

ESCUELA DE INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN Y ELECTRÓNICA



TRABAJO FIN DE GRADO

EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE INTERFERENCIAS EN SISTEMAS DE ORIENTACIÓN EMBARCADOS EN DRONES LIGEROS

Titulación: Grado en Ingeniería en Tecnologías de la Telecomunicación

Mención: Sistemas Electrónicos

Autor: Daniel Hormigo Ruiz

Tutores: Dr. Francisco José Cabrera Almeida

Dr. Víctor Alexis Araña Pulido

Fecha: Julio de 2016

ESCUELA DE INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN Y ELECTRÓNICA



TRABAJO FIN DE GRADO

EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE INTERFERENCIAS EN
SISTEMAS DE ORIENTACIÓN EMBARCADOS EN DRONES
LIGEROS

HOJA DE FIRMAS

Firma de los tutores

Fdo.: Francisco José Cabrera Almeida

Fdo.: Víctor Alexis Araña Pulido

Firma del alumno

Fdo.: Daniel Hormigo Ruiz

Fecha: Julio de 2016

ESCUELA DE INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN Y ELECTRÓNICA



TRABAJO FIN DE GRADO

EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE INTERFERENCIAS EN
SISTEMAS DE ORIENTACIÓN EMBARCADOS EN DRONES
LIGEROS

HOJA DE EVALUACIÓN

Calificación: _____

Presidente

Secretario

Vocal

Fdo.: _____

Fdo.: _____

Fdo.: _____

Fecha: Julio de 2016

Índice de contenidos

Índice de contenidos	vii
Índice de figuras.....	xi
Índice de tablas.....	xxiii
Acrónimos.....	xxv
Capítulo 1. Introducción	3

1.1. Antecedentes.....	3
1.2. Objetivos	8
1.3. Peticionario	9
1.4. Organización del trabajo	9
Capítulo 2. Los sistemas de orientación y sus sensores.....	13
2.1. Sensores	13
2.1.1. Sistemas inerciales	14
2.1.1.1 Acelerómetro	14
2.1.1.2 Giróscopo	15
2.1.2. Magnetómetro	16
2.2. Sistemas de orientación	18
2.2.1. IMU (<i>Inertial Meausement Unit</i>).....	18
2.2.2. INS (<i>Inertial Navigation System</i>)	18
2.2.3. AHRS (<i>Attitude and Heading Reference System</i>)	19
2.3. Incidencia de los sensores en la medición	21
2.4. Sistema de orientación empleado.....	24
2.4.1. Calibración de los sensores.....	25
Capítulo 3. Diseño y montaje de la plataforma de pruebas	29
3.1. Medición	29
3.2. Diseño de las piezas de la estructura.	30
3.2.1. Diseño 1: Mediante reutilización de piezas	30
3.2.2. Diseño 2: Estructura formada por largueros y travesaño.	31
3.2.3. Diseño 3 y final: mezcla de los dos anteriores.....	33

3.3. Realización de piezas para el soporte mediante cortadora láser	37
3.4. Realización de piezas para el soporte mediante impresora 3D.....	38
3.5. Montaje del soporte.....	39
Capítulo 4. Evaluación de interferencias	41
4.1. Parámetros para criterios de evaluación	41
4.2. Consideraciones previas a la realización de la evaluación	45
4.3. Introducción y evaluación inicial de la señal de orientación y los sensores	48
4.4. Evidencias de la existencia de las interferencias	50
4.5. Interferencias mecánicas	54
4.6. Interferencias magnéticas.....	64
Capítulo 5. Mitigación del efecto de las interferencias magnéticas.....	71
5.1. Reducción del error mediante distanciamiento del sistema de la fuente	71
5.1.1. Consideraciones iniciales	71
5.1.2. Aplicación.....	72
5.2. Reducción del error mediante generación de interferencia dominante	78
5.3. Reducción del error mediante técnicas software.....	84
5.4. Realización de pruebas en vuelo	90
5.5. Conclusiones	93
Capítulo 6. Conclusiones.....	95
6.1. Resultados y revisión de objetivos	95
6.2. Líneas futuras.....	97
Bibliografía.....	99
Presupuesto.....	103

