Ilustración 70: Power Meter PM100USB utilizado

Mediante el Power Meter se podrá saber en todo momento la potencia de emisión del láser, ya que posee un software mediante el cual se puede visualizar ese dato. Además, el láser posee un potenciómetro con el que se puede regular su potencia de emisión.

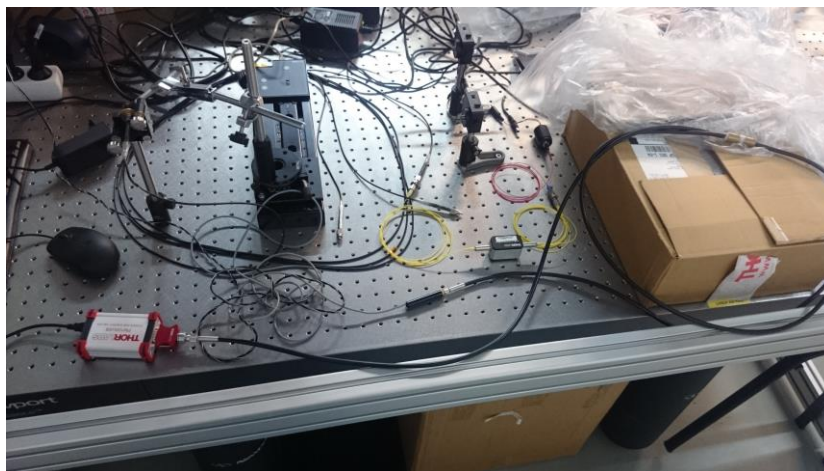


Ilustración 71: Montaje para saber la potencia emitida

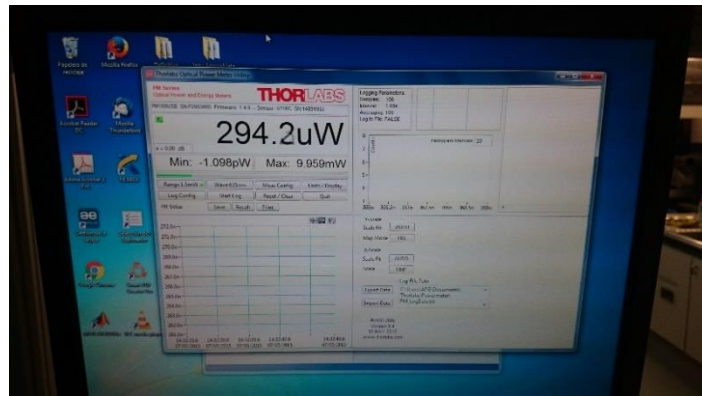


Ilustración 72: Software del Power Meter

Una vez se tenga la potencia de emisión deseada, se conectará el bundle a los dos fotodetectores consecutivamente y se anotará su lectura del multímetro.

De esta forma tanto la eficiencia como la potencia pueden simplificarse de la ecuación (8) y así únicamente queda la relación de transimpedancias. Los resultados han sido:

Potencia	PD1		PD2	
	Ganancia (dB)	Tensión en multímetro (V)	Ganancia (dB)	Tensión en multímetro (V)
70μW	0	0.0439	0	0.0478
	10	0.133	10	0.126
	20	0.4	20	0.376
	30	1.23	30	1.16
	40	3.87	40	3.67
110μW	0	0.0645	0	0.0666
	10	0.2	10	0.187
	20	0.601	20	0.572
	30	1.885	30	1.775
	40	5.92	40	5.6
150μW	0	0.0866	0	0.0877
	10	0.269	10	0.257
	20	0.827	20	0.789

	30	2.59	30	2.43
	40	8.16	40	7.74
190μW	0	0.107	0	0.109
	10	0.334	10	0.32
	20	1.035	20	0.99
	30	3.3	30	3.08
	40	10.27 (saturado)	40	9.8
	220μW	0	0.123	0
10		0.386	10	0.366
20		1.2	20	1.139
30		3.75	30	3.56
40		10.79 (saturado)	40	10.59 (saturado)
300μW	0	0.163	0	0.16
	10	0.507	10	0.483
	20	1.59	20	1.513
	30	4.98	30	4.75
	40	10.8 (saturado)	40	10.59 (saturado)

Tabla 46: Resultados de las mediciones

De acuerdo con estos resultados, la primera conclusión a sacar es que el PD2, que es el que se conecta al anillo de fibras externo, proporciona medidas de menor valor que el PD1. Las relaciones de transimpedancia con este método han resultado ser:

- $V_{20-20} = 0.948$
- $V_{10-30} = 9.07$
- $V_{10-40} = 29.148$
- $V_{0-40} = 90.188$

Son similares a las que se tenían en el plano teórico pero con valores tirando a la baja. Teniendo en cuenta que en este caso no se han considerado los factores que pueden influir en la medición (se ha conectado directamente el láser al PD) y debido a que las medidas reales que se van a realizar son las recogidas por la reflexión del láser en el álabe, estos valores obtenidos hacen pensar que la relación real de transimpedancias

del experimento de medida de TC es aun inferior a estos valores porque en el sistema de medición que se está llevando a cabo en este proyecto sí que va a haber más pérdidas porque la luz viajará por el aire, reflejará en el objetivo y se recepcionará. Es de suponer que en ese proceso se generarán pérdidas que harán que esos valores de relación de transimpedancias sean menores.

Para comprobarlo, se va a llevar a cabo la calibración de los fotodetectores con un espejo en lugar de álabe, y se va a medir la tensión recogida a distintas distancias fijas para eliminar así el efecto que pueda tener el desplazamiento. En primer lugar se conectará la pata del bundle correspondiente al anillo interior al PD1, se tomará su dato de tensión, y posteriormente se hará lo mismo con el PD2 conectándole también la pata del bundle del anillo interior.



Ilustración 73: Espejo utilizado en las mediciones

Con este proceso se busca conseguir una relación de transimpedancias más acorde con el caso que se está midiendo haciendo uso de un objeto que posee una reflectividad ideal, para ver si también se mantienen las relaciones del caso anterior o no. Los resultados han sido:

Distancia entre bundle y espejo	PD1		PD2	
	Ganancia (dB)	Tensión en multímetro (V)	Ganancia (dB)	Tensión en multímetro (V)
1 mm	0	0.18	0	0.178
	10	0.565	10	0.54
	20	1.779	20	1.697
	30	5.598	30	5.316
	40	10.8 (saturado)	40	10.59 (saturado)
1.3 mm	0	0.387	0	0.365
	10	1.219	10	1.133

	20	3.846	20	3.62
	30	10.8 (saturado)	30	10.6 (saturado)
	40	10.8 (saturado)	40	10.6 (saturado)
1.6 mm	0	0.45	0	0.446
	10	1.418	10	1.387
	20	4.48	20	4.396
	30	10.8 (saturado)	30	10.59 (saturado)
	40	10.8 (saturado)	40	10.59 (saturado)
1.9 mm	0	0.443	0	0.421
	10	1.395	10	1.3
	20	4.408	20	4.145
	30	10.8 (saturado)	30	10.58 (saturado)
	40	10.8 (saturado)	40	10.58 (saturado)

Tabla 47: Resultado de las medidas

Como se puede ver, de nuevo el PD2 da valores algo inferiores al PD1 y los valores de ambos fotodetectores están saturados en todos los casos de 40dB de ganancia e incluso para algunos de los casos de 30dB de ganancia, por lo que para algunas configuraciones no se puede sacar la relación de transimpedancias. De acuerdo con estos datos, las relaciones de transimpedancia que se tienen en este caso son:

- $V_{20-20} = 0.954$
- $V_{10-30} = 9.414$

A simple vista se puede ver que los resultados de este caso son muy parecidos a los del caso anterior, pero como no se han podido obtener todos los valores necesarios para poder tener todas las relaciones de transimpedancia, se ha decidido repetir el mismo sistema de medición pero utilizando directamente el álabe como objeto reflectante. Los resultados para este caso han sido:



Distancia entre bundle y álabe	PD1		PD2	
	Ganancia (dB)	Tensión en multímetro (V)	Ganancia (dB)	Tensión en multímetro (V)
1 mm	0	0.02196	0	0.02687
	10	0.06341	10	0.06029
	20	0.174	20	0.137
	30	0.524	30	0.501
	40	1.631	40	1.568
1.3 mm	0	0.01762	0	0.02265
	10	0.0498	10	0.04697
	20	0.131	20	0.124
	30	0.385	30	0.368
	40	1.193	40	1.144
1.6 mm	0	0.01479	0	0.01973
	10	0.0408	10	0.03775
	20	0.103	20	0.0953
	30	0.3	30	0.275
	40	0.921	40	0.85
2 mm	0	0.0124	0	0.01757
	10	0.332	10	0.031
	20	0.07844	20	0.07414
	30	0.22	30	0.209
	40	0.672	40	0.639

Tabla 48: Resultados de las mediciones

De nuevo se cumple que el PD2 da lecturas inferiores al PD1. La diferencia respecto al caso anterior es notable, ya que en este caso ninguna configuración de ganancias está ni siquiera cerca de saturación. Las relaciones de transimpedancia que se logran son:

- $V_{20-20} = 0.943$
- $V_{10-30} = 7.343$

- $V_{10-40} = 22.84$
- $V_{0-40} = 64.59$

Estas relaciones de transimpedancia están logradas de la forma más similar a las medidas que se están realizando, de forma que son a las que mayor credibilidad se les puede dar.

Si se ponen todas las relaciones de transimpedancia en una tabla para compararlas:

Relación de transimpedancia	Valor teórico	Conexión directa	Reflexión en espejo	Reflexión en álabe
V_{20-20}	1	0.948	0.954	0.943
V_{10-30}	10	9.07	9.414	7.343
V_{10-40}	31.789	29.148	-	22.84
V_{0-40}	100	90.188	-	64.59

Tabla 49: Comparativa de mediciones

De entre todas las formas en las que se ha medido, la única configuración que se puede considerar estable es la correspondiente a la configuración V_{20-20} , que en todos los casos se ha mantenido cerca del valor teórico. Por tanto, se considera que esa es la configuración más estable de todas y es la que se usará como referencia para ajustar los parámetros del programa. Una vez se tenga esa configuración bien ajustada, se valorarán las demás.

Si se tiene en cuenta que los valores obtenidos con la reflexión en el álabe son los más cercanos a la realidad, son esos los que se van a considerar para el programa de simulación. Da la casualidad de que son los valores que más difieren del valor teórico, de modo que habrá que crear un parámetro a introducir en las ecuaciones del planteamiento matemático mostrado en puntos anteriores de forma que actúen como factor de compensación del funcionamiento de los fotodetectores. Estos valores del factor de corrección relacionarán el valor real obtenido en las medidas con los valores teóricos de transimpedancia proporcionados por el fabricante. Por tanto, los valores de compensación de las transimpedancias quedarán:

- Para configuración 20-20

$$\frac{\text{Valor de la medida}}{\text{Valor teórico}} = \frac{0.943}{1} = 0.943$$

- Para configuración 10-30:

$$\frac{\text{Valor de la medida}}{\text{Valor teórico}} = \frac{7.343}{10} = 0.743$$

- Para configuración 10-40

$$\frac{\text{Valor de la medida}}{\text{Valor teórico}} = \frac{22.84}{31.789} = 0.72$$

- Para configuración 0-40:

$$\frac{\text{Valor de la medida}}{\text{Valor teórico}} = \frac{64.59}{100} = 0.65$$

Este factor se introducirá en la ecuación que divide las dos tensiones, de modo que la ecuación final tras la caracterización de los fotodetectores es:

$$\frac{V_2}{V_1} = \text{factor de compensación} * \frac{R_2(\lambda) * \text{Transimpedancia}(PD2) * P_2(z)}{R_1(\lambda) * \text{Transimpedancia}(PD1) * P_1(z)} \quad (10)$$

De esta forma ya tenemos definido uno de los factores que afectaban a la simulación.

7.2.13. Caracterización de los parámetros que modelan el radio del haz de luz emitido por el láser a la salida de la fibra transmisora

El segundo de los factores que se había nombrado como causante de la diferencia entre el comportamiento real y el simulado es el de los parámetros que regulan el radio efectivo del campo óptico de salida que se ha expuesto en el apartado de planteamiento matemático. En concreto, los parámetros causantes son η y ζ , que son parámetros dependientes de la fuente de luz utilizada y la fibra transmisora [28-29]. El otro parámetro que se incluye en esta ecuación de radio de campo óptico es σ , pero su efecto y valor ya ha quedado definido debido a que es un parámetro cuyo valor vale la unidad en los casos en los que se haga uso de una fibra de salto de índice, como es el caso. De forma que solo se disponen de η y ζ para ajustarlos y que la curva de simulación se aproxime a la de la realidad.

Los valores para estos parámetros que trae el paper a partir del cual se han extraído las fórmulas del planteamiento matemático son para el caso ideal en cuanto a condiciones y con un determinado equipo (un bundle y un láser determinado) tal y como se ha podido comprobar a la hora de comparar el experimento llevado con el espejo y la simulación, que resultaban en curvas prácticamente solapadas. Sin embargo, tal y como se ha visto para los fotodetectores, los valores de determinados parámetros del caso ideal y el caso experimental no encajan, de forma que hay que modificarlos para que se adapten al caso experimentado.

Siguiendo este razonamiento y de acuerdo con el paper nombrado previamente, mediante el método de ensayo y error se han ido variando los valores de estos dos parámetros hasta que se han ajustado al valor del radio del campo óptico de salida del bundle.

El resultado ha consistido en que el parámetro η , ligado al bundle que se está utilizando, ha resultado tener un valor mayor al indicado en el paper, probablemente debido a que las distancias entre el bundle utilizado en el paper y el utilizado en los ensayos poseen distintas distancias entre los anillos concéntricos. Como el utilizado en los ensayos posee menor distancia entre anillos, el acoplamiento será mayor, lo que hace que η tome un valor mayor. Aun así y tal como se verá en la siguiente tabla, la diferencia de valores de η no es muy grande respecto del indicado en el paper.

En cuanto a ζ , relacionado con la fuente de luz, se ha mantenido igual respecto de los

valores indicados en el paper que ha servido de guía.

En resumen, los valores de los parámetros que han resultado ser los más acordes con datos experimentales son:

PARA EL ÁLABE	η	ζ
Trifurcado láser 1	$1.23*1.12=1.3776$	0.2
Cuatrifurcado láser 1	$1.07*1.12=1.1984$	0.2
PARA EL ESPEJO	η	ζ
Trifurcado láser 1	$1*1.12=1.12$	0.2
Cuatrifurcado láser 1	$1*1.12=1.12$	0.2

Tabla 50: Parámetros del radio de campo óptico

Por tanto, una vez se tiene caracterizado el radio del campo óptico para el caso bajo estudio, ya se tienen caracterizados todos los factores del ensayo.

7.2.14. Comparación entre simulación y resultados experimentales con álabe

En este apartado se muestran los resultados del programa de simulación comparados con los datos extraídos de las mediciones reales usando el álabe como objetivo y para cada configuración experimentada. Al igual que se ha hecho para mostrar la diferencia entre la simulación y el ensayo llevado a cabo con el espejo y por el mismo motivo, existe un offset que es necesario corregir entre ambas curvas para que se solapen en la región I, que es donde interesa que haya el mayor solape posible. Las curvas experimentales que se muestran son las curvas a 20°C, que ya se ha visto que son estables en la región I para las T^a que se han medido.

Para Trifurcado, láser 1, 20-20, álabe:

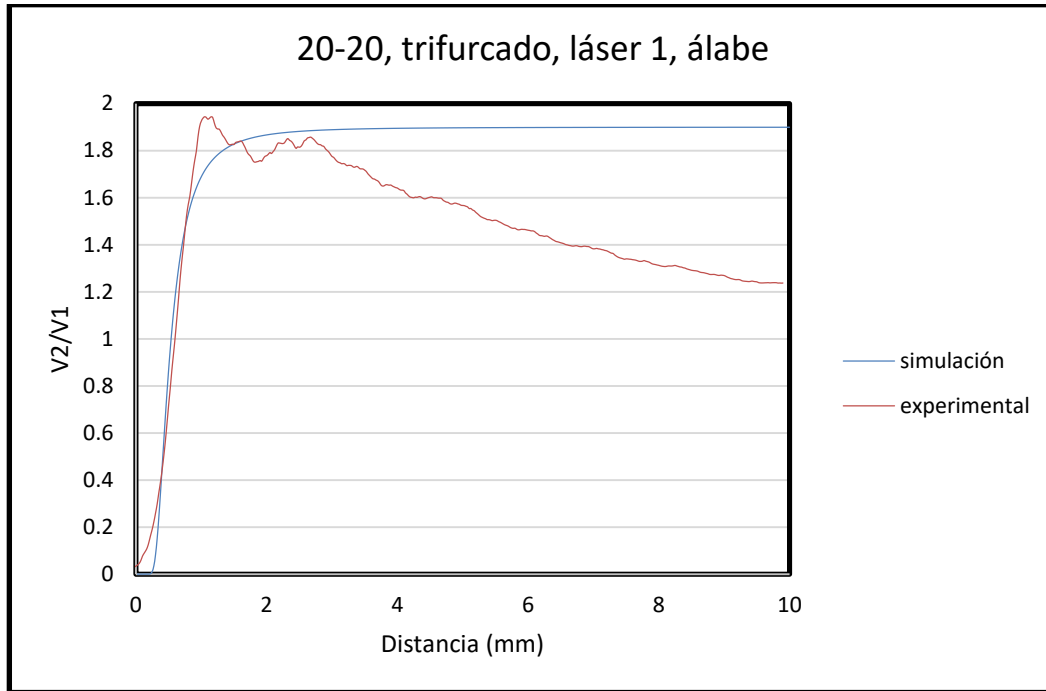


Ilustración 74: 20-20, trifurcado, láser 1, álabe

De acuerdo con los datos recogidos, existe un offset de 100 micras. Con eso corregido, los valores de diferencia en distancia y en pendiente son:

V2/V1 (experimental)	Distancia en experimental (mm)	Distancia en programa de simulación (mm)	Variación (mm)
0.4	0.385	0.385	0
0.7	0.49	0.465	0.025
1	0.6	0.54	0.06
1.5	0.774	0.776	0.002

Tabla 51: Diferencia en distancia para 20-20 y trifurcado

	Medida experimental	Simulación	Variación (%)
Pendiente	2.6555	2.599	2.11

Tabla 52: Diferencia de pendientes

Las diferencias entre ambas curvas son muy pequeñas, siendo el máximo un valor de 60 micras. Pasa lo mismo en cuanto a las pendientes, que su variación es pequeña (2.11%).

Para Trifurcado, láser 1, 10-30, álabe:

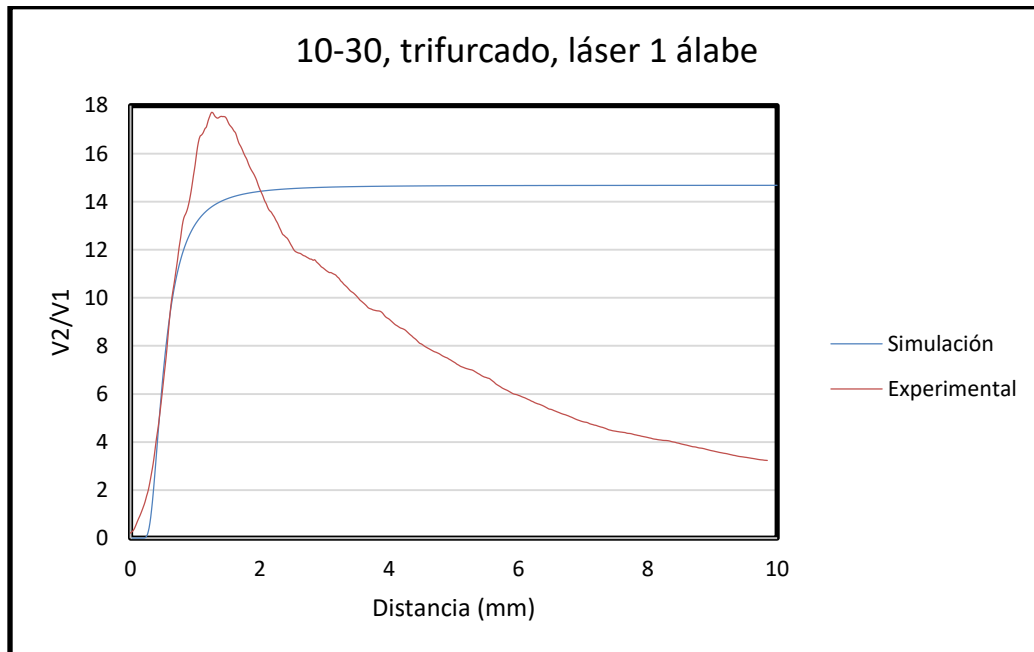


Ilustración 75: 10-30, trifurcado, láser 1, álabe

De acuerdo con los datos, hay un offset de 150 micras. Con eso corregido, los valores de diferencias son:

V2/V1 (experimental)	Distancia en experimental (mm)	Distancia en programa de simulación (mm)	Variación (mm)
4	0.39	0.415	0.025
7	0.53	0.515	0.015
9	0.6	0.59	0.01
11	0.7	0.724	0.024

Tabla 53: Diferencia de distancias

	Medida experimental	Simulación	Variación (%)
Pendiente	19.734	20.897	5.89

Tabla 54: Diferencia de pendientes

En este caso también las diferencias en las dos magnitudes (pendiente y distancia) son pequeñas (25 micras y 5.89%).

Para cuatrifurcado, láser 1, 20-20, álabe:

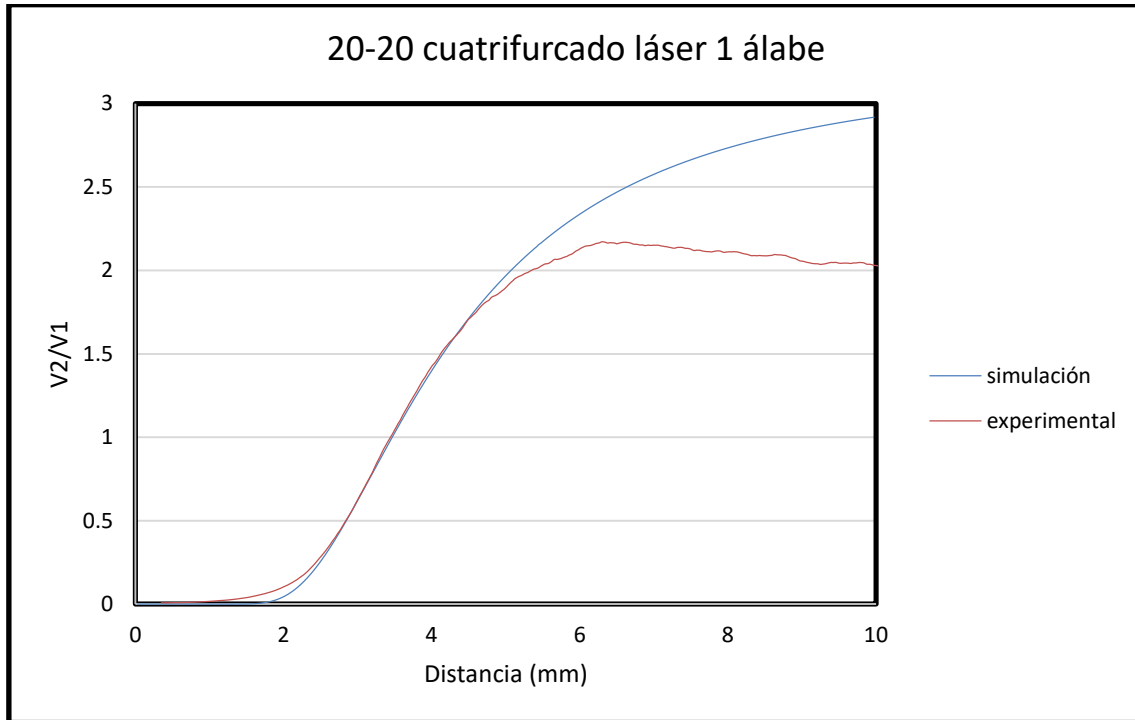


Ilustración 76: 20-20, cuatrifurcado, láser 1, álabe

De acuerdo con datos recogidos, hay un offset de 325 micras. Con eso corregido, los valores son:

V2/V1 (experimental)	Distancia en experimental (mm)	Distancia en programa de simulación (mm)	Variación (mm)
0.4	2.7	2.749	0.049
0.7	3.1	3.1	0
1	3.45	3.5	0.05
1.3	3.83	3.86	0.03
1.6	4.324	4.349	0.025

Tabla 55: Diferencia de distancias

	Medida experimental	Simulación	Variación (%)
Pendiente	0.7598	0.75	1.16

Tabla 56: Diferencia de pendientes

De nuevo, las diferencias en ambas magnitudes (distancia y pendientes) son muy pequeñas (50 micras y 1.16% de pendiente), de forma que se puede decir que el programa funciona correctamente.