P 1. Recursos materiales	105
P 1.1. Recursos Hardware	106
P 1.2. Recursos Software	107
P 2. Recursos Humanos	107
P 3. Gastos en Material Fungible.....	110
P 4. Derechos de Visado del COIT	110
P 5. Aplicación de Impuestos.....	111
Anexos.....	113
Anexo A. Características 9DOF Razor IMU	115
Anexo B. Imágenes	117
Anexo C. Señales.....	119

Índice de figuras

<i>Figura 1.1. Datos incendios forestales en España</i>	3
<i>Figura 1.2. Sistema actual</i>	5
<i>Figura 1.3. Desvío existente entre la posición real y la georreferenciación</i>	6
<i>Figura 1.4. Relación de error en grados y error en metros</i>	7
<i>Figura 1.5. Curva de la relación de error en grados y error en metros</i>	8
<i>Figura 1.6. Metodología del presente Trabajo Fin de Grado</i>	11
<i>Figura 2.1. Funcionamiento del acelerómetro</i>	14
<i>Figura 2.2. Acelerómetro piezo-eléctrico</i>	15
<i>Figura 2.3. Principio de funcionamiento del giróscopo</i>	15
<i>Figura 2.4. Giróscopo MEMS</i>	16
<i>Figura 2.5. Líneas de campo magnético terrestre</i>	16
<i>Figura 2.6. Efecto de introducir un elemento pasivo (férico) en un campo magnético</i>	17
<i>Figura 2.7. Efecto de introducir elemento activo en un campo magnético</i>	17
<i>Figura 2.8. Unidad de Medidas Inerciales</i>	18
<i>Figura 2.9. Sistema de Navegación Inercial</i>	19
<i>Figura 2.10. Ángulos de navegación</i>	20
<i>Figura 2.11. Sistema de Referencia de Cabeceo y Actitud</i>	20

<i>Figura 2.12. Vectores de Campo Magnético.....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 2.13. Gráfica función arctan(x).....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 2.14. 9DOF Razor IMU.....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 2.15. Esquema de bloques de la 9DOF Razor IMU.....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 2.16. Calibración del acelerómetro.....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 2.17. Calibración del giróscopo.....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 2.18. Calibración del magnetómetro usando Processing.....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 2.19. Código Arduino con calibración realizada.....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 3.1. (Izquierda) Largo del gimbal. (Derecha) Altura del gimbal.....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 3.2. (Izquierda) Base reciclada. (Derecha) Soporte superior reciclado.....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 3.3. Diseño 2.....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 3.4. Distribución de los anclajes de la sujeción al trípode.....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 3.5. Distribución de los anclajes base-soportes laterales.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 3.6. Forma y distribución de anclajes del soporte superior.....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 3.7. De izquierda a derecha diseño de: la base, el soporte lateral y el soporte superior.....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 3.8. De izquierda a derecha: base, soporte lateral y soporte superior.....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 3.9. (Izq.) Diseño 3D del anclaje trípode-estructura. (Der.) Forma y montaje final.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 3.10. (Izq.) Diseño 3D del estabilizador. (Der.) Forma final.....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 3.11. Estructura final.....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 4.1. FDP con diferentes valores de kurtosis.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 4.2. Ejemplo de parámetros.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 4.3. Gimbal Tarot T-2D Brushless.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 4.4. Lugar de pruebas.....</i>	<i>46</i>

<i>Figura 4.5. Flujo de trabajo llevado a cabo en la evaluación de las interferencias.....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 4.6. Yaw con motores apagados y aislado del viento.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 4.7. Histograma yaw frontal en reposo.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 4.8. Evidencia de la existencia de interferencias.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 4.9. Comparativa de parámetros.....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 4.10. Comparativa de histogramas (I).....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 4.11. Aislamiento de la IMU del viento.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 4.12. Posicionamiento de la IMU a 2mm del gimbal.....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 4.13. Comparativa de yaw (I).....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 4.14. Comparativa de parámetros (II).....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 4.15. Comparativa de histogramas (I).....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 4.16. Señal magnética con la IMU pegada y despegada 2mm del gimbal.....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 4.17. Rango dinámico efectivo del magnetómetro (I).....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 4.18. Señal del acelerómetro con la IMU pegada y despegada 2mm del gimbal.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 4.19. Comparativa de parámetros (III).....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 4.20. Señal del giróscopo con la IMU pegada y despegada 2mm del gimbal.....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 4.21. Comparativa de parámetros (IV).....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 4.22. IMU en el frontal del gimbal.....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 4.23. Comparativa de yaw (II).....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 4.24. Comparativa de parámetros (V).....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 4.25. Comparativa de histogramas (II).....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 4.26. Comparativa de parámetros (VI).....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 4.27. Señal magnética con IMU en posición frontal-izquierdo.....</i>	<i>68</i>

<i>Figura 4.28. Comparativa de parámetros (VII)</i>	69
<i>Figura 5.1. Ley inversa del cuadrado</i>	72
<i>Figura 5.2 Posiciones de la IMU para evaluación</i>	72
<i>Figura 5.3. Campo magnético medido</i>	74
<i>Figura 5.4. Comparativa de parámetros (VIII)</i>	75
<i>Figura 5.5. Yaw en diferentes posiciones</i>	75
<i>Figura 5.6. Comparativa de parámetros (IX)</i>	76
<i>Figura 5.7. Comparativa de parámetros (X)</i>	77
<i>Figura 5.8. Comparativa de parámetros (XI)</i>	77
<i>Figura 5.9. Procedimiento de enmascaramiento</i>	78
<i>Figura 5.10. Chapa metálica empleada</i>	79
<i>Figura 5.11. Comparativa de rangos dinámicos eficaces</i>	80
<i>Figura 5.12. Campo magnético medido en cada uno de los casos</i>	80
<i>Figura 5.13. Comparativa de parámetros (XII)</i>	82
<i>Figura 5.14. Yaw calculado</i>	83
<i>Figura 5.15. Comparativa de parámetros (XIII)</i>	84
<i>Figura 5.16. Metodología seguida en el desarrollo software</i>	86
<i>Figura 5.17. Señal e histograma</i>	87
<i>Figura 5.18. Metodología para obtención de la probabilidad</i>	87
<i>Figura 5.19. Curva de probabilidades en función del tamaño de la ventana y del error deseado</i> ..	88
<i>Figura 5.20. Curvas de probabilidad de distintos errores en función del tamaño de la ventana</i>	88
<i>Figura 5.21. Yaw enventanadado</i>	89
<i>Figura 5.22. Sistema montado en dron</i>	91

<i>Figura 5.23. Gimbal en dron</i>	<i>91</i>
<i>Figura 5.24. Proceso de pruebas en vuelo</i>	<i>92</i>
<i>Figura B.1. Diseño 3D de la pieza de anclaje trípode-estructura</i>	<i>117</i>
<i>Figura B.2. Diseño 3D y real de la pieza de estabilización.....</i>	<i>117</i>
<i>Figura B.3. Estructura montada</i>	<i>118</i>
<i>Figura C.1. Medida acelerométrica en eje X IMU en posición frontal, motores apagados y aislado del viento</i>	<i>120</i>
<i>Figura C.2. Medida acelerométrica en eje Y IMU en posición frontal, motores apagados y aislado del viento</i>	<i>121</i>
<i>Figura C.3. Medida acelerométrica en eje Z IMU en posición frontal, motores apagados y aislado del viento</i>	<i>122</i>
<i>Figura C.4. Medida giroscópica en eje X IMU en posición frontal, motores apagados y aislado del viento</i>	<i>123</i>
<i>Figura C.5. Medida giroscópica en eje Y IMU en posición frontal, motores apagados y aislado del viento</i>	<i>124</i>
<i>Figura C.6. Medida giroscópica en eje Z IMU en posición frontal, motores apagados y aislado del viento</i>	<i>125</i>
<i>Figura C.7. Medida magnética en eje X IMU en posición frontal, motores apagados y aislado del viento</i>	<i>126</i>
<i>Figura C.8. Medida magnética en eje Y IMU en posición frontal, motores apagados y aislado del viento</i>	<i>127</i>
<i>Figura C.9. Medida magnética en eje Z IMU en posición frontal, motores apagados y aislado del viento</i>	<i>128</i>
<i>Figura C.10. Medida magnética en eje X IMU en posición lateral, pegada, aislada del viento y motores encendidos</i>	<i>129</i>