Para cuatrifurcado, láser 1, 10-30, álabe:

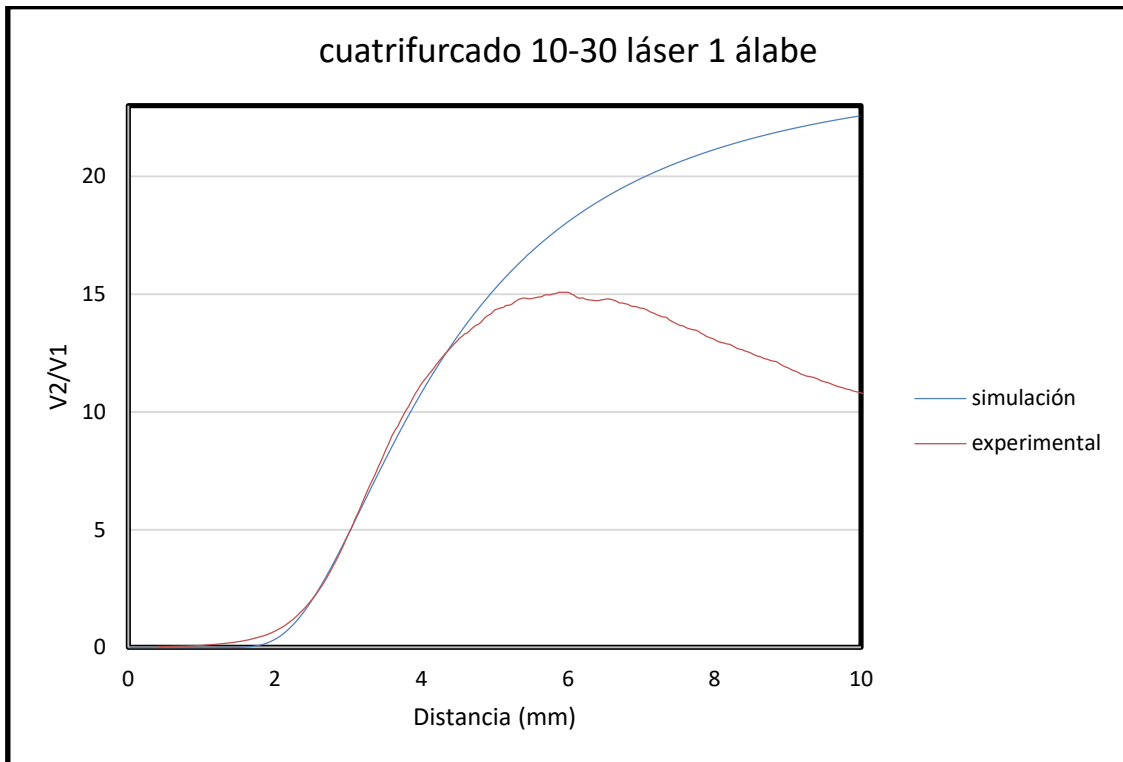


Ilustración 77: Cuatrifurcado, láser 1, 10-30, álabe

Atendiendo a los datos, hay un offset de 375 micras. Con eso corregido, los valores son:

V2/V1 (experimental)	Distancia en experimental (mm)	Distancia en programa de simulación (mm)	Variación (mm)
3	2.72	2.7	0.02
5	3.04	3.03	0.01
8	3.46	3.549	0.089
10	3.78	3.865	0.085
12	4.2	4.2749	0.0749

Tabla 57: Diferencia de distancias

	Medida experimental	Simulación	Variación (%)
Pendiente	6.05	5.856	3.2

Tabla 58: Diferencia de pendientes

Otra vez más, los resultados reales y los obtenidos por la simulación son muy cercanos entre sí, teniendo una diferencia de distancias máxima de 89 micras.

Para cuatrifurcado, láser 1, 10-40, álabe:

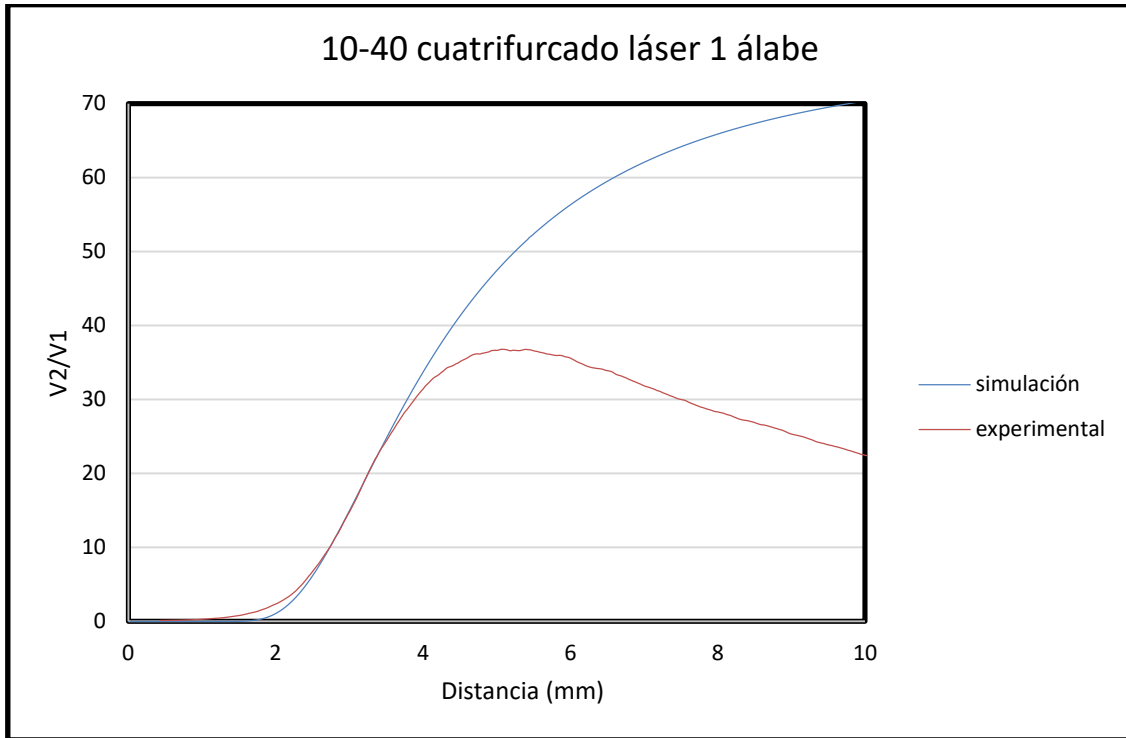


Ilustración 78: cuatrifurcado, láser 1, 10-40, álabe

Si se comparan ambas gráficas, hay un offset de 400 micras. Con eso corregido, los valores son:

V2/V1 (experimental)	Distancia en experimental (mm)	Distancia en programa de simulación (mm)	Variación (mm)
10	2.735	2.765	0.03
14	2.965	2.955	0.01
18	3.165	3.185	0.02
21	3.31	3.315	0.005
25	3.535	3.54	0.005

Tabla 59: Diferencia de distancias

	Medida experimental	Simulación	Variación (%)
Pendiente	19.28	19.26	0.08

Tabla 60: Diferencia de pendientes

Este caso es el que más proximidad entre datos ha dado, ya que la diferencia en distancias es de apenas 30 micras y en pendientes prácticamente no hay diferencias.

Para cuatrifurcado, láser 1, 0-40, álabe:

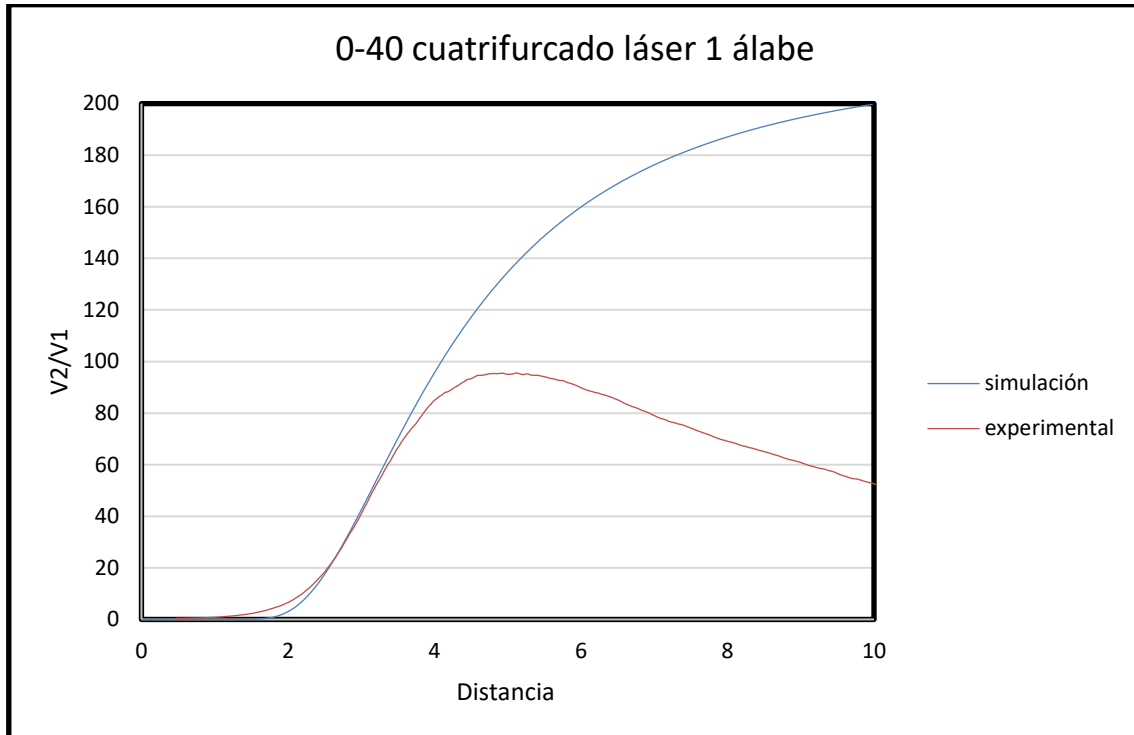


Ilustración 79: cuatrifurcado, láser 1, álabe, 0-40

Según los datos, hay un offset de 450 micras. Con eso corregido, los valores son:

V2/V1 (experimental)	Distancia en experimental (mm)	Distancia en programa de simulación (mm)	Variación (mm)
20	2.54	2.59	0.05
30	2.79	2.77	0.02
40	2.98	2.98	0
50	3.17	3.14	0.03
60	3.37	3.34	0.03

Tabla 61: Diferencia de distancias

	Medida experimental	Simulación	Variación (%)
Pendiente	48.69	53.08	9.01

Tabla 62: Diferencia de pendientes

Este caso es el que peor resultado da en cuanto a pendientes, ya que la diferencia es la mayor entre todos los casos, sin embargo, la diferencia en distancias sigue siendo muy pequeña, de 50 micras como máximo.

Una vez se han visto todos los casos correspondientes a las características que se

habían decidido en apartados anteriores, es decir, los casos realizados con el láser 1 y la región 1, se comprueba que los resultados que arroja el programa son válidos ya que la diferencia entre ambas gráficas es muy pequeña.

7.3. Estudio de la rugosidad del objetivo, ángulo de incidencia, cabeceo y reflectividad

En esta fase se van a llevar a cabo las medidas correspondientes al efecto sobre la medida proporcionada por el sensor que tienen la rugosidad del objetivo, el ángulo de incidencia, el cabeceo y la reflectividad.

7.3.1. Estudio de la rugosidad del objetivo

Para el estudio del efecto de la rugosidad del objetivo se ha utilizado el mismo sistema de medición que el seguido para las curvas de calibración. La diferencia respecto a aquellas medidas consiste en que ahora se han utilizado como objetivo unas superficies cuya rugosidad se conoce de antemano. En concreto se han utilizado tres: de 120 grit (la más áspera o menos pulida), 600 grit (rugosidad media) y 1500 grit (la superficie menos áspera o más pulida).



Ilustración 80: Superficies rugosas utilizadas (de izquierda a derecha: 120, 600 y 1500 grit)

El significado de la palabra grit indica el número de arañazos por pulgada lineal de abrasión, y permite relacionar la rugosidad de la superficie con la diferencia entre los picos y valles que posee. Por ejemplo:

Standard Grit (reference only)	Ra μin	Ra μm	RMS μin	RMS μm
150	27 – 32	0.68 – 0.80	30 – 35	0.76 – 0.89
180	16 – 23	0.46 – 0.58	20 – 25	0.51 – 0.64
240	14 – 18	0.34 – 0.46	15 – 20	0.38 – 0.51
320	8 – 10	0.21 – 0.25	9 – 11	0.23 – 0.28

Tabla 63: Relación entre grit y otras magnitudes de medición

Donde RMS es la media cuadrática de la rugosidad. Con este método se mide una muestra en busca de picos y valles. Ra es la media aritmética, que representa la

media de todos los picos y valles. En ambos casos un valor bajo indica un acabado suave en la superficie.

La diferencia de comportamiento entre estas superficies viene especificado en el datasheet del fabricante (Thorlabs), e influye directamente en la intensidad reflejada.

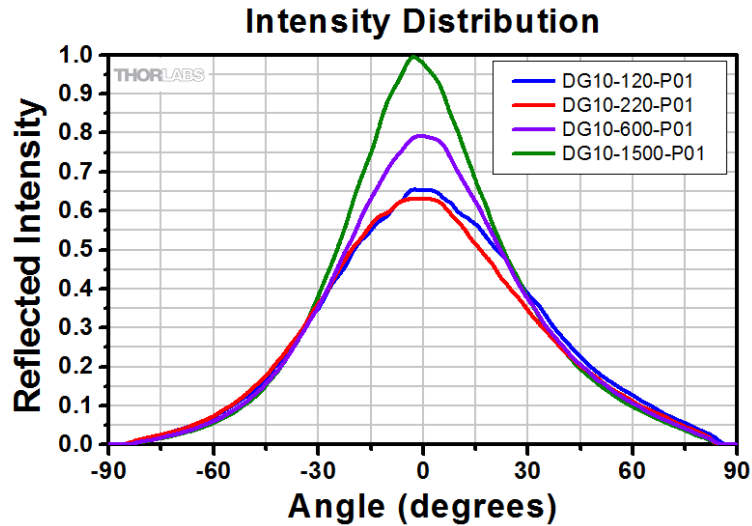


Ilustración 81: Comportamiento de las superficies

Como se puede ver, existe una diferencia importante en cuanto a intensidad reflejada se refiere, especialmente con un ángulo de incidencia de 0° grados, que es el caso a experimentar.

El sistema de medición ha sido el mismo que en apartados anteriores tal y como se ve en la imagen.

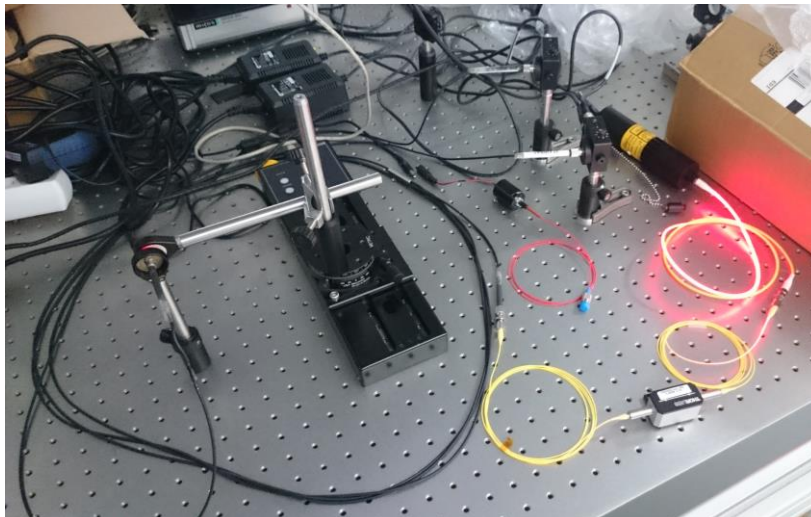


Ilustración 82: Montaje utilizado para la medición

Se han llevado a cabo en el laboratorio del grupo de Fotónica Aplicada y se podría considerar que todas las medidas se han llevado a cabo a una T^a estable de 20°C

gracias a las condiciones estacionarias del laboratorio.

Para llevar a cabo la medición, el objetivo y el haz láser deben estar perpendiculares entre sí y hay que asegurarse de que el haz incida en la superficie rugosa, cuya rugosidad se supone uniforme en toda la superficie.

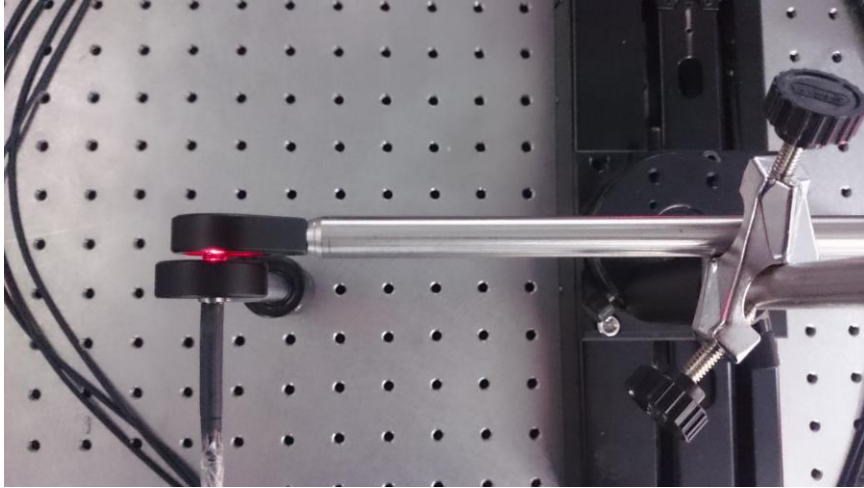


Ilustración 83: Vista cenital para apreciar perpendicularidad

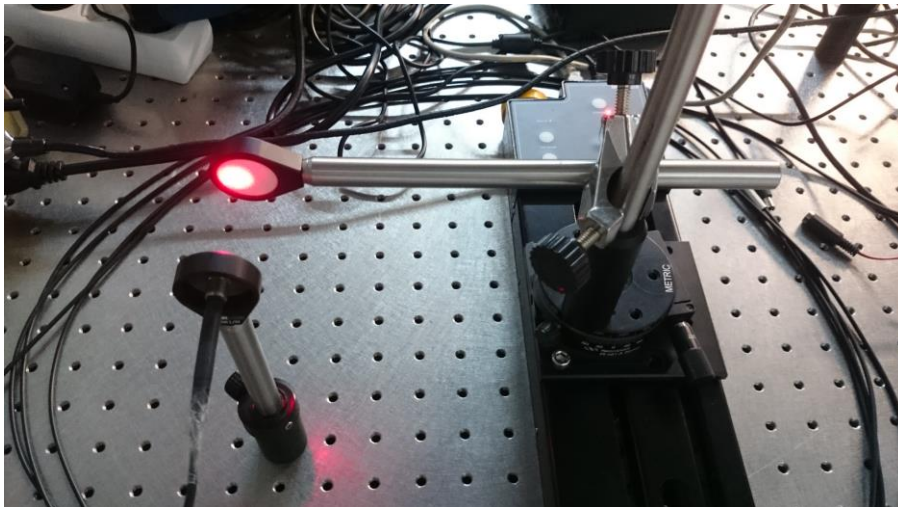


Ilustración 84: Haz incidiendo en la superficie rugosa

La curva de calibración barre una distancia de 10 mm en pasos de 25 μm , siendo la posición inicial el punto más cercano posible entre el objetivo y el bundle.

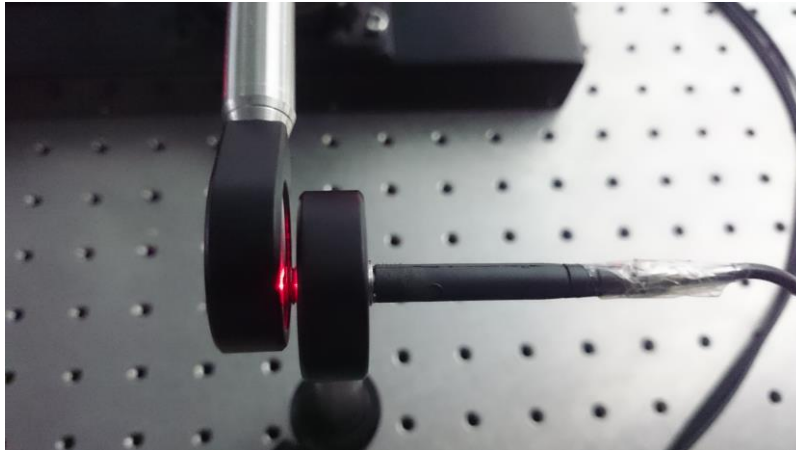


Ilustración 85: Posición más cercana posible entre bundle y superficie rugosa

Una vez definido el sistema de medición, se procede a medir. Las medidas que se realizarán serán con el láser 1, ya que es el que ha resultado ser más estable para el propósito de este apartado. Los resultados para la configuración de ganancias 10-30 y con el bundle trifurcado han sido:

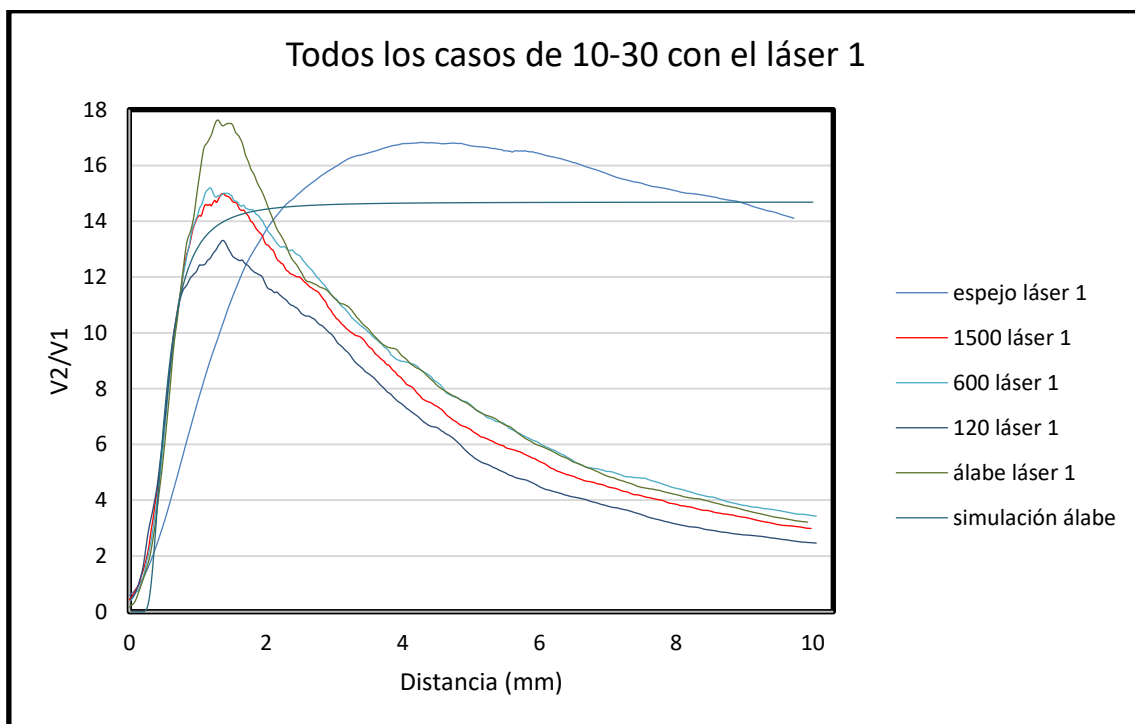


Ilustración 86: Resultados de trifurcado, láser 1 y 10-30

A primera vista se puede apreciar que en la región I, que es la zona de interés, todas las curvas de calibración se solapan. Para comprobar la precisión con la que se solapan, se va a calcular la diferencia en distancias de las curvas.