<i>Figura C.11. Medida magnética en eje X IMU en posición lateral, separada, aislada del viento y motores encendidos</i>	130
<i>Figura C.12. Medida magnética en eje Y IMU en posición lateral, pegada, aislada del viento y motores encendidos</i>	131
<i>Figura C.13. Medida magnética en eje Y IMU en posición lateral, separada, aislada del viento y motores encendidos</i>	132
<i>Figura C.14. Medida magnética en eje Z IMU en posición lateral, pegada, aislada del viento y motores encendidos</i>	133
<i>Figura C.15. Medida magnética en eje Z IMU en posición lateral, separada, aislada del viento y motores encendidos</i>	134
<i>Figura C.16. Medida acelerométrica en eje X IMU en posición lateral, pegada, aislada del viento y motores encendidos</i>	135
<i>Figura C.17. Medida acelerométrica en eje X IMU en posición lateral, separada, aislada del viento y motores encendidos</i>	136
<i>Figura C.18. Medida acelerométrica en eje Y IMU en posición lateral, pegada, aislada del viento y motores encendidos</i>	137
<i>Figura C.19. Medida acelerométrica en eje Y IMU en posición lateral, separada, aislada del viento y motores encendidos</i>	138
<i>Figura C.20. Medida acelerométrica en eje Z IMU en posición lateral, pegada, aislada del viento y motores encendidos</i>	139
<i>Figura C.21. Medida acelerométrica en eje Z IMU en posición lateral, separada, aislada del viento y motores encendidos</i>	140
<i>Figura C.22. Medida giroscópica en eje X IMU en posición lateral, pegada, aislada del viento y motores encendidos</i>	141
<i>Figura C.23. Medida giroscópica en eje X IMU en posición lateral, separada, aislada del viento y motores encendidos</i>	142

<i>Figura C.24. Medida giroscópica en eje Y IMU en posición lateral, pegada, aislada del viento y motores encendidos</i>	143
<i>Figura C.25. Medida giroscópica en eje Y IMU en posición lateral, separada, aislada del viento y motores encendidos</i>	144
<i>Figura C.26. Medida giroscópica en eje Z IMU en posición lateral, pegada, aislada del viento y motores encendidos</i>	145
<i>Figura C.27. Medida giroscópica en eje Z IMU en posición lateral, separada, aislada del viento y motores encendidos</i>	146
<i>Figura C.28. Medida acelerométrica en eje X con IMU en posición frontal, aislada del viento y motores apagados</i>	147
<i>Figura C.29. Medida acelerométrica en eje X con IMU en posición frontal, aislada del viento y motores encendidos</i>	148
<i>Figura C.30. Medida acelerométrica en eje Y con IMU en posición frontal, aislada del viento y motores apagados</i>	149
<i>Figura C.31. Medida acelerométrica en eje Y con IMU en posición frontal, aislada del viento y motores encendidos</i>	150
<i>Figura C.32. Medida acelerométrica en eje Z con IMU en posición frontal, aislada del viento y motores apagados</i>	151
<i>Figura C.33. Medida acelerométrica en eje Z con IMU en posición frontal, aislada del viento y motores encendidos</i>	152
<i>Figura C.34. Medida giroscópica en eje X con IMU en posición frontal, aislada del viento y motores apagados</i>	153
<i>Figura C.35. Medida giroscópica en eje X con IMU en posición frontal, aislada del viento y motores encendidos</i>	154
<i>Figura C.36. Medida giroscópica en eje Y con IMU en posición frontal, aislada del viento y motores apagados</i>	155