V2/V1	Simulación (mm)	Álabe (mm)	1500 grit (mm)	600 grit (mm)	120 grit (mm)	Variación máxima (mm)
4	0.42	0.425	0.385	0.415	0.375	0.05
5.5	0.46	0.49	0.47	0.475	0.465	0.03
7	0.51	0.56	0.526	0.535	0.525	0.05
8.5	0.575	0.61	0.585	0.59	0.585	0.035
10	0.65	0.675	0.66	0.67	0.67	0.025
11	0.725	0.725	0.72	0.72	0.725	0.005

Tabla 64: Tabla de distancias

En cuanto a las pendientes:

Simulación	Álabe	1500 grit	600 grit	120 grit	Variación máxima (%)
20.897	19.734	19.036	18.279	18.335	14.3

Tabla 65: Tabla de pendientes

Tanto las diferencias de distancias como las diferencias en pendientes son relativamente pequeñas, lo que hace concluir que para este caso la rugosidad de la superficie no afecta a la representación en la región I.

A continuación se realizará lo mismo pero con una configuración de ganancias de 20-20 con el bundle trifurcado y el láser 1.

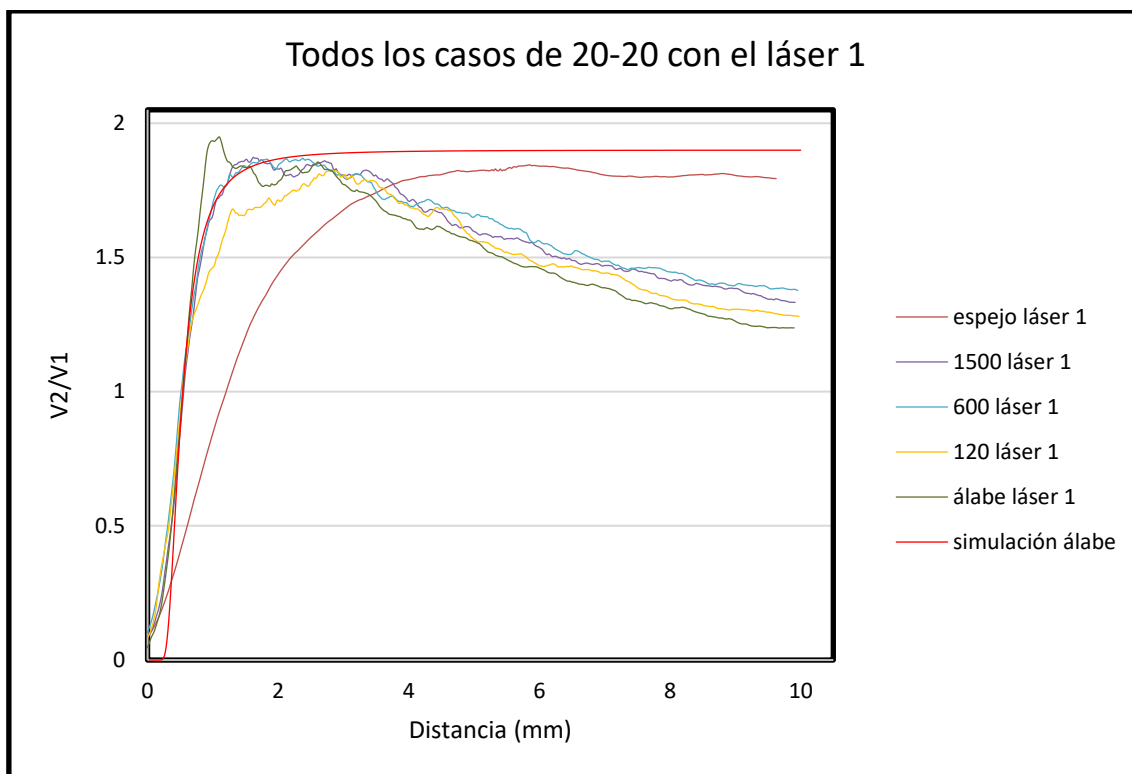


Ilustración 87: Resultados de trifurcado, láser 1 y 20-20

Tal y como pasaba en el caso anterior, en la región I todas las curvas de calibración son similares. De forma análoga, se va a mostrar la diferencia de distancias entre los casos mostrados.

V2/V1	Simulación (mm)	Álabe (mm)	1500 grit (mm)	600 grit (mm)	120 grit (mm)	Variación máxima (mm)
0.6	0.44	0.325	0.415	0.36	0.375	0.115
0.8	0.49	0.4	0.48	0.44	0.46	0.09
1	0.55	0.55	0.56	0.52	0.53	0.04
1.2	0.615	0.61	0.64	0.625	0.635	0.03
1.4	0.715	0.685	0.755	0.745	0.89	0.205

Tabla 66: Tabla de distancias

Los valores de las pendientes son:

Simulación	Álabe	1500 grit	600 grit	120 grit	Variación máxima (%)
2.599	2.6555	2.0271	1.8262	1.7728	49.79

Tabla 67: Tabla de pendientes

En este caso las distancias son notablemente más altas en los extremos que se han tomado para la región I. Si se limitase el tamaño de esa región los valores de

diferencia de distancias seguirían siendo pequeños.

Ahora se mostrarán los resultados para el bundle cuatrifurcado con el láser 1 y una configuración de ganancias de 10-30:

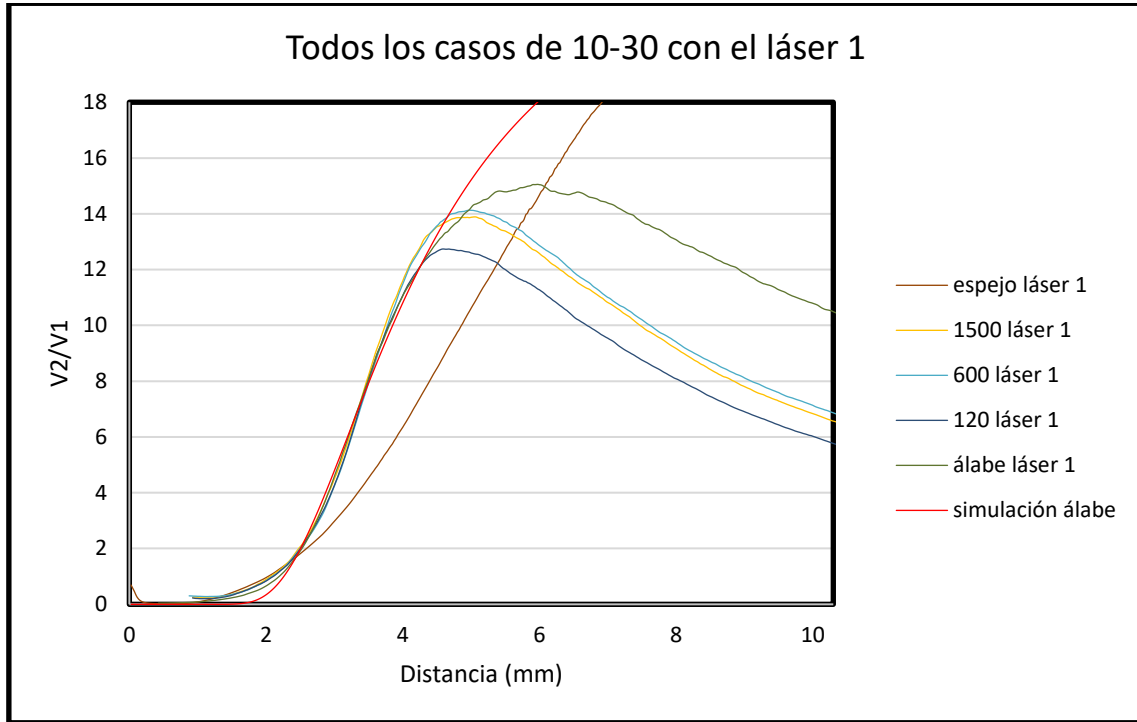


Ilustración 88: Resultados de cuatrifurcado, láser 1 y 10-30

De nuevo sucede algo parecido a los casos anteriores ya que en la región I todas las curvas parecen superpuestas. A continuación se muestran los valores de distancias y pendientes:

V2/V1	Simulación (mm)	Álabe (mm)	1500 grit (mm)	600 grit (mm)	120 grit (mm)	Variación máxima (mm)
2	2.51	2.525	2.48	2.49	2.52	0.045
4	2.875	2.92	2.92	2.97	2.96	0.095
6	3.2	3.21	3.22	3.25	3.249	0.05
8	3.52	3.49	3.47	3.52	3.49	0.05
10	3.86	3.81	3.75	3.78	3.75	0.11
11	4	4	3.9	3.925	4	0.1

Tabla 68: Tabla de distancias

Simulación	Álabe	1500 grit	600 grit	120 grit	Variación máxima (%)
5.37	6.05	7.0928	6.9163	6.6999	22.35

Tabla 69: Tabla de pendientes

El mismo razonamiento seguido para el caso anterior es aplicable a este. Los mayores valores de distancia se dan en los puntos que se acercan al final de la región I. Si se ajustase la longitud de esta región, las diferencias en distancia se mantendrían dentro de un margen de valores de pequeña magnitud.

Por último, queda mostrar los resultados correspondientes al mismo caso anterior pero con una configuración de ganancias de 20-20.

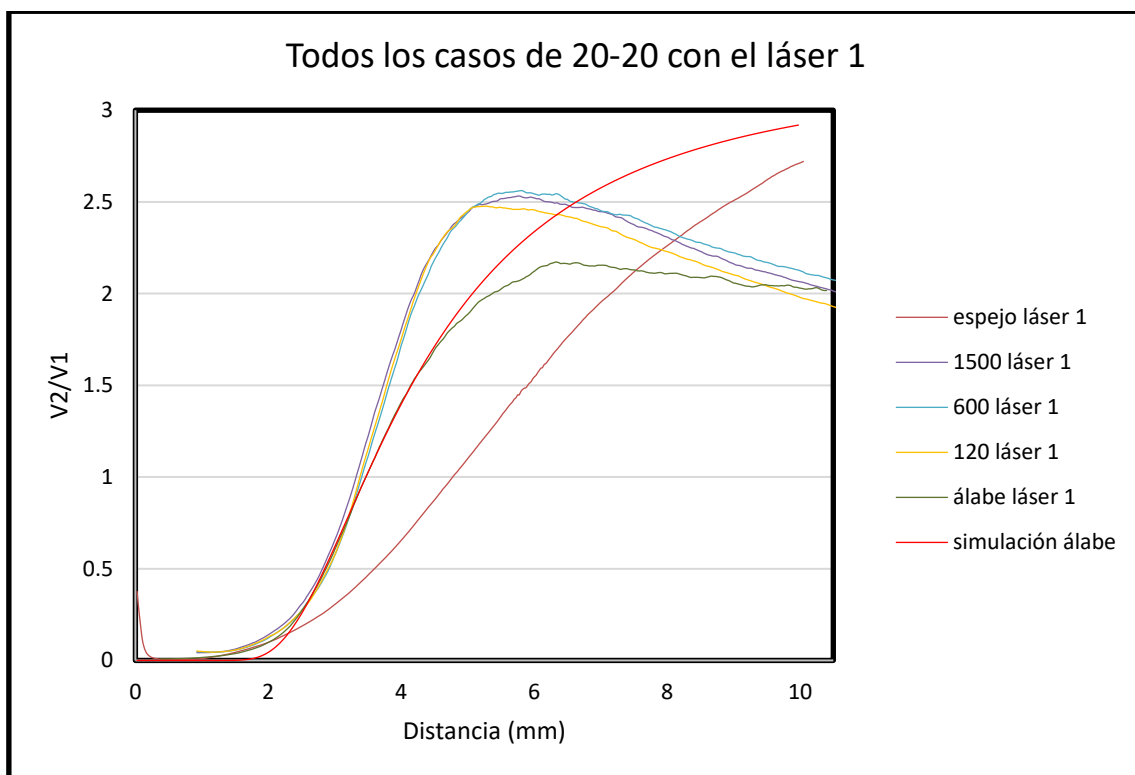


Ilustración 89: Resultados de cuatrifurcado, láser 1 y 20-20

Este caso es el que mayor diferencia ha mostrado entre el comportamiento del álabe y de la simulación y las superficies. Como a simple vista se ve la diferencia entre el comportamiento de la simulación y el álabe respecto del resto de superficies, no es necesario realizar una tabla de distancias.

Los mejores resultados se han logrado con el láser 1 y el bundle trifurcado, ya que son en los que mejor se ha compensado el efecto de la rugosidad además de que las curvas experimentales y la de simulación encajan casi con totalidad. Aun así, en todos los casos expuestos salvo en el caso del cuatrifurcado con configuración de ganancia 20-20 se puede decir que la rugosidad apenas afecta a la medición del álabe y que la simulación se ajusta a la medida experimental con bastante precisión.

Como conclusión se puede decir que la rugosidad apenas tiene efecto en este sistema de medición.

7.3.2. Estudio del ángulo de incidencia y el cabeceo

El dispositivo utilizado para este apartado (APY001/M detallado en el Anexo I) permite un desplazamiento de 8° en cada eje perpendicular (4° para cada lado desde el punto de 0° , que es donde el láser incide perpendicularmente en el álabe), es decir, 4° en el eje vertical y 4° en el eje horizontal, permitiendo además conjuntar ambos desplazamientos de forma simultánea. Aprovechando las características de este dispositivo, se ha realizado una calibración idéntica a todas las realizadas en este documento pero con la diferencia de que en este caso se ha ido desplazando el álabe un grado en cada caso para poder comprobar su efecto. Este procedimiento se ha llevado a cabo para múltiples configuraciones de medición (distintas ganancias y bundles). A continuación se muestran tanto las curvas de calibración como las tablas de diferencia de distancias, todas ellas de la región I, ya que es la región que ha resultado ser más estable frente a las variaciones térmicas.

Para trifurcado, 10-30, láser 1, álabe

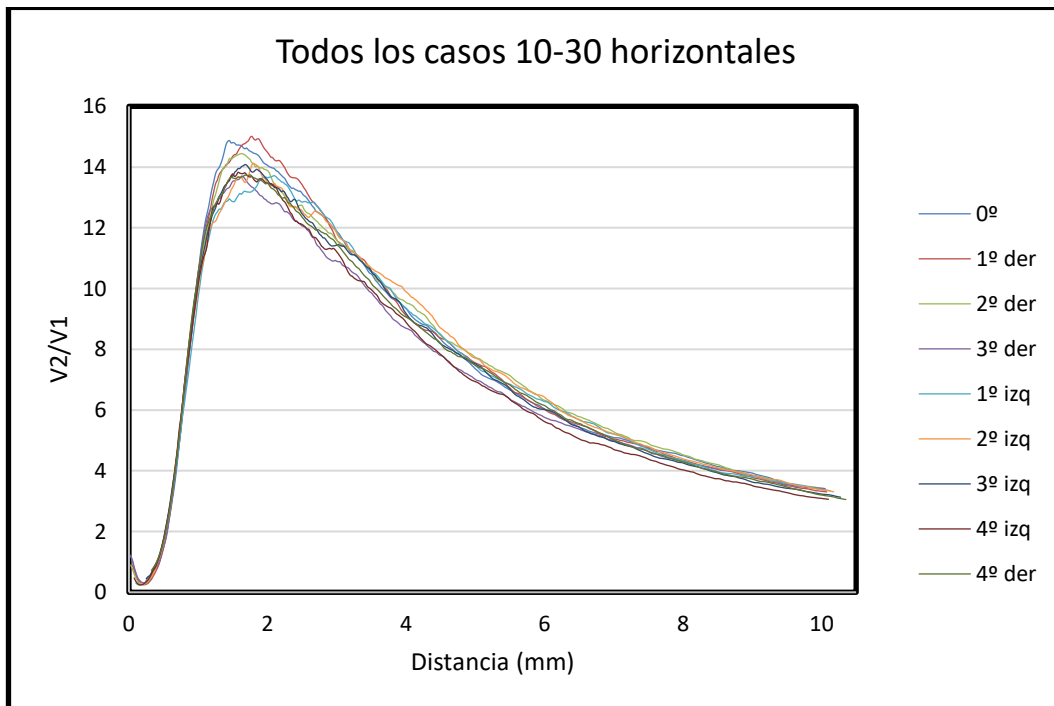


Ilustración 90: Calibración para desplazamiento horizontal

V2/V1	-4°	-3°	-2°	-1°	0°	1°	2°	3°	4°	Variación máxima (mm)
2.2	0.54	0.54	0.55	0.55	0.565	0.565	0.55	0.565	0.545	0.025
4	0.66	0.66	0.66	0.675	0.685	0.665	0.66	0.68	0.665	0.025
6	0.765	0.765	0.76	0.78	0.78	0.765	0.78	0.78	0.77	0.02
8	0.875	0.865	0.87	0.9	0.875	0.865	0.88	0.88	0.86	0.04
10	0.99	0.975	0.995	1.01	0.985	0.965	0.98	0.97	0.975	0.045
11	1.075	1.06	1.08	1.085	1.025	1.03	1.045	1.03	1.03	0.055

Tabla 70: Calibración para desplazamiento horizontal

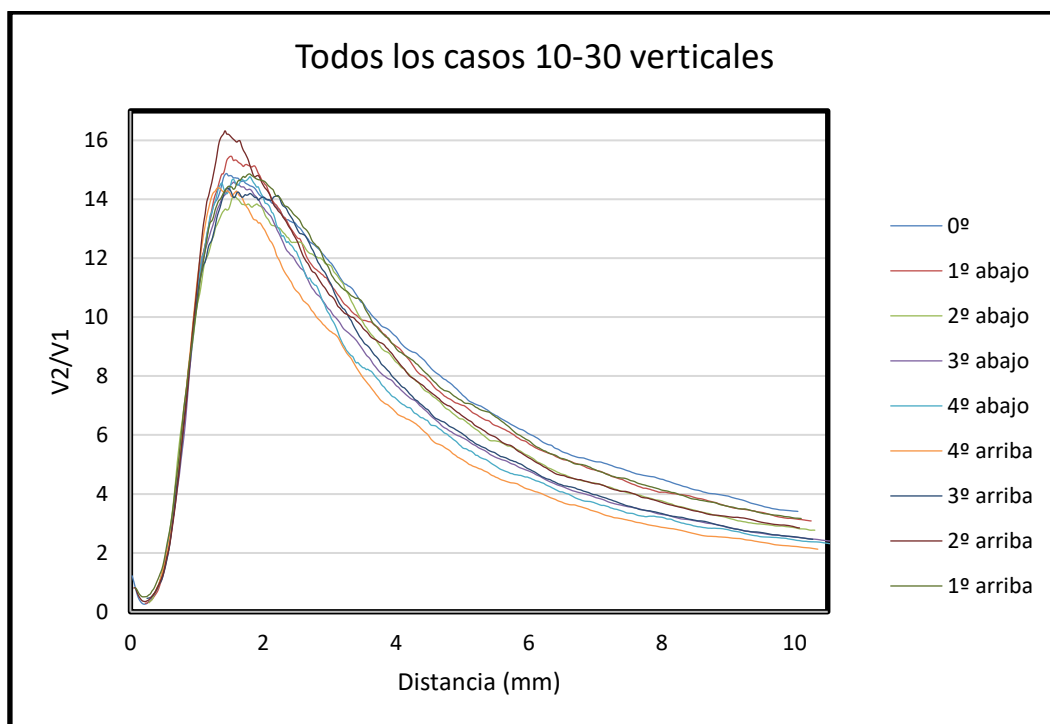


Ilustración 91: Calibración para desplazamiento vertical

V2/V1	-4°	-3°	-2°	-1°	0°	1°	2°	3°	4°	Variación máxima (mm)
2.2	0.56	0.57	0.56	0.58	0.565	0.545	0.585	0.59	0.57	0.045
4	0.69	0.7	0.665	0.685	0.685	0.665	0.69	0.685	0.69	0.035
6	0.79	0.805	0.755	0.77	0.78	0.765	0.785	0.79	0.775	0.04
8	0.87	0.885	0.87	0.865	0.875	0.865	0.88	0.875	0.865	0.015
10	0.965	0.975	0.985	0.965	0.985	0.98	0.965	0.975	0.95	0.035
11	1.015	1.02	1.06	1.01	1.025	1.04	1.01	1.03	0.99	0.07

Tabla 71: Calibración para desplazamiento vertical

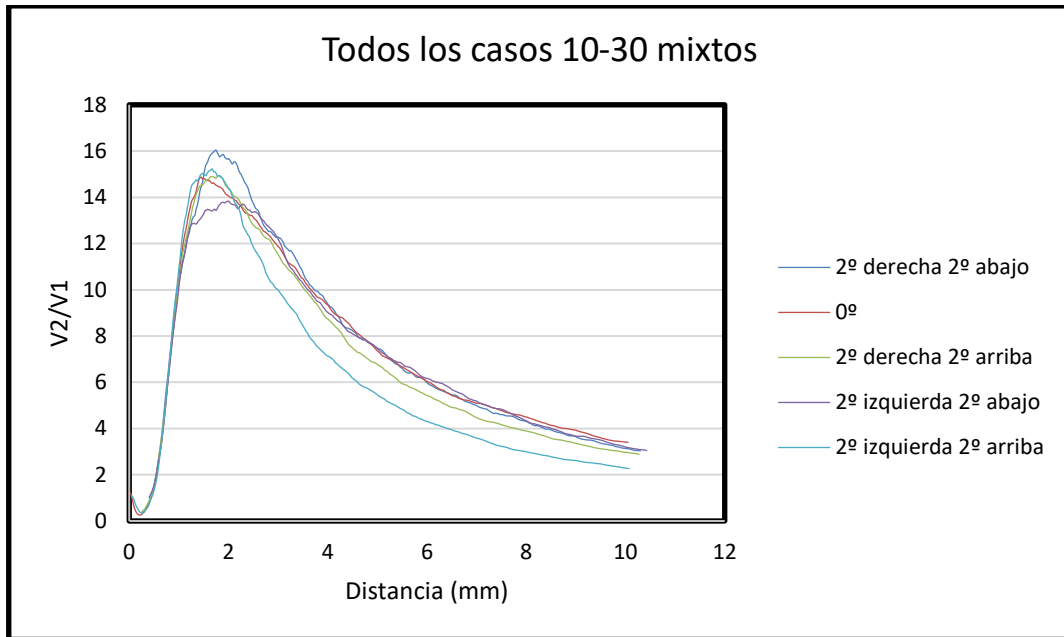


Ilustración 92: Calibración para desplazamiento mixto

V2/V1	2 izq 2 arr	2 izq 2 ab	2 der 2 arr	2 der 2 ab	0º	Variación máxima (mm)
2.2	0.58	0.56	0.56	0.56	0.565	0.02
4	0.68	0.685	0.675	0.675	0.685	0.01
6	0.775	0.78	0.775	0.76	0.78	0.02
8	0.86	0.88	0.875	0.865	0.875	0.02
10	0.96	0.99	0.98	0.965	0.985	0.03
11	1.01	1.06	1.045	1.06	1.025	0.05

Tabla 72: Calibración para desplazamiento mixto

Una vez se tienen todos los datos de todos los casos, a continuación se muestra la tabla de distancias máximas:

V2/V1	Variación máxima (mm)
2.2	0.05
4	0.04
6	0.05
8	0.04
10	0.06
11	0.075

Tabla 73: Tabla de distancias máximas

Como se puede apreciar, la variación máxima es de 75 micras, por lo que se puede

concluir que el cabeceo no afecta para el rango que se ha estudiado.

Para trifurcado, 20-20, láser 1, álabe

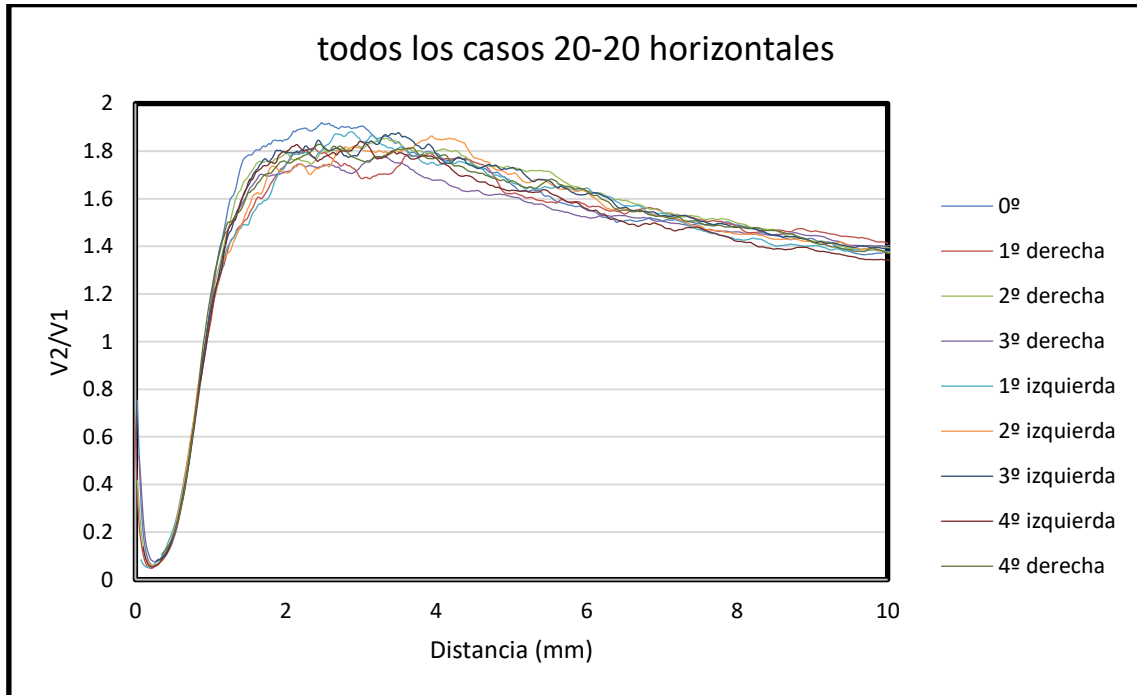


Ilustración 93: Calibración para desplazamiento horizontal

V2/V1	-4°	-3°	-2°	-1°	0°	1°	2°	3°	4°	Variación máxima (mm)
0.3	0.605	0.6	0.58	0.575	0.61	0.59	0.585	0.61	0.605	0.035
0.5	0.71	0.715	0.69	0.69	0.71	0.7	0.69	0.72	0.71	0.03
0.7	0.805	0.81	0.785	0.8	0.805	0.8	0.8	0.81	0.795	0.025
0.9	0.9	0.885	0.88	0.9	0.895	0.89	0.89	0.895	0.87	0.03
1.1	1	0.98	1	1	0.98	1.01	0.98	0.98	0.96	0.03

Tabla 74: Calibración para desplazamiento horizontal

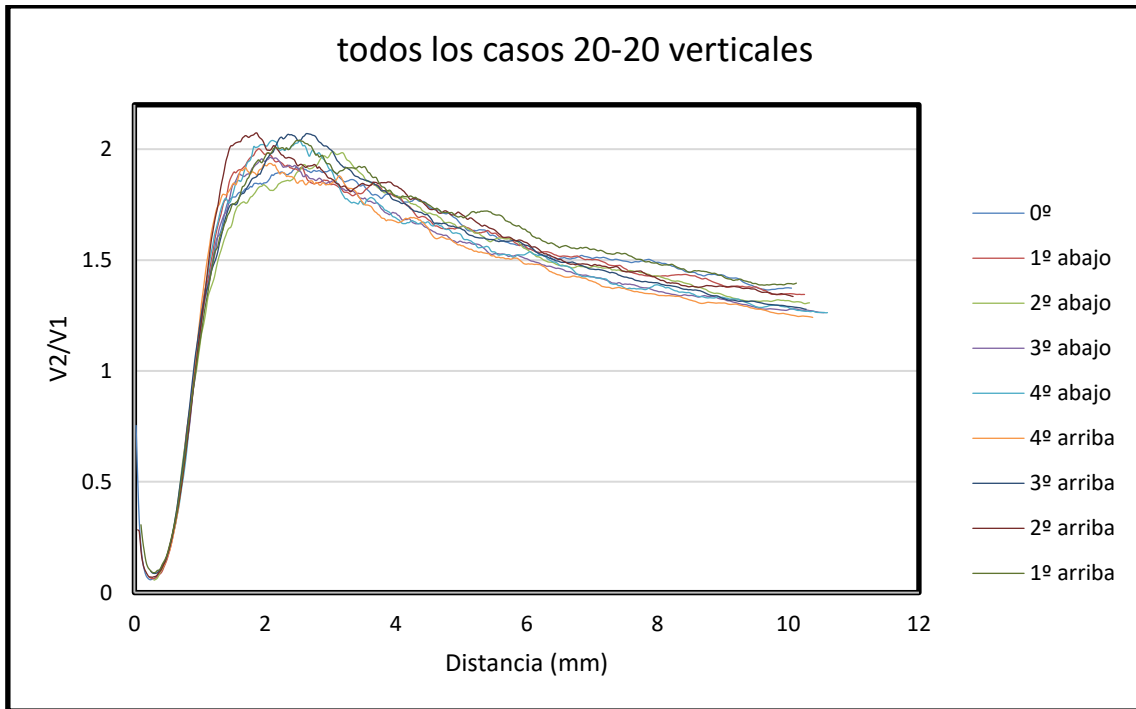


Ilustración 94: Calibración para desplazamiento vertical

V2/V1	-4º	-3º	-2º	-1º	0º	1º	2º	3º	4º	Variación máxima (mm)
0.3	0.625	0.625	0.605	0.62	0.61	0.61	0.61	0.615	0.625	0.02
0.5	0.735	0.725	0.705	0.71	0.71	0.715	0.73	0.705	0.73	0.03
0.7	0.82	0.815	0.79	0.785	0.805	0.81	0.81	0.79	0.81	0.035
0.9	0.89	0.89	0.89	0.875	0.895	0.89	0.89	0.87	0.885	0.02
1.1	0.97	0.98	1	0.96	0.98	0.985	0.975	0.95	0.96	0.05

Tabla 75: Calibración para desplazamiento vertical

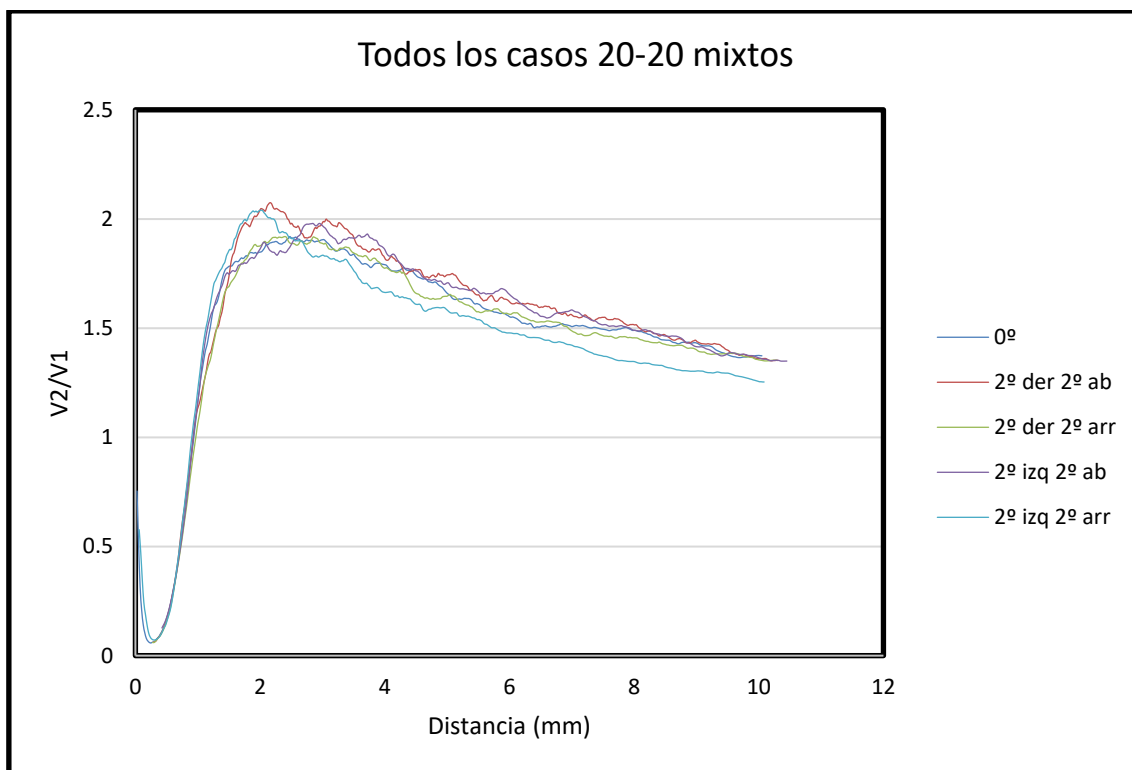


Ilustración 95: Calibración para desplazamiento mixto

V2/V1	2 izq 2 arr	2 izq 2 ab	2 der 2 arr	2 der 2 ab	0°	Variación máxima (mm)
0.3	0.62	0.61	0.59	0.61	0.61	0.03
0.5	0.71	0.725	0.71	0.71	0.71	0.015
0.7	0.795	0.815	0.81	0.795	0.805	0.02
0.9	0.87	0.89	0.89	0.89	0.895	0.025
1.1	0.955	0.975	1	0.98	0.98	0.045

Tabla 76: Calibración para desplazamiento mixto

De igual forma que en el caso anterior, a continuación se muestra la tabla de distancias máximas:

V2/V1	Variación máxima (mm)
0.3	0.05
0.5	0.045
0.7	0.035
0.9	0.03
1.1	0.06

Tabla 77: Tabla de distancias máximas

En este caso las distancias también son muy pequeñas, de modo que se puede concluir que para el uso del bundle trifurcado el cabeceo no influye en el proceso de medición.

Para cuatrifurcado, 10-30, láser 1, álabe

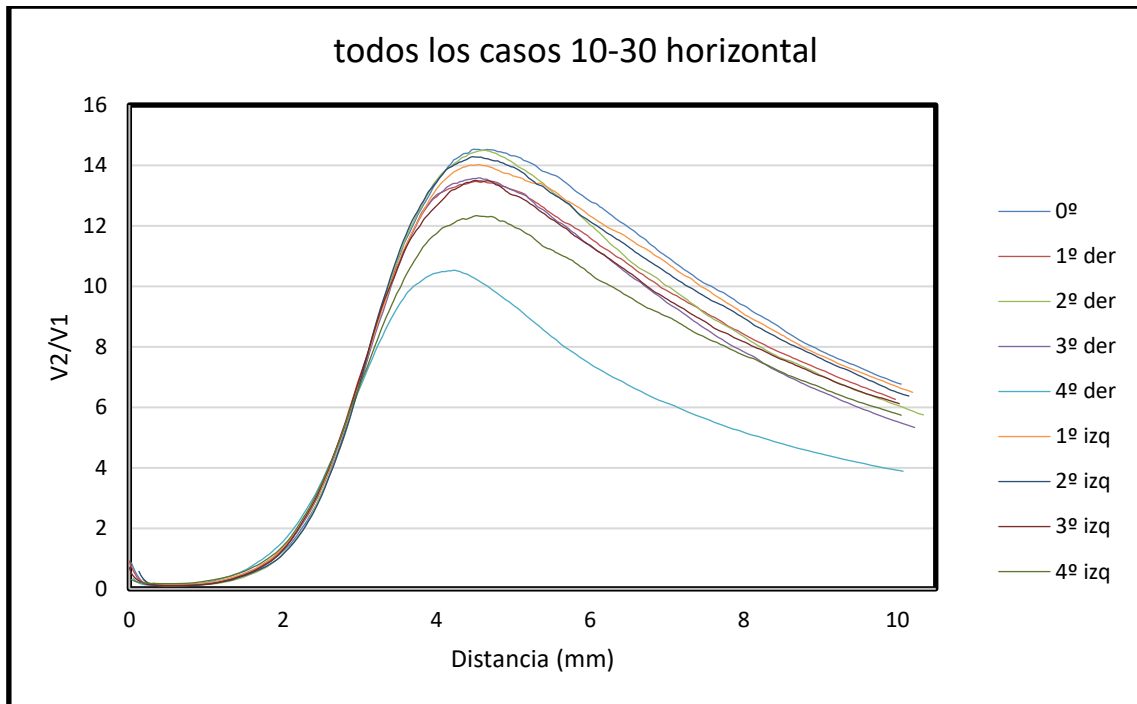


Ilustración 96: Calibración para desplazamiento horizontal

V2/V1	-4°	-3°	-2°	-1°	0°	1°	2°	3°	4°	Variación máxima (mm)
4	2.585	2.62	2.65	2.605	2.645	2.615	2.65	2.6	2.595	0.065
6	2.895	2.895	2.915	2.875	2.895	2.89	2.91	2.88	2.885	0.04
8	3.23	3.15	3.145	3.13	3.13	3.14	3.13	3.13	3.195	0.1
10	3.7	3.41	3.37	3.38	3.37	3.395	3.365	3.395	3.535	0.335
12	-	3.725	3.67	3.73	3.695	3.725	3.65	3.795	4.135	0.485

Tabla 78: Calibración para desplazamiento horizontal

Se puede ver que en el rango que va desde -3° a 3° las distancias se mantienen en márgenes razonables, pero que en los casos de los extremos (4° y -4°), las distancias aumentan mucho respecto de los demás casos.

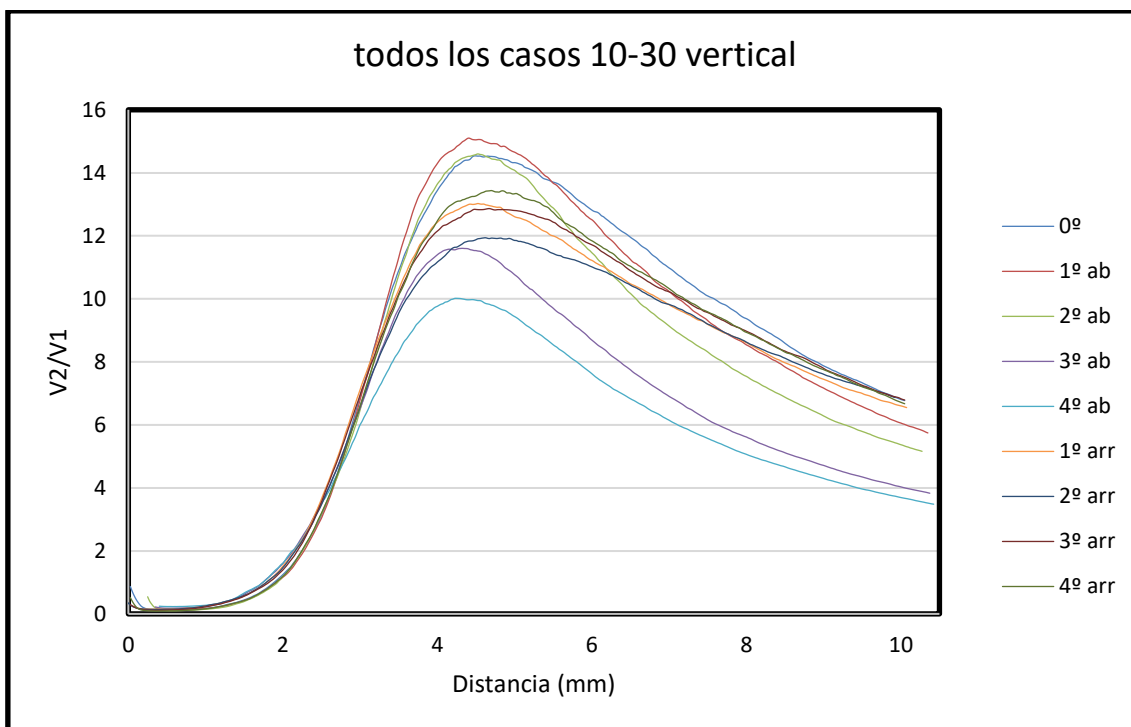


Ilustración 97: Calibración para desplazamiento vertical

V2/V1	-4°	-3°	-2°	-1°	0°	1°	2°	3°	4°	Variación máxima (mm)
4	2.62	2.595	2.645	2.655	2.645	2.56	2.595	2.57	2.64	0.095
6	3	2.92	2.945	2.915	2.895	2.85	2.915	2.87	2.92	0.15
8	3.42	3.22	3.17	3.14	3.13	3.13	3.22	3.155	3.18	0.29
10	4.205	3.57	3.41	3.35	3.37	3.45	3.6	3.47	3.48	0.855
12	-	-	3.67	3.585	3.695	3.86	-	3.935	3.875	0.35

Tabla 79: Calibración para desplazamiento vertical

Para el desplazamiento vertical las distancias que se obtienen son muy grandes, especialmente al acercarse al límite superior de la región I. En concreto, cuando se desplaza hacia abajo el álabe, la pendiente baja progresivamente a medida que los grados aumentan (por este motivo hay valores para los que no hay distancias disponibles), mientras que si el álabe se desplaza hacia arriba las curvas de calibración se mantienen estables (a excepción de los 2° hacia arriba que da valores un poco más bajos que el resto). Una posible explicación para ello es que la luz recogida por el fotodetector conectado al anillo externo no consigue captar toda la luz proveniente de todas las fibras, solo de una parte de ellas. Podría ser que las fibras de las que está recogiendo la luz fuesen las situadas en la parte de arriba del anillo, y que por eso al desplazar hacia abajo el álabe se vaya perdiendo señal recogida. Esto es únicamente una hipótesis, ya que para comprobarlo se debería abrir el bundle para ver dónde se sitúa cada fibra en el extremo de anillo y en el extremo conectado al

fotodetector, y esa opción está completamente descartada.

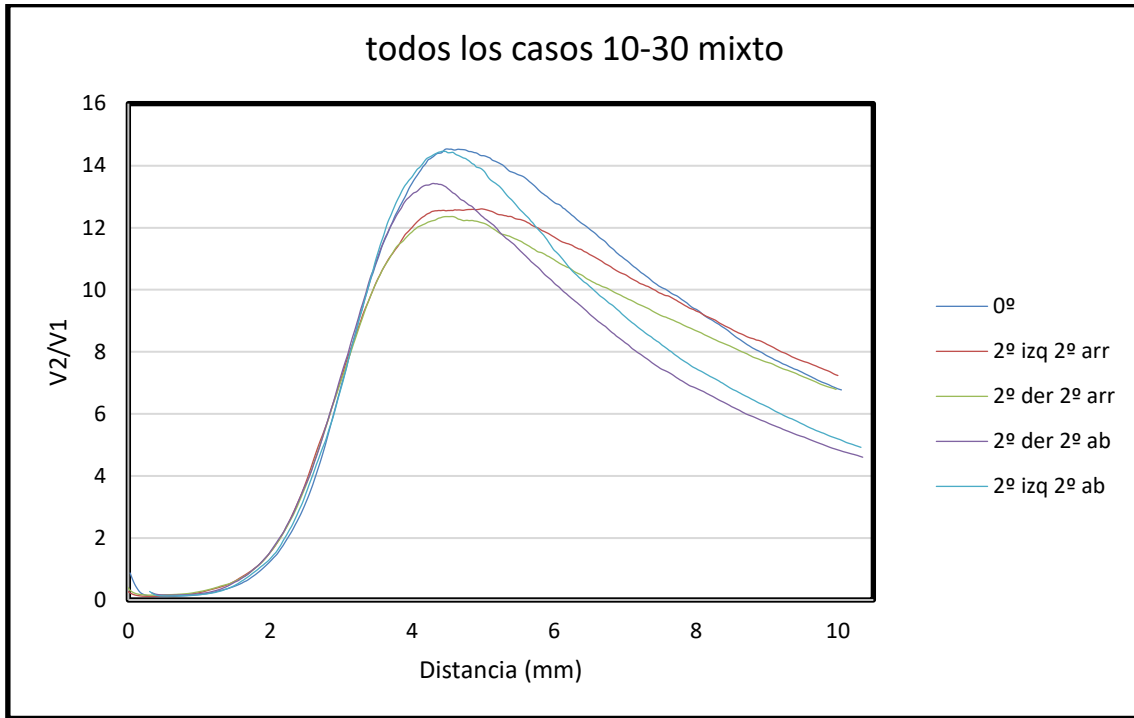


Ilustración 98: Calibración para desplazamiento mixto

V2/V1	2 izq 2 arr	2 izq 2 ab	2 der 2 arr	2 der 2 ab	0º	Variación máxima (mm)
4	2.535	2.595	2.555	2.555	2.645	0.11
6	2.85	2.9	2.835	2.83	2.895	0.07
8	3.12	3.13	3.13	3.125	3.13	0.005
10	3.45	3.37	3.45	3.365	3.37	0.085
12	3.995	3.635	4.07	3.69	3.695	0.435

Tabla 80: Calibración para desplazamiento mixto

Los casos de desplazamiento mixto se ven afectados por el desplazamiento vertical que poseen, de forma que la diferencia en distancias de estos casos es muy elevada.

V2/V1	Variación máxima (mm)
4	0.12
6	0.17
8	0.3
10	0.855
12	0.55

Tabla 81: Tabla de distancias máximas

En este caso se puede ver que las distancias provocadas por el cabeceo son muy grandes salvo para los casos horizontales en un rango de 3° a -3°.

Para cuatrifurcado, 20-20, láser 1, álabe

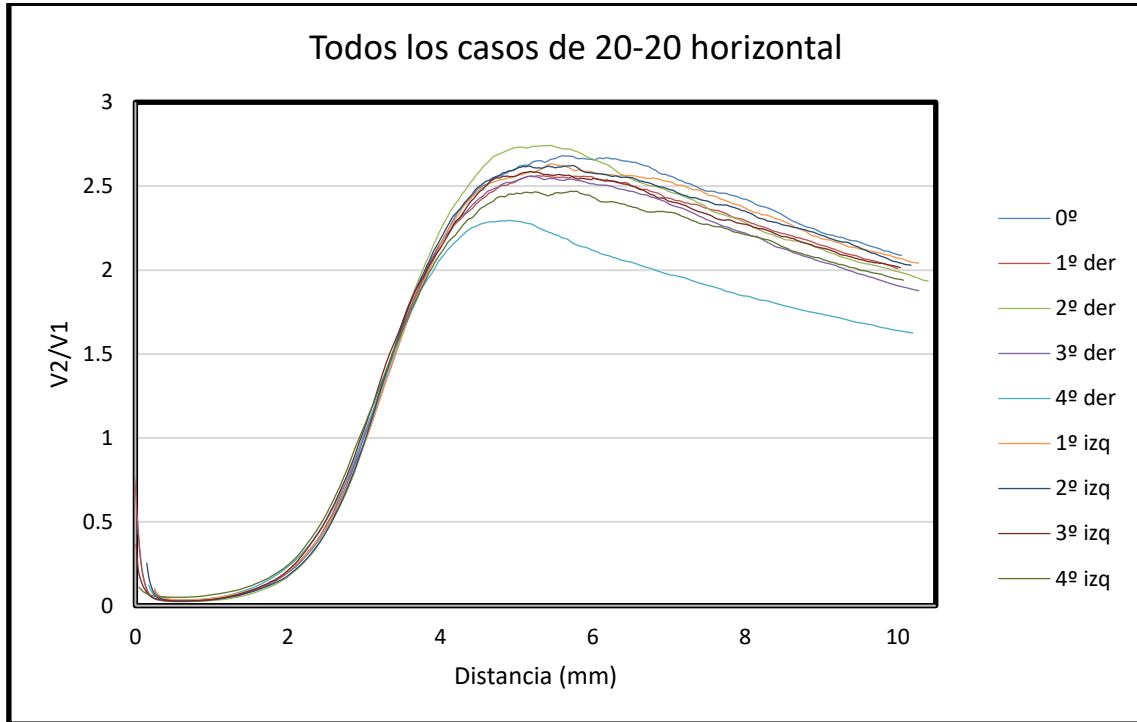


Ilustración 99: Calibración para desplazamiento horizontal

V2/V1	-4°	-3°	-2°	-1°	0°	1°	2°	3°	4°	Variación máxima (mm)
0.6	2.62	2.665	2.7	2.64	2.665	2.675	2.685	2.61	2.57	0.13
1	2.98	3.03	3.04	2.995	3	3.03	3.025	2.96	2.935	0.095
1.4	3.315	3.335	3.31	3.295	3.3	3.33	3.295	3.26	3.285	0.075
1.8	3.67	3.66	3.6	3.63	3.635	3.655	3.61	3.59	3.66	0.08
2.2	4.275	4.075	3.97	4.07	4.06	4.06	4.025	4.09	4.17	0.305

Tabla 82: Calibración para desplazamiento horizontal

Al igual que pasaba en el caso anterior, salvo para los casos de 4° y -4°, las diferencias son pequeñas, de modo que son los extremos los que más afectados se ven por el cabeceo.