<i>Figura C.37. Medida giroscópica en eje Y con IMU en posición frontal, aislada del viento y motores encendidos.....</i>	<i>156</i>
<i>Figura C.38. Medida giroscópica en eje Z con IMU en posición frontal, aislada del viento y motores apagados</i>	<i>157</i>
<i>Figura C.39. Medida giroscópica en eje Z con IMU en posición frontal, aislada del viento y motores encendidos.....</i>	<i>158</i>
<i>Figura C.40. Medida magnética en eje X con IMU en posición frontal, aislada del viento y motores apagados</i>	<i>159</i>
<i>Figura C.41. Medida magnética en eje X con IMU en posición frontal, aislada del viento y motores encendidos.....</i>	<i>160</i>
<i>Figura C.42. Medida magnética en eje Y con IMU en posición frontal, aislada del viento y motores apagados</i>	<i>161</i>
<i>Figura C.43. Medida magnética en eje Y con IMU en posición frontal, aislada del viento y motores encendidos.....</i>	<i>162</i>
<i>Figura C.44. Medida magnética en eje Z con IMU en posición frontal, aislada del viento y motores apagados</i>	<i>163</i>
<i>Figura C.45. Medida magnética en eje Z con IMU en posición frontal, aislada del viento y motores encendidos.....</i>	<i>164</i>
<i>Figura C.46. Medida magnética en eje X con IMU en posición frontal y motores encendidos</i>	<i>165</i>
<i>Figura C.47. Medida magnética en eje X con IMU en posición lateral izquierdo y motores encendidos</i>	<i>166</i>
<i>Figura C.48. Medida magnética en eje X con IMU en posición inferior y motores encendidos....</i>	<i>167</i>
<i>Figura C.49. Medida magnética en eje Y con IMU en posición frontal y motores encendidos</i>	<i>168</i>
<i>Figura C.50. Medida magnética en eje Y con IMU en posición lateral izquierdo y motores encendidos</i>	<i>169</i>
<i>Figura C.51. Medida magnética en eje Y con IMU en posición inferior y motores encendidos....</i>	<i>170</i>

<i>Figura C.52. Medida magnética en eje Z con IMU en posición frontal y motores encendidos</i>	<i>171</i>
<i>Figura C.53. Medida magnética en eje Z con IMU en posición lateral izquierdo y motores encendidos</i>	<i>172</i>
<i>Figura C.54. Medida magnética en eje Z con IMU en posición inferior y motores encendidos....</i>	<i>173</i>
<i>Figura C.55. Medida acelerométrica en eje X con IMU en posición frontal y motores encendidos</i>	<i>174</i>
<i>Figura C.56. Medida acelerométrica en eje X con IMU en posición lateral izquierdo y motores encendidos.....</i>	<i>175</i>
<i>Figura C.57. Medida acelerométrica en eje X con IMU en posición inferior y motores encendidos</i>	<i>176</i>
<i>Figura C.58. Medida acelerométrica en eje Y con IMU en posición frontal y motores encendidos</i>	<i>177</i>
<i>Figura C.59. Medida acelerométrica en eje Y con IMU en posición lateral izquierdo y motores encendidos.....</i>	<i>178</i>
<i>Figura C.60. Medida acelerométrica en eje Y con IMU en posición inferior y motores encendidos</i>	<i>179</i>
<i>Figura C.61. Medida acelerométrica en eje Z con IMU en posición frontal y motores encendidos</i>	<i>180</i>
<i>Figura C.62. Medida acelerométrica en eje Z con IMU en posición lateral izquierdo y motores encendidos.....</i>	<i>181</i>
<i>Figura C.63. Medida acelerométrica en eje Z con IMU en posición inferior y motores encendidos</i>	<i>182</i>
<i>Figura C.64. Medida giroscópica en eje X con IMU en posición frontal y motores encendidos ...</i>	<i>183</i>
<i>Figura C.65. Medida giroscópica en eje X con IMU en posición lateral izquierdo y motores encendidos.....</i>	<i>184</i>
<i>Figura C.66. Medida giroscópica en eje X con IMU en posición inferior y motores encendidos ..</i>	<i>185</i>