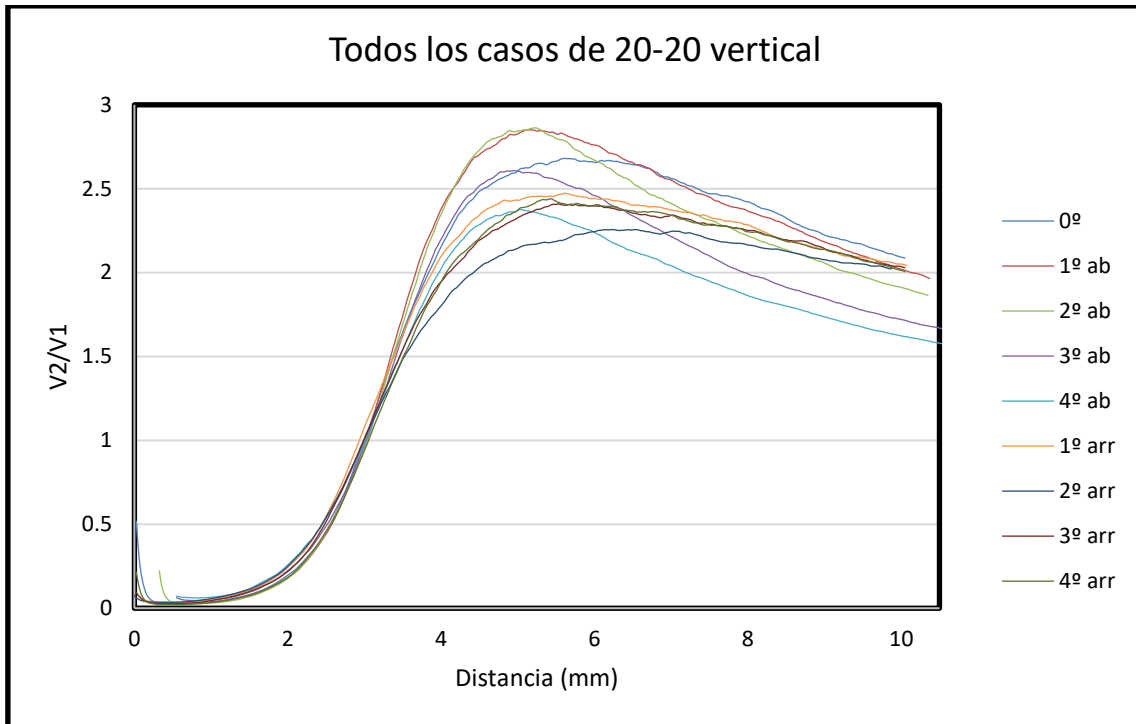


Ilustración 100: Calibración para desplazamiento vertical

V2/V1	-4°	-3°	-2°	-1°	0°	1°	2°	3°	4°	Variación máxima (mm)
0.6	2.575	2.635	2.67	2.68	2.665	2.56	2.57	2.595	2.68	0.12
1	3.015	3.025	3.035	3.015	3	2.93	3	2.99	3.055	0.125
1.4	3.37	3.34	3.315	3.285	3.3	3.285	3.41	3.365	3.42	0.135
1.8	3.745	3.635	3.57	3.535	3.635	3.655	4	3.795	3.815	0.43
2.2	4.295	4	3.865	3.83	4.06	4.195	5.635	4.525	4.5	1.635

Tabla 83: Calibración para desplazamiento vertical

En el caso de los desplazamientos verticales pasa lo mismo que en el caso anterior, es decir, que se ve muy afectado por el cabeceo, especialmente al desplazar el álabe hacia abajo.

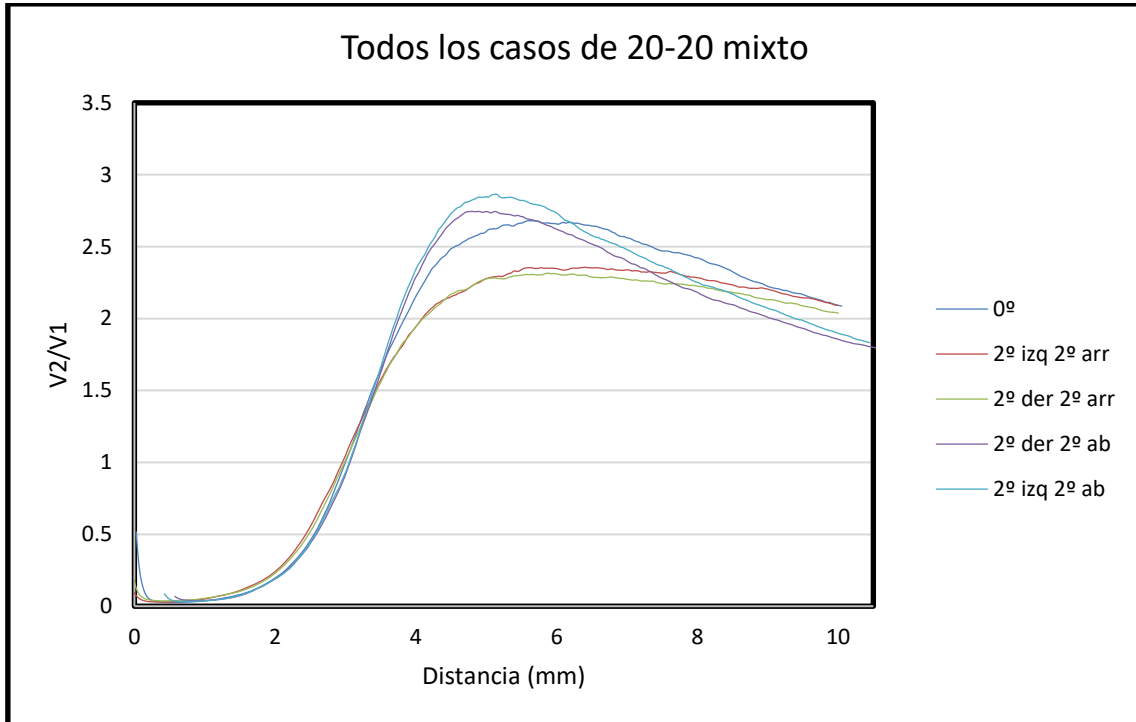


Ilustración 101: Calibración para desplazamiento mixto

V2/V1	2 izq 2 arr	2 izq 2 ab	2 der 2 arr	2 der 2 ab	0°	Variación máxima (mm)
0.6	2.55	2.68	2.595	2.705	2.665	0.155
1	2.96	3.065	2.985	3.065	3	0.105
1.4	3.32	3.33	3.355	3.345	3.3	0.055
1.8	3.795	3.59	3.775	3.62	3.635	0.205
2.2	4.72	3.875	4.7	3.925	4.06	0.845

Tabla 84: Calibración para desplazamiento mixto

Los desplazamientos mixtos se ven afectados por el desplazamiento vertical que poseen. Si se atiende a las distancias máximas se tiene la siguiente tabla:

V2/V1	Variación máxima (mm)
0.6	0.155
1	0.135
1.4	0.16
1.8	0.465
2.2	1.805

Tabla 85: Tabla de distancias máximas

Se puede concluir que el cabeceo afecta demasiado a los casos verticales, mixtos y los horizontales de 4° y -4°, pero que para los casos horizontales que van de 3° a -3°

los efectos del cabeceo son mínimos.

Para cuatrifurcado, 0-4, láser 1, álabe

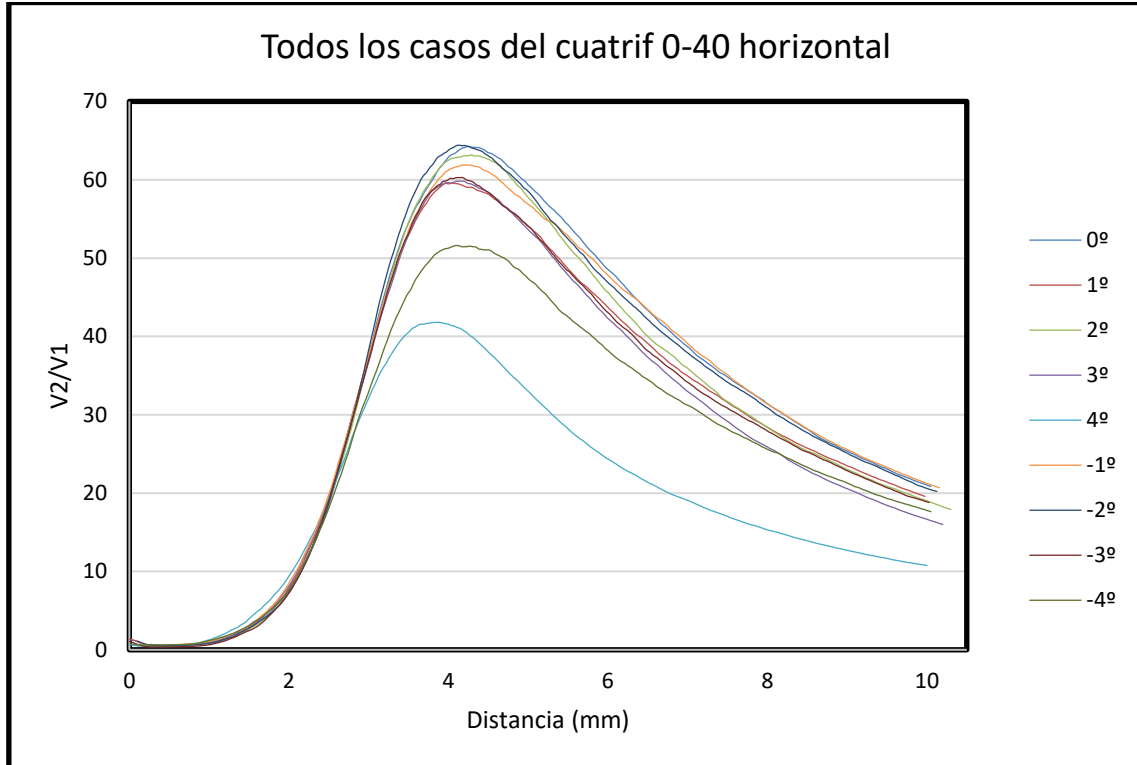


Ilustración 102: Calibración para desplazamiento horizontal

V2/V1	-4°	-3°	-2°	-1°	0°	1°	2°	3°	4°	Variación máxima (mm)
20	2.53	2.52	2.54	2.525	2.54	2.51	2.535	2.53	2.57	0.06
30	2.915	2.795	2.83	2.805	2.815	2.8	2.815	2.815	2.89	0.12
40	3.445	3.085	3.07	3.08	3.065	3.07	3.04	3.08	3.3	0.405
50	-	3.385	3.35	3.37	3.34	3.37	3.29	3.37	3.835	0.545

Tabla 86: Calibración para desplazamiento horizontal

De nuevo se repite el patrón, ya que todos los casos son similares menos los casos de 4° y -4°.

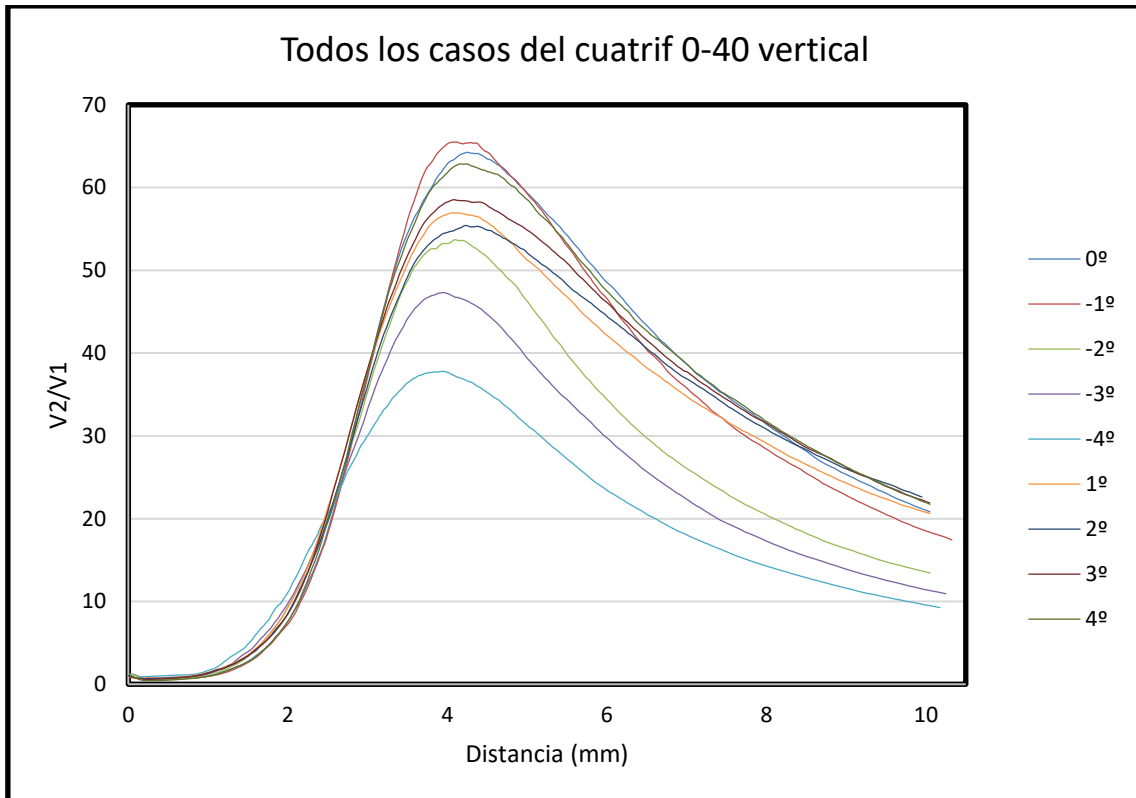


Ilustración 103: Calibración para desplazamiento vertical

V2/V1	-4°	-3°	-2°	-1°	0°	1°	2°	3°	4°	Variación máxima (mm)
20	2.465	2.515	2.49	2.56	2.54	2.46	2.51	2.47	2.515	0.1
30	2.995	2.885	2.84	2.825	2.815	2.765	2.82	2.765	2.795	0.23
40	-	3.28	3.155	3.08	3.065	3.065	3.12	3.065	3.065	0.215
50	-	-	3.565	3.3	3.34	3.465	3.54	3.42	3.36	0.265

Tabla 87: Calibración para desplazamiento vertical

De nuevo se puede ver lo visto en los casos anteriores, es decir, que para los casos en los que hay desplazamiento del álabe hacia arriba los valores son parejos, pero que las diferencias aumentan al desplazarlo hacia abajo.

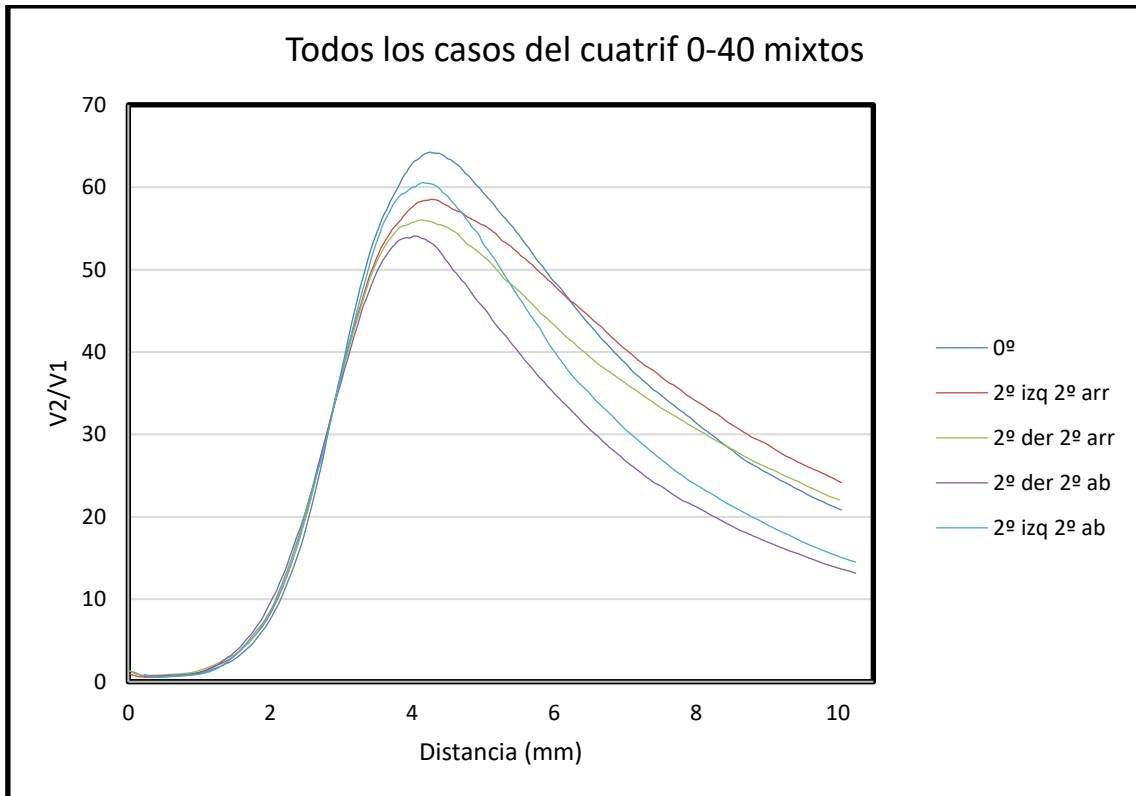


Ilustración 104: Calibración para desplazamiento mixto

V2/V1	2 izq 2 arr	2 izq 2 ab	2 der 2 arr	2 der 2 ab	0°	Variación máxima (mm)
20	2.5	2.48	2.51	2.48	2.54	0.06
30	2.79	2.815	2.795	2.79	2.815	0.025
40	3.09	3.07	3.095	3.115	3.065	0.05
50	3.44	3.385	3.46	3.515	3.34	0.175

Tabla 88: Calibración para desplazamiento mixto

Las diferencias son elevadas debido al desplazamiento vertical que poseen. A continuación se muestran las diferencias máximas:

V2/V1	Variación máxima (mm)
20	0.11
30	0.23
40	0.405
50	0.535

Tabla 89: Tabla de distancias máximas

De nuevo se puede extraer la misma conclusión que en los casos anteriores: con el bundle cuatrifurcado los desplazamientos verticales, mixtos y los extremos de los

horizontales (4° y -4°) se ven muy afectados, mientras que los horizontales que van del rango 3° a -3° no se ven apenas afectados.

Como conclusión general se puede decir lo siguiente:

- Para el bundle trifurcado el cabeceo no afecta demasiado a las mediciones tal y como se ha demostrado en las gráficas y tablas, donde los valores para el rango estudiado (8° en horizontal y otros 8° en vertical) han tenido diferencias muy pequeñas.
- Para el bundle cuatrifurcado el cabeceo tiene mayor impacto. Los casos del estudio vertical y mixto se ven especialmente afectados con cualquier movimiento en esa dirección, mientras que los casos del estudio horizontal han demostrado que para el rango que va desde los -3° a los 3° las mediciones son bastante estables, pero no así para los casos 4° y -4° .

7.4. Estudio de la sensibilidad

En esta fase se llevarán a cabo distintos procesados para ver cuál de ellos permite un mejor método de representación [50-51]. Para ello el proceso que se ha llevado a cabo ha consistido en tomar los datos de V1 y V2 que se han recogido de una medición en concreto, y combinarlos de forma que se pueda obtener la mejor representación posible según las necesidades que se tengan. En concreto, mediante este estudio se va a buscar aquellas representaciones que resulten en una mayor región lineal I y aquellas que resulten dar una mayor pendiente en esa misma región.

Para poder llevar a cabo este estudio se han tomado las medidas de un caso cualquiera que ya se haya estudiado en puntos anteriores, ya que los resultados son extrapolables a todos los casos expuestos en este documento. En concreto se ha tomado el caso que ha hecho uso del bundle trifurcado, láser 1, configuración de ganancias 10-30 y álabe como objetivo. El motivo de esta elección es porque ha resultado ser uno de los casos más estables y de los que mayor coincidencia ha tenido entre datos experimentales y simulación. Los resultados han sido los siguientes:

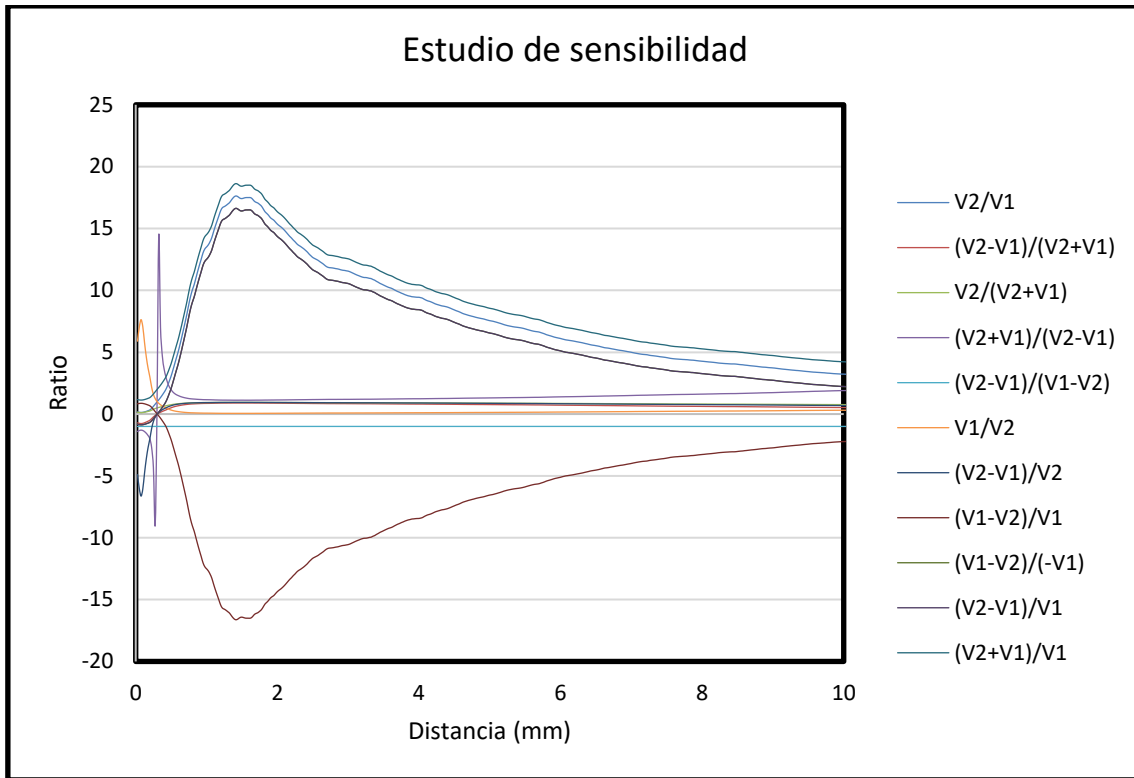


Ilustración 105: Estudio de la sensibilidad

Los resultados del análisis de sensibilidad muestran que la mejor representación para llevar a cabo las mediciones sigue siendo $V2/V1$, ya que ofrece una región lineal lo suficientemente amplia como para poder medir el TC, y además posee una pendiente lo suficientemente grande como para poder usarse.

Uno de los objetivos consistía en encontrar una combinación de $V2$ y $V1$ que ofreciese una mayor región lineal. En este aspecto, la combinación $(V2+V1)/(V2-V1)$ ofrece una región lineal creciente que abarca los 10 mm que se han medido, pero tiene la contraprestación de que su pendiente es tan pequeña que debería utilizarse hardware de gran resolución para la medición, ya que la mera inclusión de ruido en la señal haría que la distancia variase muchísimo.

Por otro lado, se buscaba una combinación que ofreciese la mayor pendiente posible en esa región. En este punto se han logrado varias combinaciones que han ofrecido la misma pendiente que $V2/V1$, pero con expresiones más complejas y que lo único que aportaban era la inclusión de un offset (de valor $V1$) respecto a las demás curvas de calibración. Por tanto, de nuevo la relación $V2/V1$ ha resultado ser la que mejor compromiso logra entre pendiente y longitud de región lineal.

Como conclusión de este apartado, se puede decir que la relación $V2/V1$ es la mejor combinación posible para representar la medición de TC según el método propuesto, ya que ofrece la región lineal más larga y de mayor pendiente posible.

8. ASPECTOS ECONÓMICOS

En este punto se expone toda la información referente al aspecto económico de los materiales que se han utilizado para llevar a cabo este proyecto, así como del coste de personal que se ha tenido.

8.1. Coste unitario

A continuación se detalla el coste unitario que tiene cada uno de los factores utilizados por separado.

8.1.1. Recursos humanos

En este apartado se mostrará una tabla en la que aparece la relación integrante del proyecto-coste unitario de mano de obra por hora. El coste de los salarios está extraído de las Disposiciones Generales del Departamento de Industria, Innovación, Comercio y Turismo. Para desarrollar este proyecto se ha estimado que el director de proyecto ha dedicado 3 horas diarias al mismo, y el desarrollador del proyecto 6 horas diarias.

Nombre	Cargo	Precio unitario (euros/hora)	Horas/día	Precio unitario (euros/día)
Joseba Zubia Zaballa	Director de proyecto (ingeniero sénior)	34.7	3	104.1
Josu Amorebieta Herrero	Desarrollador del proyecto (ingeniero junior)	9.24	6	55.44

Tabla 90: Coste unitario de personal involucrado en el proyecto

8.1.2. Recursos materiales

A continuación se muestra una lista de los recursos materiales empleados en la elaboración del proyecto con el coste de cada uno de ellos. Los recursos materiales que se han utilizado se han dividido en dos familias principales: amortizables y fungibles.

En primer lugar los recursos materiales amortizables:

Elemento	Precio de compra (en euros)	Amortización en semanas	Coste unitario (euros/semana)
Ordenador para medidas	650	96	6.77



Ordenador Sony Vaio	1195	96	12.44
Labview (paquete base)	995	52	19.13
Matlab 2015A (licencia estudiante)	35	52	0.67
Microsoft Office 2013	65.34	52	1.25
Windows 10 Professional	43.56	156	0.28
Windows XP Professional	10	156	0.06
Cámara climática CTS C-70/200 (segunda mano)	6000	260	23.07
Multímetro Agilent 34410A (2 unidades)	3129.06	156	20.05
Generador de funciones Keysight 33210A	1430.22	156	9.16
Bundle trifurcado	600	156	3.84
Bundle cuatrifurcado	800	156	5.13
Láser HSML-0660-20-FC	1600	156	10.25
Láser IQ1C30(643-80)F2/547	2800	156	17.95
Aislador óptico O-F-660FC	401.4	104	3.86
Motor LTS 150	2349	156	15.05

Postes y soportes (4 unidades)	93.6	208	0.45
Plataforma de montaje Thorlabs	597.6	208	2.87
Fotodetector PDA100A-EC (2 unidades)	622.8	156	3.99
Gafas de seguridad Honeywell	29.07	208	0.14
Accesorio APY001/M	227.7	156	1.46
Adaptador AP4M3M (4 unidades)	6.84	208	0.03
Adaptador AS4M6M (4 unidades)	14.76	208	0.07
Reflector DG10 (3 unidades)	119.34	208	0.57
Soporte para lente LMR1/M	13.71	208	0.06

Tabla 91: Coste unitario del material amortizable

En cuanto a los materiales fungibles, se incluyen todos aquellos bienes y recursos que no van a poder ser reutilizados tras realizar el proyecto. En este grupo se encuentran elementos como folios, tóner, post-it... El coste de este tipo de bienes se ha estimado en 40 euros, cantidad que se incluirá en el presupuesto del proyecto.

8.1.3. Otros gastos

En este punto se incluyen otros costes del proyecto que no se pueden incluir en ningún otro lugar, como es el coste de los viajes a las instalaciones de medición comentadas a lo largo de este documento, etc.

Para este fin se han destinado 70 euros que habrá que contabilizar en el presupuesto final.

8.2. Cálculo del presupuesto

Una vez se tiene el coste unitario de cada uno de los elementos que participan en el proyecto, se puede calcular el coste que supone cada uno a lo largo del proyecto.

8.2.1. Recursos humanos

La parte del presupuesto destinada a los recursos humanos se detalla en la siguiente tabla:

Fase	Desarrollador del proyecto (ingeniero junior)		Director de proyecto (ingeniero sénior)		Coste total
	Días empleados	Coste total	Días empleados	Coste total	
Fase 1	25	1386	4	416.4	1802.4
Fase 2	42	2328.48	15	1561.5	3889.98
Fase 3	21	1164.24	6	624.6	1788.84
Fase 4	6	332.64	3	312.3	644.94
Fase 5	12	665.28	3	312.3	977.58
Coste de recursos humanos a fin de proyecto					9103.74

Tabla 92: Coste de personal por fase y coste total de personal

8.2.2. Recursos materiales

De manera análoga a como se ha hecho para los recursos humanos, se procede a calcular el coste de los recursos materiales amortizables del proyecto, indicando el presupuesto necesario por cada material empleado en el proyecto y el coste total.

Elemento	Semanas utilizada	Coste unitario (euros/semana)	Coste total
Ordenador para medidas	15	6.77	101.55
Ordenador Sony Vaio	28	12.44	348.32
Labview (paquete base)	15	19.13	286.95
Matlab 2015A (licencia estudiante)	18	0.67	12.06
Microsoft Office 2013	28	1.25	35
Windows 10 Professional	28	0.28	7.84
Windows XP Professional	15	0.06	0.9



Cámara climática CTS C-70/200 (segunda mano)	6	23.07	138.42
Multímetro Agilent 34410A (2 unidades)	15	20.05	300.75
Generador de funciones Keysight 33210A	15	9.16	137.4
Bundle trifurcado	10	3.84	38.4
Bundle cuatrifurcado	8	5.13	41.04
Láser HSML-0660-20-FC	8	10.25	82
Láser IQ1C30(643-80)F2/547	8	17.95	143.6
Aislador óptico O-F-660FC	15	3.86	57.9
Motor LTS 150	15	15.05	225.75
Postes y soportes (4 unidades)	15	0.45	6.75
Plataforma de montaje Thorlabs	6	2.87	17.22
Fotodetector PDA100A-EC (2 unidades)	15	3.99	59.85
Gafas de seguridad Honeywell	8	0.14	1.12
Accesorio APY001/M	4	1.46	5.84
Adaptador AP4M3M (4 unidades)	4	0.03	0.12

Adaptador AS4M6M (4 unidades)	4	0.07	0.28
Reflector DG10 (3 unidades)	4	0.57	2.28
Soporte para lente LMR1/M	4	0.06	0.24
Coste total en recursos materiales amortizables			2051.58

Tabla 93: Coste de material según su tiempo de uso

Para calcular el coste total de los recursos materiales, al coste de los materiales amortizables que se indican en la tabla superior hay que sumarles el coste de los materiales fungibles que se han utilizado. En el punto 8.1.2. se ha estimado que el coste de material fungible es de 40 euros. En la siguiente tabla contabilizamos ambos:

Concepto	Coste (en euros)
Material amortizable	2051.58
Material fungible	40
Coste total de recursos materiales	2091.58

Tabla 94: Coste total de materiales

8.2.3. Otros gastos

En el apartado 8.1.3. se ha especificado que el presupuesto para este tipo de gastos se ha estimado en 70 euros para todo el proyecto.

8.3. Presupuesto o resumen económico

Una vez vistos en los apartados anteriores los costes de los factores, en la siguiente tabla se va a presentar un resumen económico del proyecto:

Concepto	Importe (en euros)
Recursos humanos	9103.74
Recursos materiales	2051.58
Otros gastos	70
Total de recursos (subtotal)	11225.32
Fondos de contingencia (2%)	224.50
Presupuesto final	11449.82

Tabla 95: Presupuesto final del proyecto

Una vez realizado el cálculo del presupuesto final, se llega a la conclusión de que para la realización del proyecto "Modelado teórico y experimental de sensores ópticos para

la medida de Tip Clearance en turbinas” el presupuesto necesario es de once mil cuatrocientos cuarenta y nueve euros con ochenta y dos céntimos (11449.82 euros).

Hay que subrayar el hecho de que se han añadido aspectos como los fondos de contingencia, que servirían para cubrir alguna eventualidad como ordenadores averiados, etc y cuyo efecto en el proyecto ha quedado definido y cuantificado en el apartado de análisis de riesgos. En cuanto a la base imponible, se ha hecho uso del mínimo posible.

9. CONCLUSIONES

En este apartado se van a resumir las principales conclusiones del trabajo llevado a cabo y que se han ido comentando a lo largo de los apartados tratados. Son las siguientes:

- En el estudio térmico que se ha llevado a cabo en las instalaciones de Leioa ha quedado claro que la región lineal I es prácticamente independiente de la T^a , ya que la diferencia de la distancia medida ha sido muy pequeña. No sucede lo mismo con la región II, que ha mostrado ser sensible a variaciones térmicas.
- En la mencionada región I el láser 1 ha resultado ser mucho más estable que el láser 2 en lo que a variación térmica se refiere.
- En el mismo estudio de Leioa se ha podido comprobar que el bundle trifurcado ha ofrecido un comportamiento más estable frente a las temperaturas que el bundle cuatrifurcado, ya que las tablas de diferencia de distancias así lo muestran.
- El programa de simulación que se ha realizado se ajusta con precisión a los resultados experimentales a tenor de lo mostrado en las tablas de distancias. En concreto, se ajusta más a los casos realizados con el bundle trifurcado que a los realizados con el cuatrifurcado.
- El análisis de la rugosidad del objetivo a iluminar ha demostrado que el sistema de medición utilizado es independiente de este factor.
- El estudio del cabeceo en el que se han realizado medidas en los ejes vertical, horizontal y mixto, ha mostrado que el bundle trifurcado es más estable frente a este efecto. De hecho, los resultados de pendientes y distancias son muy parecidos en todos esos casos con el trifurcado independientemente de la configuración de ganancia.
- En el caso del cabeceo con el bundle cuatrifurcado, hay más diferencias. Para el rango horizontal se mantienen estables las medidas en un rango que va desde los -3° a los 3° , pero a partir de ahí las distancias aumentan considerablemente. En cuanto al desplazamiento vertical, es aún más sensible, ya que si bien es cierto que si desplazamos hacia arriba el álabe las medidas se mantienen estables, cuando se desplaza hacia abajo las distancias aumentan considerablemente. Esto hace que con este bundle el desplazamiento vertical afecte mucho al resultado de las mediciones.
- En lo referente al análisis de la sensibilidad, la mejor combinación de valores $V2$ y $V1$ ha resultado ser $V2/V1$, ya que es la única que ofrece una región lineal lo suficientemente amplia como para realizar mediciones de TC y además con una pendiente lo suficientemente grande que nos permita medir con gran resolución.
- El caso en el que menores diferencias se han registrado ha sido el caso del trifurcado con el láser 1 con ganancia 10-30, aunque también hay que destacar que con ganancia 20-20 se obtienen buenos resultados. Para ambos casos el programa de simulación ha dado curvas de calibración muy similares a las experimentales, quedando validado de ese modo el programa realizado.

Por último, es importante destacar que los datos obtenidos mediante este proyecto serán publicados en futuras fechas, ya que formarán parte de un artículo que se está redactando actualmente.

10. REFERENCIAS

- [1] Ye, D.C.; Duan, F.J.; Guo, H.T.; Li, Y.; Wang, K. Turbine blade tip clearance measurement using a skewed dual-beam fiber optic sensor. *Opt. Eng.* 2012, doi:10.1117/1.OE.51.8.081514.
- [2] D. C. Wisler, "Loss reduction in axial-flow compressors through low-speed model testing," *Journal of engineering for gas turbines and power*, vol. 107, no. 2, pp. 354–363, 1985.
- [3] Georgiev, V.; Holík, M.; Kraus, V.; Krutina, A.; Kubín, Z.; Liška, J.; Poupa, M. The Blade Flutter Measurement Based on the Blade Tip Timing Method. *Proceedings of the 15th WSEAS International Conference on Systems, Corfu Island, Greece, 14–16 July 2011*; pp. 270–275.
- [4] Wiseman, M.W.; Guo, T.-H. An Investigation of Life Extending Control Techniques for Gas Turbine Engines. *Proceedings of the American Control Conference, Arlington, VA, USA, 25–27 June 2001*; pp. 3706–3707.
- [5] Ye, D.C.; Duan, F.J.; Guo, H.T.; Li, Y.; Wang, K. Turbine blade tip clearance measurement using a skewed dual-beam fiber optic sensor. *Opt. Eng.* 2012.
- [6] Wiseman, M.W.; Guo, T.-H. An Investigation of Life Extending Control Techniques for Gas Turbine Engines. In *Proceedings of the American Control Conference, Arlington, VA, USA, 25–27 June 2001*; pp. 3706–3707.
- [7] Lattime, S.B., and Steinetz, B. M., "Turbine Engine Clearance Control Systems: Current Practices and Future Directions," NASA TM 2002-211794, AIAA2002-3790, 2002.
- [8] Sheard A.G., A Blade-by-Blade Tip Clearance Measurement System for Gas Turbine Applications, Researchgate, 1995.
- [9] Flotow, A., Mercadal, M. & Tappert, P. (2000). Health monitoring and prognostics of blades and disks with blade tip sensors. *Aerospace Conference Proceedings, IEEE, Mar 18-25, Big Sky, MT, USA.*
- [10] I. García, J. Beloki, J. Zubia, G. Aldabaldetrekú, M. A. Illarramendi and F. Jiménez, An Optical Fiber Bundle Sensor for Tip Clearance and Tip Timing Measurements in a Turbine Rig, *Sensors* 2013, 13, 7385-7398.
- [11] L. Geisheimer, A. Holst, Metrology considerations for calibrating turbine tip clearance sensors, XIX Biannual Symposium on Measuring Techniques in Turbomachinery Transonic and Supersonic Flow in Cascades and Turbomachines.
- [12] Meggit Sensing Systems, Blade Tip Clearance Sensors for Engine Health Monitoring, 2014.
- [13] "Non-Intrusive Stress Measurement System (NSMS) Sensors with Standoff Capability," SBIR Phase 1 and 2, Topic N06-022, Contract No. N68335, Naval Air

Warfare Center, Patuxent River, MD.

[14] Geisheimer J. L., Metrology considerations for calibrating turbine tip clearance sensors, XIX Biannual Symposium on Measuring Techniques in Turbomachinery Transonic and Supersonic Flow in Cascades and Turbomachines.

[15] Zielinski, M.; Ziller, G. Noncontact vibration measurements on compressor rotor blades. *Meas. Sci. Technol.* 2000, 11, 847–859.

[16] A. von Flotow, M. Mercadal, P. Tappert, Health monitoring and prognostics of blades and disks with blade tip sensors, *Aerospace Conference Proceedings, 2000 IEEE 433 - 440 vol.6.*

[17] Lawson C.P., Tubomachinery blade vibration amplitude measurement through tip timing with capacitance tip clearance probes, *Sensors and Actuators A: Physical* Volume 118, Issue 1, 31 January 2005, Pages 14–24.

[18] DUAN Fa-jie, FANG Zhi-qiang, SUN Yu-yang, YE Sheng-hua, Real-time vibration measurement based on tip-timing for rotating blades, *Optoelectronic engineering, 2005-03.*

[19] Zielinski, M.; Ziller, G. Optical Blade Vibration Measurement at MTU. In *Proceedings of the AGARD conference, Brussels, Belgium, 20–24 October 1998.*

[20] Cardwell D.N., The Use of Eddy Current Sensors for the Measurement of Rotor Blade Tip Timing: Sensor Development and Engine Testing, *ASME Turbo Expo 2008: Power for Land, Sea, and Air, Volume 2: Controls, Diagnostics and Instrumentation; Cycle Innovations; Electric Power Berlin, Germany, June 9–13, 2008.*

[21] Chana K.S., The Use of Eddy Current Sensor Based Blade Tip Timing for FOD Detection, *ASME Turbo Expo 2008: Power for Land, Sea, and Air Volume 2: Controls, Diagnostics and Instrumentation; Cycle Innovations; Electric Power Berlin, Germany, June 9–13, 2008.*

[22] Cao, S.Z.; Duan, F.J.; Zhang, Y.G. Measurement of rotating blade tip clearance with fibre-optic probe. *J. Phys. Confer. Ser.* 2006, 48, 873–877.

[23] A. von Flotow, M. Mercadal, P. Tappert, Health monitoring and prognostics of blades and disks with blade tip sensors, *Aerospace Conference Proceedings, 2000 IEEE 433 - 440 vol.6.*

[24] Geisheimer J. L., A Microwave Blade Tip Clearance Sensor for Active Clearance Control Applications.

[25] López-Higuera, J.M. *Handbook of Optical Fibre Sensing Technology*; Wiley: New York, NY, USA, 2002.

[26] Zhou, G.; Sim, L.M. Damage detection and assessment in fibre-reinforced composite structures with embedded fibre optic sensors—A review. *Smart Mater. Struct.* 2002, 11, 925–939.

[27] Güemes, A. SHM Technologies and Applications in Aircraft Structures. In *Proceedings of the 5th International Symposium on NDT in Aerospace, Singapore, 13–*

15 November 2013.

- [28] Cao S.Z., Measurement of Rotating Blade Tip Clearance with Fibre-Optic Probe, *Journal of Physics: Conference Series*, Volume 48, Volume 48, 2006.
- [29] Butner L., Fiber-optic laser Doppler turbine tip clearance probe, *Optics Letters* Vol. 31, Issue 9, pp. 1217-1219, 2006.
- [30] Cockshott, C.P., Compensation of an optical fibre reflective sensor, *Sensors and actuators*, vol. 17 167-171, 1989.
- [31] Libo Y., Analysis of the compensation mechanism of a fibre-optic displacement sensor, *Sensors and actuators*, vol. 36, 177-182, 1993.
- [32] Libo Y., Automatic-Compensated Two-Dimensional Fibre-Optic Sensor, *Optical fibre technology* vol. 4, 490-498, 1998.
- [34] R.O. Cook, C.W. Hamm, Fiber optic lever displacement transducer, *Appl. Opt.* 18 (1979) 3230–3241.
- [35] A. Shimamoto, K. Tanaka, Geometrical analysis of an optical fiber bundle displacement sensor, *Appl. Opt.* 35 (1996) 6767–6774.
- [36] Z. Zhao, W.S. Lau, A.C.K. Choi, Y.Y. Shan, Modulation functions of a reflective fiber sensor with random fiber arrangement based on a pair model, *Opt. Eng.* 34 (1995) 3055–3061.
- [37] L. Bergougnoux, J. Misguich-Ripault, J.-L. Firpo, Characterization of an optical fiber bundle sensor, *Rev. Sci. Instrum.* 69 (1998) 1985–1990.
- [38] J.B. Faria, A theoretical analysis of the bifurcated fiber bundle displacement sensor, *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 47 (1998) 742–747.
- [39] J.A.B. Faria, Modeling the Y-branched optical fiber bundle displacement sensor using a quasi-gaussian beam approach, *Microwave Opt. Technol. Lett.* 25 (2000) 138–141.
- [40] Y. Yang, K. Yamazaki, H. Aoyama, S. Matsumiya, Fiber optical surface topography measurement sensor and its design study, *Prec. Eng.* 24 (2000) 32–40.
- [41] H. Lu, T. Xu, H. Yang, Z. Chen, Research of a reflective fiber-optic displacement sensor with intensity compensation, *Proc. SPIE* 4222 (2000) 313–317.
- [42] N Takn and T Asakura, Statistical properties of laser speckles produced under illumination of a multimode optical fiber, *J Opt Soc Am A*, 2 (1985) 1282-1290.
- [43] Yuan Libo and Qiu Anping, "Fiber-optic diaphragm pressure sensor with automatic intensity compensation," *Sensors and Actuators A*, vol. 28, 29 1991.
- [44] Yuan Libo et al., "The analysis of the compensation mechanism of a fiber-optic displacement sensor," *Sensors and Actuators A*, vol. 36, no. 1, 177 1993.
- [45] L.B. Yuan, "The light source and the fiber end optical field," *Optical Communication Technology*, vol. 18, no. 1, pp. 54-64, 1994.

- [46] T. Xu, and H.B. Lv, " Research of a reflective fiber-optic displacement sensor with Intensity compensation," Journal of National University of Defense Technology, vol. 6, pp. 109-112, 2000.
- [47] L.B. Yuan, "The analysis of the compensation mechanism of a fiber optic displacement sensor," Sensors and Actuators, vol. 36, no. 3, pp. 177-182, 1993.
- [48] L. Hoogenboom, "Theoretical and experimental analysis of a fiber optic proximity probe,"Fiber Optic and Laser Sensors II, pp. 46-57, 1984.
- [49] X. Zhang, L Yang, Research on Displacement Sensor of Two-Circle Reflective Coaxial Fiber Bundle, International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, 2008.
- [50] Y. He, S. He, X. Yang, Optical Field Enhancement in Nanoscale Slot Waveguides of Hyperbolic Metamaterials.
- [51] F. Sukanuma, A. Shimamoto, K.Tanaka, Development of a differential optical-fiber displacement sensor, Applied Optics Vol. 38, Issue 7, pp. 1103-1109,1999.
- [52] D. Sagrario, P. Mead, Axial and angular displacement fiber-optic sensor, Applied Optics Vol. 37, Issue 28, pp. 6748-6754, 1998.

ANEXO I: MATERIAL PARA LAS MEDICIONES DEL PROYECTO

A continuación se detallan los componentes y equipos utilizados durante el proceso de medición llevado a cabo en las instalaciones de Leioa y el laboratorio de Fotónica de la ETSIB.

- Cámara climática marca CTS y modelo C-70/200. Consta de una interfaz basada en botones mediante los cuales se fijan tanto la temperatura como la humedad.

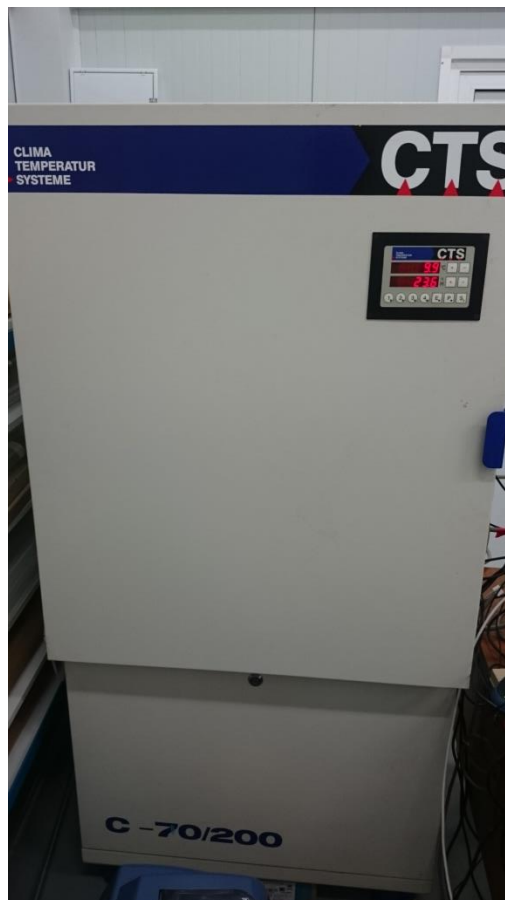


Ilustración 106: Cámara climática



Ilustración 107: Detalle de la interfaz

- PC transportado desde el laboratorio y que se ha estado utilizando para hacer mediciones en condiciones atmosféricas determinadas. Tiene instalado el sistema operativo Windows 7 de 32 bits y contiene el programa de Labview que controla los componentes necesarios para las medidas (multímetros, motor y generador de funciones) y la tarjeta PCI Express que permite comunicarse con ellos tres de forma simultánea. En el Anexo II se incluye un apartado de incidencias referente a este PC.



Ilustración 108: PC utilizado



Ilustración 109: Detalle de la conexión GPIB

- 2 multímetros modelo Agilent 34410A encargados de realizar en cada iteración del programa de medición cinco medidas y su promedio de forma que se minimice la incertidumbre en la medición.



Ilustración 110: Agilent 33410A

- 3 cables GPIB para conectar el PC a los dos multímetros y el generador de funciones. Son cables específicos para la transmisión en paralelo de las instrucciones del programa de modo que todos los equipos funcionen de forma síncrona.



Ilustración 111: Cable GPIB

- Generador de funciones modelo Keysight 33210A. Es el dispositivo encargado de enviar la señal a los multímetros para que realicen las medidas. Ejerce de trigger.



Ilustración 112: Keysight 33210A

- Bundle de fibra trifurcada. Se trata de un sensor fabricado por Fiber Guide, constituido por fibra de vidrio en la que la fibra iluminadora es monomodo. En la pata común está formada por tres anillos de fibras de forma concéntrica, donde el anillo central es la fibra transmisora y los dos externos son receptores encargados de recoger la luz reflejada en el álabe. En el otro extremo los tres anillos están separados para facilitar su conexión a otros dispositivos y está completamente recubierta de un revestimiento plástico negro. Antes de su uso se ha limpiado con el instrumental específico para ello disponible en el laboratorio.



Ilustración 113: Bundle trifurcado

A continuación se muestran las fotos de cada una de las patas de los anillos receptores del bundle. La foto correspondiente a la pata común ya se ha mostrado a lo

largo del documento.

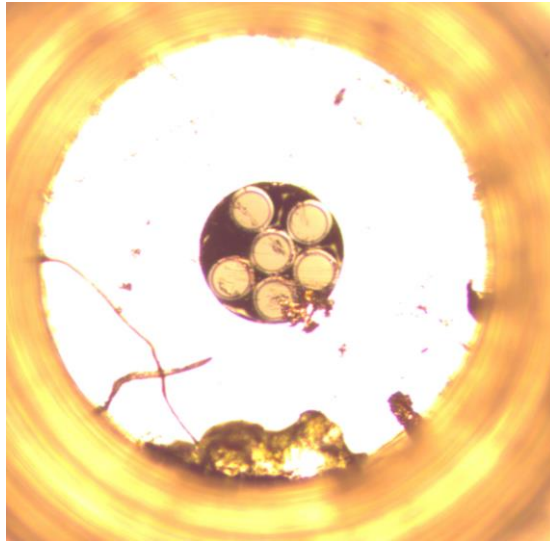


Ilustración 114: Anillo receptor interior

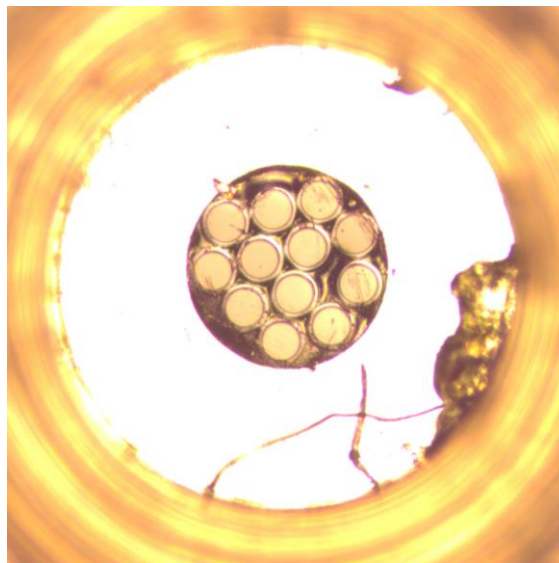


Ilustración 115: Anillo receptor externo

- Bundle cuatrifurcado de fibra. Fabricado también por Fiber Guide y similar al anterior pero en este caso hay tres anillos receptores en lugar de dos. Esto hace que en uno de los extremos el bundle se divida en cuatro cables (tres para los anillos receptores y uno para la fibra transmisora). Otra diferencia respecto al anterior bundle consiste en que en este bundle la pata común va revestida de aluminio para darle mayor tolerancia a las temperaturas y presiones. Al utilizar este bundle se usaran las patas de los anillos interno y más externo, dejando el intermedio sin usar. Al igual que la fibra del bundle trifurcado, se trata de fibra óptica de vidrio. Antes de su uso se ha limpiado con el instrumental específico para ello disponible en el laboratorio. A continuación se muestran las fotos de cada una de las patas de los anillos receptores del bundle. La foto correspondiente a la pata común ya se ha mostrado a lo largo

del documento.

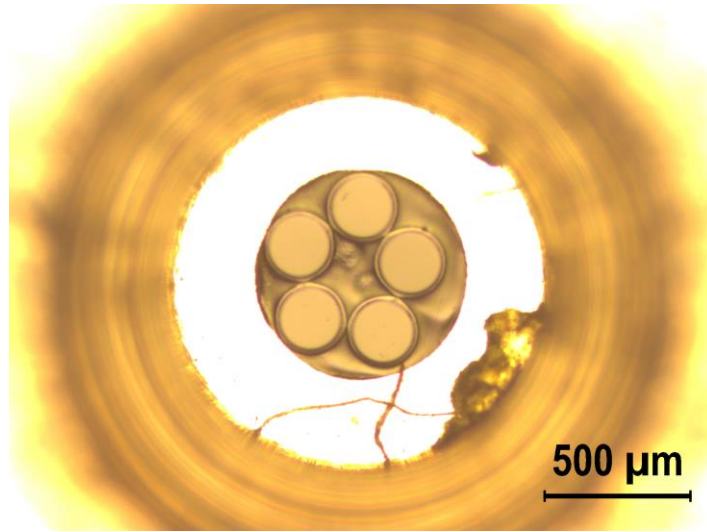


Ilustración 116: Anillo receptor interno

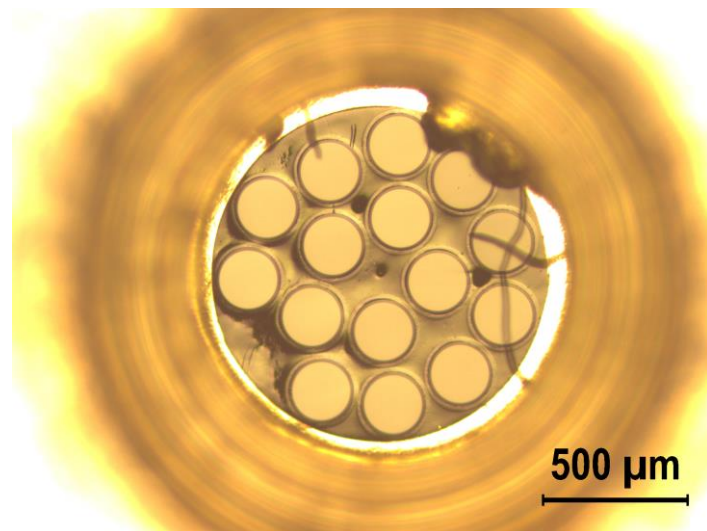


Ilustración 117: Anillo receptor externo

- Soporte para la pata común del bundle: Consta de poste y soporte para el poste. Sirve para colocar el bundle de fibra correspondiente de forma fija para realizar las mediciones.

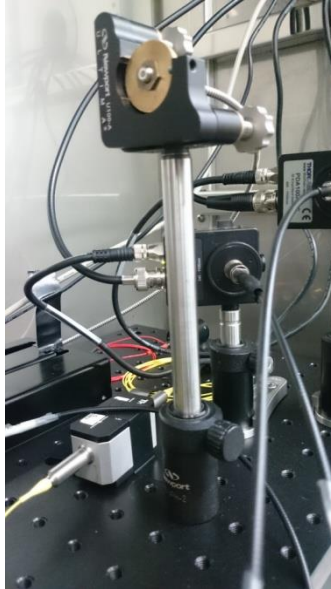


Ilustración 118: Soporte de la pata común del bundle

- Láser iluminador rojo denominado en el informe como láser 1. Se transporta la caja completa, que contiene tanto el alimentador como el láser propiamente dicho. El láser utilizado es de Frankfurt Laser Company, modelo HSML-0660-20-FC. Requiere como mínimo media hora para calentarse. Su potencia nominal de salida es de 20 mW.



Ilustración 119: Frankfurt Laser Company HSML-0660-20-FC



Ilustración 120: Alimentación del láser 1

- Láser iluminador rojo denominado en este informe como láser 2. Es de la marca Power Technology y modelo IQ1C30(643-80)F2/547. Al igual que el láser 1, requiere de al menos 30 minutos para calentar y es significativamente mayor que el láser 1. Es más estable que el láser 1 y es capaz de compensar mejor las variaciones de temperatura. La alimentación también es más compleja, ya que se comunica por un cable RS232 para ajustar la potencia que emite en función de la temperatura. Es de mayor potencia (emite 30 nW) que el láser 1.



Ilustración 121: Láser de Power Technology modelo IQ1C30(643-80)F2/547



Ilustración 122: Alimentación del láser de Power Technology



Ilustración 123: Detalle de conexión con el láser mediante RS232

- Aislador óptico. Se transporta en su correspondiente caja, que únicamente contiene el aislador marca Thorlabs modelo IO-F-660FC debidamente protegido. Sirve para evitar las reflexiones en el láser que puedan averiarlo y desestabilizaciones durante las medidas.



Ilustración 124: Aislador óptico embalado

- Plataforma negra Thorlabs. Se trata de una plataforma que va a permitir introducir el montaje en la cámara climática y sobre el que se fijan todos los componentes.



Ilustración 125: Plataforma Thorlabs

- Motor Thorlabs modelo LTS 150. Es el motor que va a permitir el desplazamiento del álabe en pasos de micrómetros. Se controla mediante USB o mediante los botones físicos. Se requieren 2 tornillos para fijarlo a la plataforma Thorlabs y tiene su propia alimentación.



Ilustración 126: Motor Thorlabs

- Plataforma sobre el motor que va a sostener el brazo que sostiene el álabe. Para fijarlo al motor se requieren 3 tornillos.



Ilustración 127: Plataforma de sujeción de álabe

- Brazo con el que se sostiene el álabe. Consiste en una pinza metálica con la que se puede sujetar el álabe.



Ilustración 128: Brazo para sostener el álabe en posición fija

- Álaves a estudiar. En concreto se dispone de dos álaves con características diferentes.



Ilustración 129: Vista cenital de los álaves utilizados

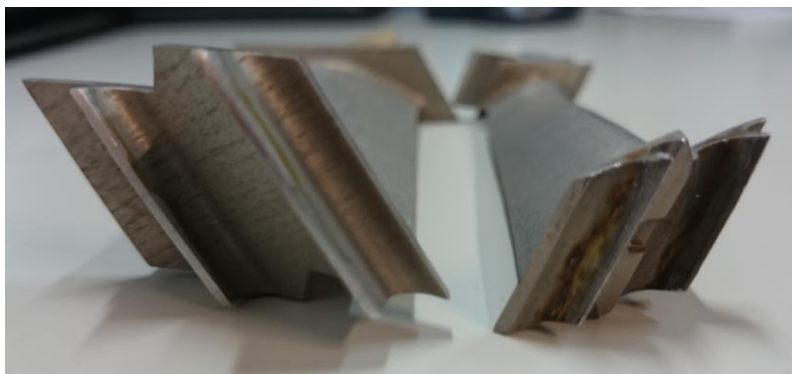


Ilustración 130: Vista de la parte a iluminar del álabe

- Dos fotodetectores marca Thorlabs modelo PDA100A-EC. Se transportan en su correspondiente caja, en la que se incluye su alimentación.



Ilustración 131: Fotodetectores utilizados

- Cables coaxiales con conector BNC para enviar la señal de cada fotodetector a cada multímetro.



Ilustración 132: Cable BNC

- T para enviar la señal de salida del generador a los dos multímetros.



Ilustración 133: T para los BNC

- Soporte para los fotodetectores. Consta de poste y de soporte de poste. Van atornillados a la plataforma Thorlabs mediante un tornillo.

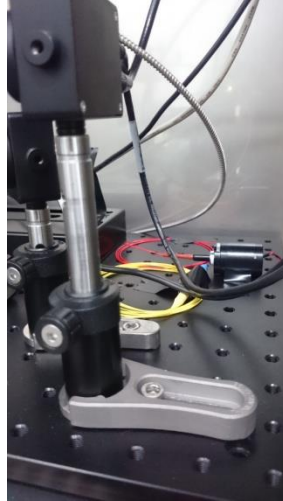


Ilustración 134: Soporte de los fotodetectores

- Gafas de seguridad. Protegen frente a posibles daños que pueda ocasionar el láser que se está utilizando. Marca Honeywell.



Ilustración 135: Gafas de seguridad

- APY001/M: Dispositivo mediante el cual se pueden realizar desplazamientos de hasta 4° en cada eje de pitch y yaw de forma controlada ya que tiene escalas graduadas para ambos desplazamientos. Servirá para el estudio del cabeceo.

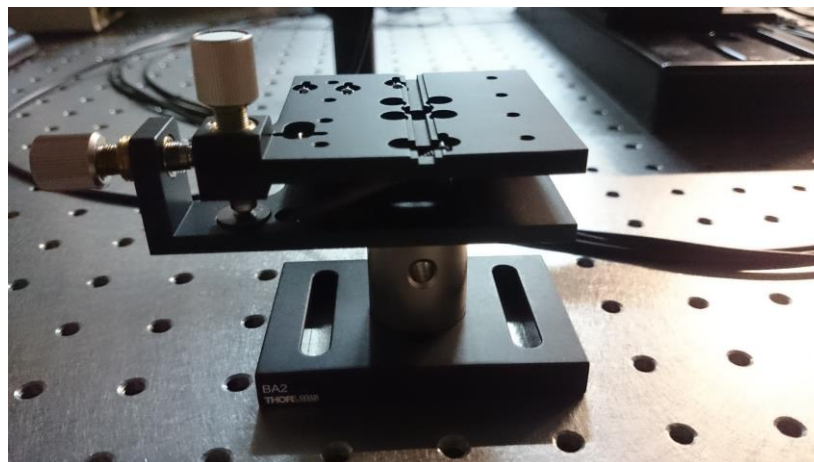


Ilustración 136: APY001/M utilizado

- Reflectores difusos con distinto factor de pulido en su superficie para ayudar el estudio del efecto de la rugosidad en la medición.



Ilustración 137: Superficies rugosas utilizadas

- Power Meter PM100USB: Sirve para saber en todo momento la potencia de emisión del láser. Se conecta via USB al PC y posee software propio.



Ilustración 138: PM100USB

- Fotodiodo para conectar al Power Meter. Debe ser acorde a la longitud de onda del láser que se utilice, en este caso 660 nm.



Ilustración 139: S150C

ANEXO II: PROGRAMA DE LABVIEW UTILIZADO EN LAS MEDIDAS

El software específico que se ha utilizado en las mediciones ha sido el programa Labview versión 2014 SP1 en la versión de 32 bits. Se ha hecho uso de un programa (Pedro v1.vi) mediante el cual se pueden manejar tanto el generador de funciones y multímetros como el motor mediante una sencilla interfaz que hace que el proceso de medida sea completamente configurable y automatizado. A continuación se muestra una imagen de su interfaz:

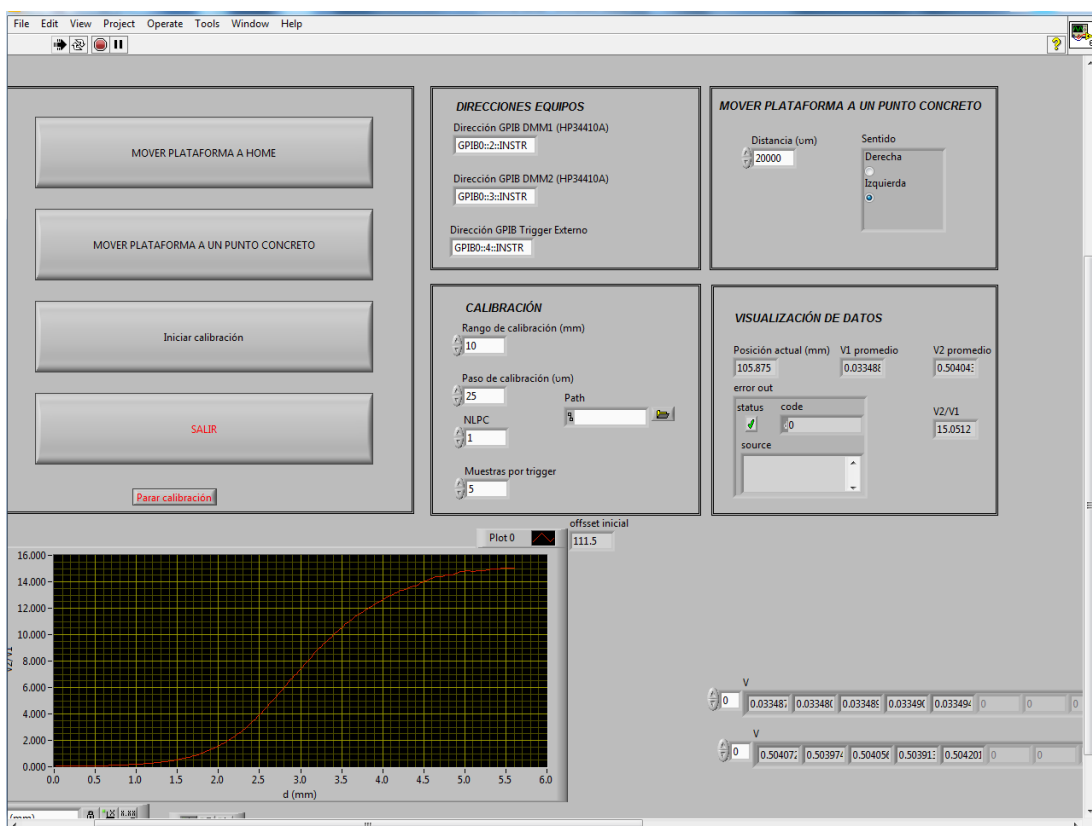


Ilustración 140: Interfaz del programa de LabView

En los siguientes párrafos se indica la función de cada uno de los recuadros de la imagen.

A la izquierda aparecen los comandos principales del programa, con los que se puede llevar la plataforma a la posición de referencia llamada Home, mover la plataforma a un punto concreto que se haya indicado en el cuadro de diálogo de arriba a la derecha llamado mover la plataforma a un punto concreto, iniciar la calibración con los parámetros que se hayan indicado en el cuadro de diálogo central llamado calibración, salir del programa y parar calibración.

En el cuadro de diálogo llamado direcciones equipos aparecen indicados los equipos que están siendo controlados vía GPIB por el programa. En este caso los dos

multímetros y el generador de funciones.

En el cuadro de diálogo mover la plataforma a un punto concreto se puede indicar la cantidad de micrómetros que se desea mover la plataforma y en qué sentido, siendo izquierda el sentido en el que está Home y derecha el contrario.

En el cuadro de diálogo calibración se puede configurar la forma de la calibración: rango de distancia, pasos de medición, NLPC (nonlinear predictive control, método para estimar valores futuros)...

En el cuadro de diálogo visualización de datos se puede ver el estado actual de la medición junto con los valores promediados de los voltajes que se están midiendo.

Por último, en la parte inferior de la pantalla se van visualizando de forma tanto gráfica como numérica los valores que se van obteniendo.

Es importante subrayar el hecho de que el programa no está depurado al 100%, lo que provoca que de vez en cuando se lancen warnings o avisos de error que hacen que el LabView se cierre. En esos casos, hay que reiniciar el LabView, llevar la plataforma a Home y comenzar el proceso de acercar el álabe a la posición de offset estipulada antes de iniciar la calibración.

ANEXO III: PLIEGO DE CONDICIONES/NORMATIVA APLICABLE



NTP 654: Láseres: nueva clasificación del riesgo (UNE EN 60825-1 /A2: 2002)

Les Lasers: Nouvelle classification des risques (UNE EN 60825-1/A2:2002) New laser classification (UNE EN 60825-1/A2: 2002)

Redactoras:

Beatriz Diego Segura Licenciada en Ciencias Químicas

María José Rupérez Calvo Doctora en Ciencias Químicas

CENTRO NACIONAL DE NUEVAS TECNOLOGÍAS

Esta NTP actualiza la NTP-261 de 1991.

Introducción

El objetivo de esta NTP es facilitar la comprensión de los cambios producidos en la norma UNE EN 60825-1 de 1996, «Seguridad de los productos láser. Parte 1: Clasificación del equipo, requisitos y guía del usuario».

Esta norma ha sido modificada por la UNE EN 60825-1/A11 en 1997 y, recientemente, por la UNE EN 60825-1/A2: 2002. Complementa y modifica entre otros aspectos la clasificación de los láseres en función de los riesgos que supone su utilización. Su origen es la adopción por el CENELEC de la norma IEC 60825-1:1993/A2:2001.

Descripción de las clases de láser

Los láseres no forman un grupo homogéneo de riesgo ya que, dependiendo de sus características técnicas (sistema de bombeo, medio activo y cavidad óptica) pueden emitir radiación en un amplio intervalo de longitudes de onda, con potencias o energías de salida muy variables y con una distribución temporal que puede ser continua o en impulsos. Además las distintas aplicaciones, condicionan el tiempo de exposición, que es un factor clave para determinar el riesgo.

La clasificación de un láser en categorías de riesgo, permite identificar la peligrosidad del mismo y está basada en el Límite de Emisión Accesible (LEA) para el usuario. Dependiendo del LEA el láser obtendrá una clasificación u otra.

El desarrollo de nuevos productos láser, de potencias intermedias, ha dejado obsoleta la antigua clasificación. Las antiguas Clases 1, 2, 3B y 4 permanecen sin cambios, y

se añaden las Clases intermedias 1 M, 2M y 3R lo que hace que láseres que antes resultaban ser Clase 3B, ahora pertenezcan a alguna de estas nuevas categorías.

A continuación se expone de forma casi íntegra la nueva clasificación publicada en la norma UNE EN 60825-1/A2, y en la figura 1 un resumen simplificado de la misma.

TABLA 1

Clasificación de láseres según UNE EN 60825-1 /A2-2002

Clase 1	Productos láser que son seguros en todas las condiciones de utilización razonablemente previsibles, incluyendo el uso de instrumentos ópticos en visión directa.
Clase 1M	Láseres que emitiendo en el intervalo de longitudes de onda (λ) entre 302,5 y 4000 nm son seguros en condiciones de utilización razonablemente previsibles, pero que pueden ser peligrosos si se emplean instrumentos ópticos para visión directa. (Ver 8.2 en la norma).
Clase 2	Láseres que emiten radiación visible en el intervalo de longitudes de onda comprendido entre 400 y 700 nm. La protección ocular se consigue normalmente por las respuestas de aversión, incluido el reflejo parpebral. Esta reacción puede proporcionar la adecuada protección aunque se usen instrumentos ópticos.
Clase 2M	Láseres que emiten radiación visible (400 y 700 nm). La protección ocular se consigue normalmente por las respuestas de aversión, incluido el reflejo parpebral, pero la visión del haz puede ser peligrosa si se usan instrumentos ópticos. (Ver 8.2)
Clase 3R	Láseres que emiten entre 302,5 y 106 nm, cuya visión directa del haz es potencialmente peligrosa pero su riesgo es menor que para los láseres de Clase 3B. Necesitan menos requisitos de fabricación y medidas de control del usuario que los aplicables a láseres de Clase 3B. El límite de emisión accesible es menor que 5 veces el LEA de la Clase 2 en el rango 400-700 nm, y menor de 5 veces el LEA de la Clase 1 para otras longitudes de onda.
Clase 3B	Láseres cuya visión directa del haz es siempre peligrosa (por ej. dentro de la Distancia Nominal de Riesgo Ocular). La visión de reflexiones difusas es normalmente segura (véase también la nota 12.5.2c).
Clase 4	Láseres que también pueden producir reflexiones difusas peligrosas. Pueden causar daños sobre la piel y pueden también constituir un peligro de incendio. Su utilización precisa extrema precaución.

Figura 1

Resumen de la clasificación láser

Clase 1	Seguros en condiciones razonables de utilización
Clase 1M	Como la Clase 1, pero no seguros cuando se miran a través de instrumentos ópticos como lupas o binoculares.
Clase 2	Láseres visibles (400 a 700 nm). Los reflejos de aversión protegen el ojo aunque se utilicen con instrumentos ópticos.
Clase 2M	Como la Clase 2, pero no seguros cuando se utilizan instrumentos ópticos.
Clase 3R	Láseres cuya visión directa es potencialmente peligrosa pero el riesgo es menor y necesitan menos requisitos de fabricación y medidas de control que la Clase 3B.
Clase 3B	La visión directa del haz es siempre peligrosa, mientras que la reflexión difusa es normalmente segura.
Clase 4	La exposición directa de ojos y piel siempre es peligrosa y la reflexión difusa normalmente también. Pueden originar incendios.

Requisitos mínimos de seguridad

Los requisitos mínimos de seguridad para la fabricación de productos láser pretenden conseguir la eliminación de los riesgos y cuando esto no es técnicamente posible reducirlos en la fase de diseño.

Dentro de estos requisitos, y teniendo en cuenta la clase a la que pertenece cada producto láser, los fabricantes están obligados a adoptar una serie de medidas de seguridad relativas al diseño de sus productos. Entre estas medidas está el empleo de carcasas protectoras, paneles con enclavamientos de seguridad, atenuadores del haz, etc.

A modo de resumen la tabla 2 especifica cuáles son estos requisitos de fabricación en función de la nueva clasificación de los productos láser.

Tabla 2

Requisitos de fabricación de los láseres

Requisitos	Clasificación						
	1	1M	2	2M	3R	3B	4
Cubierta protectora	--	O	O	O	O	O	O
Bloqueo de seguridad	X	X	X	X	+	+	+
Control remoto	--	--	--	--	--	O	O
Control de llave	--	--	--	--	--	O	O
Aviso de emisión	--	--	--	--	O	O	O
Atenuador del haz	--	--	--	--	--	O	O
Localización de controles	--	--	--	--	♣	♣	♣
Óptica de observación	--	▼	▼	▼	▼	▼	▼
Barrido	O	O	O	O	O	O	O
Etiqueta de Clase	T	T	F, T	F, T	F, T	F, T	F, T
Etiqueta de abertura	--	--	--	--	Te	Te	Te
Etiqueta de entrada en servicio	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)
Etiqueta de neutralización del bloqueo	©	©	©	©	©	©	©
Etiqueta de intervalo de λ	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼
Etiqueta de LED	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲
Manual con instrucciones de seguridad	O	O	O	O	O	O	O
Información de compra y servicio técnico	O	O	O	O	O	O	O
Productos médicos	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣

- | | |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> O Obligatorio -- No necesario X Necesario para impedir emisión > 3R ♣ Necesario para impedir emisión > LEA Clase 1 ó 2 Te Texto especificado requerido ▲ Correcciones de texto necesarias para productos LED ♣ Se aplica la norma CEI 60601-2-22 | <ul style="list-style-type: none"> + Necesario para impedir emisión > 3B T Texto requerido ▼ La emisión debe ser < LEA de la Clase 1 F Figuras normalizadas (*) Obligatoria y específica para cada Clase ▼ Obligatoria para ciertos intervalos de λ © Obligatoria en ocasiones según la Clase |
|--|---|

Etiquetado

La obligación de clasificar un láser y de informar al usuario sobre sus riesgos mediante la etiqueta estándar, recae sobre el fabricante del mismo.

Las etiquetas deberán ser legibles, claramente visibles y estar en todo momento fijadas durante el funcionamiento, mantenimiento o ajuste del láser. Además tienen que estar situadas de modo que puedan leerse sin que la exposición a la radiación supere el LEA de la Clase 1. En aquellos casos en los que el tamaño del producto o su diseño haga imposible la colocación de etiquetas, éstas deberán incluirse en la información

que se suministre al usuario o bien dentro del embalaje del producto láser.

La norma establece distintos tipos de etiquetas: de advertencia, explicativas, de abertura y etiquetas de los paneles de acceso a los equipos láser.

El color, la forma, el pictograma y las dimensiones de la etiqueta de advertencia (figura 2) están establecidos en la figura 14 de la norma. Es obligatoria en los productos láser de las clases 2, 2M, 3R, 313 y 4.

Las etiquetas explicativas informan sobre la clase a la que pertenece el láser y contienen frases de advertencia normalizadas en función del riesgo que supone la utilización de los equipos (figura 3). En la norma, se hace mención a estas etiquetas en el capítulo 5 y la figura 15. Para los productos de radiación LED (Light-Emitting Diode), se debe sustituir la palabra "láser" de las etiquetas explicativas por la palabra "LED".

Figura 2

Etiqueta de advertencia



Además de la información contenida en las etiquetas explicativas descrita en la figura 3, los productos láser, con excepción de los de la Clase 1, deben contener cierta información relativa a las características técnicas, como la potencia máxima de la radiación emitida, la duración del pulso (si ha lugar) y las longitudes de onda emitidas, así como el nombre y la fecha de publicación de la norma en la que se basa la clasificación del producto. Para los láseres de Clase 1 y 1 M esta información tiene que estar contenida en el manual de información del usuario, en lugar de suministrarla en las correspondientes etiquetas adheridas al producto.

Los equipos láser que estén clasificados dentro de las categorías 3R, 313 y 4 deberán llevar cerca de la abertura por la que se emite la radiación una etiqueta, denominada etiqueta de abertura, siempre que la radiación saliente supere el nivel LEA de la Clase 1 ó 2.

Figura 3

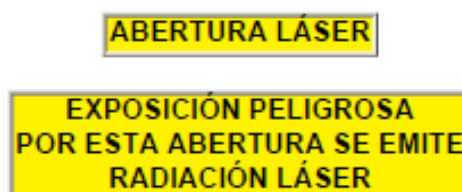
Etiquetas explicativas



La norma permite elegir entre las dos frases de advertencia de la figura 4.

Figura 4

Etiquetas de abertura

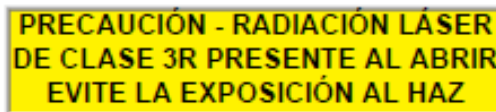


Si el producto láser tiene una conexión, un panel de acceso o una cubierta protectora

que al retirarse exponga al trabajador a radiación láser que supere el LEA de la Clase 1, éstos deben de estar correctamente etiquetados en función de las directrices de la norma UNE EN 60825-1/A2: 2002. Como ejemplo se muestra en la figura 5 una etiqueta de panel para la Clase 3R. En la norma se detallan el resto de etiquetas para las demás clases.

Figura 5

Etiqueta de panel



Por último, cuando los paneles estén asociados a bloqueos de seguridad que puedan ser fácilmente neutralizados y que permitan un acceso a la radiación láser superior al LEA de la Clase 1, se deben etiquetar estos paneles tal y como establece la norma en su apartado 5.9.2.

Medidas de control

A la hora de adoptar medidas de control, la norma sugiere una serie de ellas y establece cuál debe ser la jerarquía de las mismas.

En primer lugar hay que tener en cuenta la capacidad del láser para producir daño, que se obtiene de su clasificación.

En segundo lugar, deben controlarse los factores ambientales por medio de actuaciones técnicas, por ejemplo el establecimiento de un sistema de control de llave o un atenuador del haz, o a través de medidas administrativas, como la designación de un Responsable de Seguridad Láser y el establecimiento de zonas de seguridad mediante la DNRO para láseres de Clase 3B y 4. Finalmente, se han de controlar los factores individuales como la protección ocular y el nivel de conocimiento de los trabajadores acerca del potencial riesgo.

La utilización de filtros y gafas de protección es imprescindible si existe la posibilidad de una exposición superior a la máxima permitida.

Los EPI de protección láser deben cumplir los requisitos mínimos especificados en la UNE EN 207 y su código es la letra L. Los EPI para los trabajos de ajuste láser deben cumplir los requisitos de la norma UNE EN 208 y su código es la letra R. Es importante distinguir entre ellos, ya que las gafas para ajuste láser protegen menos y se emplean con limitación de potencia y tiempo.

Identificación de EPI para protección láser

La correcta identificación de las gafas y filtros de protección frente a láser, se consigue

mediante el marcado CE, especificado en la norma UNE EN 207/A1 de 2003, mediante una secuencia de códigos que indican:

- La longitud de onda frente a la que protegen (una o varias bandas espectrales).
- Las condiciones de ensayo: D (láser continuo), I (láser pulsado), R (láser relajado o de pulso gigante) y M (láser multimodo).
- El grado de protección del ocular especificado en la norma precedido por la letra L.
- Identificación del fabricante.
- Requisitos de resistencia mecánica, en su caso.

En la figura 6 se expone un ejemplo de marcado de gafas de protección para un láser de Neodimio: YAG en el infrarrojo, a 1060 nm, que ha pasado las condiciones de ensayo para láser continuo y pulsado.

Figura 6

Marcado de EPI para trabajos con láser

Marcado de gafas de protección				
Láser Nd:YAG- UNE EN 207/A1: 2003				
	1060	DI	L7	X
	↑	↑	↑	↑
	↑	↑	↑	↑
λ con protección asegurada	→→→→→	↑	↑	↑
Condición ensayo (continuo, pulsado)	→→→→→	→	↑	↑
Grado protección	→→→→→	→→→→→	↑	↑
Identificación del fabricante	→→→→→	→→→→→	→→→→→	↑

Identificación de EPI para trabajos de ajuste de láser

El marcado CE para identificar las gafas de protección para ajuste láser, se especifica en la norma UNE EN 208, e incluye una secuencia de códigos diferente:

- Potencia máxima del láser (W).
- Energía máxima de los pulsos (J).
- La longitud de onda o banda espectral para la que se diseñan las gafas.
- El grado de protección del ocular especificado en la norma precedido por la letra R.
- Identificación del fabricante.
- Marca de certificación, si ha lugar.
- Sobre la montura, las palabras "gafas de ajuste" en los idiomas del país de comercialización.
- Requisitos de resistencia mecánica, en su caso.

En la figura 7 hay un ejemplo de marcado de gafas de ajuste para un láser de Argón

en la banda del verde, a 514,5 nm.

Figura 7

Marcado de EPI para trabajos de ajuste láser

Marcado de gafas de ajuste							
Láser de Argón (banda a 514.5 nm) UNE EN 208:1999							
	1W	2x10 ⁻⁴ J	514	R3	X	ZZ	
Potencia máxima del láser	→→→→→	↑	↑	↑	↑	↑	↑
Energía máxima de los pulsos	→→→→→	→→→	↑	↑	↑	↑	↑
λ para la que se diseñan las gafas	→→→→→	→→→	→	↑	↑	↑	↑
Grado protección	→→→→→	→→→	→	→	↑	↑	↑
Identificación del fabricante	→→→→→	→→→	→	→	→	↑	↑
Marca de certificación, si ha lugar	→→→→→	→→→	→	→	→	→	↑

Cálculo de la distancia nominal de riesgo ocular (DNRO), es la distancia nominal de riesgo ocular para un láser determinado, conocida normalmente por sus siglas DNRO, es la distancia a la cual la exposición a la radiación iguala la exposición máxima permisible (EMP) apropiada para la córnea.

Se emplea para delimitar zonas de riesgo en la evaluación de los puestos de trabajo con acceso a la radiación láser.

$$E = \frac{4 \times P_0 \times e^{-\mu r}}{\pi (a + r\theta)^2}$$

La exposición se puede estimar a partir de la siguiente expresión

Donde:

- E es la irradiancia de la fuente en vatios/m².
- P₀ es la potencia radiante del láser expresada en vatios.
- El término exponencial hace referencia a las pérdidas debidas a la atenuación atmosférica (normalmente despreciable).
- a es el diámetro del haz.
- r es la distancia a la que se encuentra el trabajador.
- Ø es la divergencia del haz.

En el caso de que coincidan la exposición o irradiancia con la EMP, la distancia r será igual a la DNRO. El cálculo de dicha distancia se puede hacer mediante la fórmula siguiente:

$$\text{DNRO} = \frac{(4 \times P_0 / \pi \times E_{\text{EMP}})^{1/2} - a^r}{\emptyset}$$

La DNRO se calcula de forma diferente en función del tipo de exposición: láser continuo, láser de impulsos, utilización de óptica de aumento o la existencia de reflexiones especulares y difusas. Para dichos cálculos se recomienda consultar IEC TR 60825-10 referenciado en la bibliografía.

Bibliografía

1. UNE EN 60825-1 «Seguridad de los productos láser. Parte 1: Clasificación del equipo, requisitos y guía de seguridad» 1996. Modificada por: UNE EN 60825-1/A1 1: 1997 y con el complemento UNE EN 60825-1/A2: 2002.
2. IEC Technical Report TR 60825-10: 2002, "Safety of laser products - Part 10: Application guidelines and explanatory notes to IEC 60825-1".
3. IEC Technical Report TR 60825-8 (1999-11) "Safety of laser products - Part 8: Guidelines for the safe use of medical laser equipment".
4. UNE EN 207: 1999 «Filtros y protectores de los ojos contra la radiación láser (gafas de protección láser)».
5. UNE EN 207/A1: 2003, complementa a la anterior.
6. UNE EN 208: 1999 «Gafas de protección para los trabajos de ajuste de láser y sistemas láser (gafas de ajuste láser)».
7. UNE EN 208/A1: 2003, complementa a la anterior.
8. UNE EN 60601-2-22: 1997 «Equipos electromédicos. Parte 2: Requisitos particulares de seguridad para equipos láser terapéuticos y de diagnóstico», eqv. CEI 601-2-22: 95.
9. UNE-EN 12626: 1998 "Seguridad de las máquinas. Máquinas láser. Requisitos de seguridad", eqv. ISO 11553: 1996 mod. Para riesgos eléctricos remite a CEI 204-1: 1992, «Equipamiento eléctrico de máquinas industriales. Parte 1: Reglas generales.
10. RUPÉREZ M.J., Láseres: riesgos en su utilización, Nota Técnica de Prevención NTP-261. INSHT 1991.
11. RUPÉREZ M.J., CABRERA J.A (coordinadores) Algunas cuestiones sobre seguridad láser Ed. INSHT, 1996, 398 pgs. ISBN.: 84-7425-434-5.

Páginas Web:

- www.nrpb.org

- www.inrs.fr
- www.icnirp.de

ANEXO IV: CÓDIGO FUENTE

En este apartado se incluye el código fuente utilizado para obtener los datos de simulación expuestos en este documento. En concreto, el programa aquí expuesto es para un caso determinado de simulación, ya que al ser completamente configurable, al variar los parámetros que posee, se pueden simular las condiciones que le usuario desee. El código es el expuesto a continuación:

```
function Simulacion
```

```
%%%%%%%%ESTE ES EL QUE TIENE LA RELACIÓN
```

```
%%%%%%%%0.95, 0.7343, 0.72, 0.65
```

```
%%%%%%%%Una n para cada bundle
```

```
%%%%%%%%Una E para cada láser
```

```
%%%PARÁMETROS GLOBALES%%%
```

```
%%%Todas las distancias están en 10(-6)
```

```
z=0:25:10000;
```

```
opc=0;
```

```
%Transimpedancia dependiendo de los dB del fotodetector
```

```
%Sacados del datasheet
```

```
trans0=1.51*103;
```

```
trans10=4.75*103;
```

```
%trans10=5000;
```

```
trans20=1.5*104;
```

```
%trans20=14000;
```

```
trans30=4.75*104;
```

```
%trans30=30000;
```

```
trans40=1.51*105;
```

```
while opc ~=3
```

```
    opc= menu ('            Selecciona el tipo de bundle a utilizar            ',...
```

```

'          Bundle trifurcado          ',...
'          Bundle cuatrifurcado       ',...
'          Salir                       ');
  
```

switch opc

case 1 %Casos del bundle trifurcado

```
clearvars -except z opc trans0 trans10 trans20 trans30 trans40;
```

%Parámetros que quedan fijados para este bundle:

%Todos los relacionados con las propiedades físicas

%de la fibra y distancias promediadas al centro

```
%rt=54.784;   %Radio de la fibra transmisora
```

```
rt=2.15;     %Dato real
```

```
NA=0.12;    %Apertura numérica real de la fibra transmisora
```

```
%rr6= 54.7871209;%Radio medio de las fibras del anillo 1
```

```
rr6=50;     %Dato real
```

```
%n1=6;     %Número de fibras en el anillo 1
```

```
%rr12=55.1765145;%Radio medio de las fibras del anillo 2
```

```
rr12=50;    %Dato real
```

```
%n2=12;    %Número de fibras en el anillo 2
```

```
%%%%distancias al centro del anillo de 6rx
```

```
p65=134.407;
```

```
p64=132.499;
```

```
p63=132.793;
```

```
p62=137.696;
```

```
p61=130.542;
```

p66=131.315;

%%%%distancias al centro del anillo de 12rx

p12_10= 254.351;

p12_9= 256.762;

p12_8= 264.248;

p12_7= 259.909;

p12_6= 257.302;

p12_5= 255.44;

p12_4= 256.87;

p12_3= 258.472;

p12_2= 264.029;

p12_1= 253.399;

p12_12= 256.771;

p12_11= 248.423;

%prompt={'Con este bundle solo se utiliza el láser de Frankfurt Laser Technology modelo HSML-0660-20-FC'};

disp('Con este bundle solo se utiliza el láser de Frankfurt Laser Technology modelo HSML-0660-20-FC')

%%%%%Características del láser que quedan fijadas para este caso:

%%%%%1-Parámetros reguladores de la distribución de la intensidad de la luz

%%%%%2-Potencia del láser

%%%%%3-Reflectividad

%%Desplaza las curvas

%%Valor pequeño, ensancha la curva

%%Valor grande, estrecha la curva

%%Se 'come' la curva

o=1.0;

%o=1;

%%Desplaza las curvas

%%Valor pequeño, ensancha la curva

%%Valor grande, estrecha la curva

%%Mantiene la curva

g=0.2;

%g=0.19;

%%Desplaza las curvas

%%Valor pequeño, ensancha la curva

%%Valor grande, estrecha la curva

n=1.23*1.12;%1.33 de la n rara

%n=1.12;

q=o*rt*(1+(g*(((2*z)/rt).^n))* tan(asin(NA)));

R=0.027; %% Reflectividad (¿Por qué 0.6?)

%R=0.03699;

%P_0=7; %% Potencia láser original

P_0=20*10⁻³; %% Potencia láser Frankfurt en W

s=R*P_0; %% Potencia reflejada

%%% función característica de modulación de

%%% un par de fibras del anillo 6rx

$$f65 = ((rr6.^2)/(q.^2)) .* \exp(-(p65.^2)/(q.^2));$$

$$f64 = ((rr6.^2)/(q.^2)) .* \exp(-(p64.^2)/(q.^2));$$

$$f63 = ((rr6.^2)/(q.^2)) .* \exp(-(p63.^2)/(q.^2));$$

$$f62 = ((rr6.^2)/(q.^2)) .* \exp(-(p62.^2)/(q.^2));$$

$$f61 = ((rr6.^2)/(q.^2)) .* \exp(-(p61.^2)/(q.^2));$$

$$f66 = ((rr6.^2)/(q.^2)) .* \exp(-(p66.^2)/(q.^2));$$

%Potencia total del anillo 6rx

$$P6 = s*f65 + s*f64 + s*f63 + s*f62 + s*f61 + s*f66;$$

% P6=1*P6;

%%% función característica de modulación de

%%% un par de fibras del anillo 12rx

$$f12_1 = ((rr12.^2)/(q.^2)) .* \exp(-(p12_1.^2)/(q.^2));$$

$$f12_2 = ((rr12.^2)/(q.^2)) .* \exp(-(p12_2.^2)/(q.^2));$$

$$f12_3 = ((rr12.^2)/(q.^2)) .* \exp(-(p12_3.^2)/(q.^2));$$

$$f12_4 = ((rr12.^2)/(q.^2)) .* \exp(-(p12_4.^2)/(q.^2));$$

$$f12_5 = ((rr12.^2)/(q.^2)) .* \exp(-(p12_5.^2)/(q.^2));$$

$$f12_6 = ((rr12.^2)/(q.^2)) .* \exp(-(p12_6.^2)/(q.^2));$$

$$f12_7 = ((rr12.^2)/(q.^2)) .* \exp(-(p12_7.^2)/(q.^2));$$

$$f12_8 = ((rr12.^2)/(q.^2)) .* \exp(-(p12_8.^2)/(q.^2));$$

$$f12_9 = ((rr12.^2)/(q.^2)) .* \exp(-(p12_9.^2)/(q.^2));$$

$$f12_10 = ((rr12.^2)/(q.^2)) .* \exp(-(p12_10.^2)/(q.^2));$$

$$f12_11 = ((rr12.^2)/(q.^2)) .* \exp(-(p12_11.^2)/(q.^2));$$

$$f12_12 = ((rr12.^2)/(q.^2)) .* \exp(-(p12_12.^2)/(q.^2));$$

%Potencia total del anillo 12rx

```
P12=s*f12_1+s*f12_2+s*f12_3+s*f12_4+s*f12_5+s*f12_6+s*f12_7+s*f12_8+s*f12_9+
s*f12_10+s*f12_11+s*f12_12;
```

```
%        P12=1.5*P12;
```

```
opc2=0;
```

```
while opc2 ~=3
```

```
opc2= menu('        Selecciona la configuración de ganancias        ',...
          '        10-30                                            ',...
          '        20-20                                            ',...
          '        Salir                                             ')
```

```
switch opc2
```

```
  case 1 %Trifurcado y láser 1 con 10-30
```

```
    %%Características que quedan fijadas:
```

```
    %%Transimpedancia de los fotodetectores
```

```
    %%Para 10dB: 4.75 x 10^3 V/A
```

```
    %%Para 30dB: 4.75 x 10^4 V/A
```

```
opc3=0;
```

```
while opc3 ~=5
```

```
opc3= menu('        Selecciona la temperatura a mostrar        ',...
          '        10°C                                            ',...
          '        20°C                                            ',...
          '        30°C                                            ',...
          '        40°C                                            ',...
          '        Salir                                            ')
```

' Salir ');

switch opc3

case 1

clearvars eff;

%%%Trifurcado

%%%láser 1

%%%10-30

%%%10°C

%%%660-1.5=658.5nm

%%%responsivity=0.415

eff=0.415;

%Intensidad óptica del anillo 6rx

%Con la eficiencia (responsivity) en

%datasheet para 658.5nm

$I_6 = \text{eff} * P_6$;

%Tensión para el anillo

%6rx:

$V_1 = \text{trans}10 * I_6$;

$V_1 = I_6$;

%Intensidad óptica del anillo 12rx

%Con la eficiencia (responsivity) en

%datasheet para 658.5nm

I12=eff*P12;

%Tensión para el anillo

%12rx:

V2=trans30*I12;

%V2=I12;

%%%Factor de escala????

%%%en datasheet del

%%%fotodetector

%%%SF=Rload/(Rload+Rs)

T=0.7343*V2./V1;

%T=7.343*(I12./I6);

%%Anillo 6rx normalizado

%%plot(z,V1/max(V1));

%%Anillo 6rx sin normalizar

plot(z,V1);

hold on

%%Anillo 12rx normalizado

%%plot(z,V2/max(V2),'r');

%%Anillo 12rx sin

%%normalizar

%%%responsivity=0.42

eff=0.42;

%Intensidad óptica del anillo 6rx

%Con la eficiencia (responsivity) en

%datasheet para 658.5nm

I6=eff*P6;

%Tensión para el anillo

%6rx:

V1=trans10*I6;

%Intensidad óptica del anillo 12rx

%Con la eficiencia (responsivity) en

%datasheet para 658.5nm

I12=eff*P12;

%Tensión para el anillo

%12rx:

V2=trans30*I12;

T=0.7343*V2./V1;

%%Anillo 6rx normalizado

%%plot(z,V1/max(V1));

%%Anillo 6rx sin normalizar

plot(z,V1);

hold on

%%Anillo 12rx normalizado

%%plot(z,V2/max(V2),'r');

%%Anillo 12rx sin

%%normalizar

plot(z,V2,'r');

hold on

%Relación V2/V1

plot (z,T,'g');

hold on

legend ('V1', 'V2' , 'V2/V1');

title ('V1,V2 y V2/V1');

xlabel('Puntos evaluados (mm)');

ylabel('Tensión (V)');

xlswrite('matlab10-30 20 grados T.xlsx',T,'V2V1');

xlswrite('matlab10-30_20grados V1.xlsx',V1,'V1');

xlswrite('matlab10-30 20 grados V2.xlsx',V2,'V2');

case 3

clearvars eff;

%%%Trifurcado

%%láser 1

%%10-30

%%30°C

%%660+0.5=660.5nm

%%responsivity=0.43

eff=0.43;

%Intensidad óptica del anillo 6rx

%Con la eficiencia (responsivity) en

%datasheet para 658.5nm

I6=eff*P6;

%Tensión para el anillo

%6rx:

V1=trans10*I6;

%Intensidad óptica del anillo 12rx

%Con la eficiencia (responsivity) en

%datasheet para 658.5nm

I12=eff*P12;

%Tensión para el anillo

%12rx:

V2=trans30*I12;

T=0.7343*V2./V1;

%%Anillo 6rx normalizado


```
%%plot(z,V1/max(V1));  
  
%%Anillo 6rx sin normalizar  
  
plot(z,V1);  
  
hold on  
  
  
%%Anillo 12rx normalizado  
  
%%plot(z,V2/max(V2),'r');  
  
%%Anillo 12rx sin  
  
%%normalizar  
  
plot(z,V2,'r');  
  
hold on  
  
  
%Relación V2/V1  
  
plot (z,T,'g');  
  
hold on  
  
  
legend ( 'V1', 'V2' , 'V2/V1');  
title ('V1,V2 y V2/V1');  
xlabel('Puntos evaluados (mm)');  
ylabel('Tensión (V)');  
  
  
case 4  
  
  
clearvars eff;  
  
  
%%Trifurcado  
  
%%láser 1
```

%%10-30

%%40°C

%%660+1.5=661.5nm

%%responsivity=0.435

eff=0.435;

%Intensidad óptica del anillo 6rx

%Con la eficiencia (responsivity) en

%datasheet para 658.5nm

I6=eff*P6;

%Tensión para el anillo

%6rx:

V1=trans10*I6;

%Intensidad óptica del anillo 12rx

%Con la eficiencia (responsivity) en

%datasheet para 658.5nm

I12=eff*P12;

%Tensión para el anillo

%12rx:

V2=trans30*I12;

T=0.7343*V2./V1;

%%Anillo 6rx normalizado

```
%%plot(z,V1/max(V1));  
  
%%Anillo 6rx sin normalizar  
  
plot(z,V1);  
  
hold on  
  
  
%%Anillo 12rx normalizado  
  
%%plot(z,V2/max(V2),'r');  
  
%%Anillo 12rx sin  
  
%%normalizar  
  
plot(z,V2,'r');  
  
hold on  
  
  
%Relación V2/V1  
  
plot (z,T,'g');  
  
hold on  
  
  
legend ( 'V1', 'V2' , 'V2/V1');  
title ('V1,V2 y V2/V1');  
xlabel('Puntos evaluados (mm)');  
ylabel('Tensión (V)');  
  
case 5  
    continue  
  
end  
  
end
```

eman ta zabal zazu



Universidad
del País Vasco

Euskal Herriko
Unibertsitatea