<i>Figura C.67. Medida giroscópica en eje Y con IMU en posición frontal y motores encendidos ...</i>	<i>186</i>
<i>Figura C.68. Medida giroscópica en eje Y con IMU en posición lateral izquierdo y motores encendidos.....</i>	<i>187</i>
<i>Figura C.69. Medida giroscópica en eje Y con IMU en posición inferior y motores encendidos ..</i>	<i>188</i>
<i>Figura C.70. Medida giroscópica en eje Z con IMU en posición frontal y motores encendidos ...</i>	<i>189</i>
<i>Figura C.71. Medida giroscópica en eje Z con IMU en posición lateral izquierdo y motores encendidos.....</i>	<i>190</i>
<i>Figura C.72. Medida giroscópica en eje Z con IMU en posición inferior y motores encendidos ..</i>	<i>191</i>
<i>Figura C.73. Medida acelerométrica en eje X sin metal (peor caso)</i>	<i>192</i>
<i>Figura C.74. Medida acelerométrica en eje X sin metal (mejor caso)</i>	<i>193</i>
<i>Figura C.75. Medida acelerométrica en eje Y sin metal (peor caso).....</i>	<i>194</i>
<i>Figura C.76. Medida acelerométrica en eje Y sin metal (mejor caso)</i>	<i>195</i>
<i>Figura C.77. Medida acelerométrica en eje Z sin metal (peor caso).....</i>	<i>196</i>
<i>Figura C.78. Medida acelerométrica en eje Z sin metal (mejor caso)</i>	<i>197</i>
<i>Figura C.79. Medida acelerométrica en eje X con metal (peor caso)</i>	<i>198</i>
<i>Figura C.80. Medida acelerométrica en eje X con metal (mejor caso).....</i>	<i>199</i>
<i>Figura C.81. Medida acelerométrica en eje Y con metal (peor caso)</i>	<i>200</i>
<i>Figura C.82. Medida acelerométrica en eje Y con metal (mejor caso)</i>	<i>201</i>
<i>Figura C.83. Medida acelerométrica en eje Z con metal (peor caso)</i>	<i>202</i>
<i>Figura C.84. Medida acelerométrica en eje Z con metal (mejor caso).....</i>	<i>203</i>
<i>Figura C.85. Medida giroscópica en eje X sin metal (peor caso)</i>	<i>204</i>
<i>Figura C.86. Medida giroscópica en eje X sin metal (mejor caso)</i>	<i>205</i>
<i>Figura C.87. Medida giroscópica en eje Y sin metal (peor caso).....</i>	<i>206</i>
<i>Figura C.88. Medida giroscópica en eje Y sin metal (mejor caso).....</i>	<i>207</i>

<i>Figura C.89. Medida giroscópica en eje Z sin metal (peor caso)</i>	208
<i>Figura C.90. Medida giroscópica en eje Z sin metal (mejor caso)</i>	209
<i>Figura C.91. Medida giroscópica en eje X con metal (peor caso)</i>	210
<i>Figura C.92. Medida giroscópica en eje X con metal (mejor caso)</i>	211
<i>Figura C.93. Medida giroscópica en eje Y con metal (peor caso)</i>	212
<i>Figura C.94. Medida giroscópica en eje Y con metal (mejor caso)</i>	213
<i>Figura C.95. Medida giroscópica en eje Z con metal (peor caso)</i>	214
<i>Figura C.96. Medida giroscópica en eje Z con metal (mejor caso)</i>	215
<i>Figura C.97. Medida magnética en eje X sin metal (peor caso)</i>	216
<i>Figura C.98. Medida magnética en eje X sin metal (mejor caso)</i>	217
<i>Figura C.99. Medida magnética en eje Y sin metal (peor caso)</i>	218
<i>Figura C.100. Medida magnética en eje Y sin metal (mejor caso)</i>	219
<i>Figura C.101. Medida magnética en eje Z sin metal (peor caso)</i>	220
<i>Figura C.102. Medida magnética en eje Z sin metal (mejor caso)</i>	221
<i>Figura C.103. Medida magnética en eje X con metal (peor caso)</i>	222
<i>Figura C.104. Medida magnética en eje X con metal (mejor caso)</i>	223
<i>Figura C.105. Medida magnética en eje Y con metal (peor caso)</i>	224
<i>Figura C.106. Medida magnética en eje Y con metal (mejor caso)</i>	225
<i>Figura C.107. Medida magnética en eje Z con metal (peor caso)</i>	226
<i>Figura C.108. Medida magnética en eje Z con metal (mejor caso)</i>	227
<i>Figura C.109. Yaw medido (peor caso)</i>	228

Índice de tablas

<i>Tabla 2.1. Máximo y mínimo del acelerómetro</i>	<i>26</i>
<i>Tabla 3.1. Dimensiones de las bases</i>	<i>33</i>
<i>Tabla 3.2. Distancias entre anclajes de la base y su diámetro.....</i>	<i>34</i>
<i>Tabla 3.3. Distribución espacial de los anclajes trípode-base.....</i>	<i>34</i>
<i>Tabla 3.4. Distribución de los anclajes base - soporte lateral respecto de los bordes.....</i>	<i>35</i>
<i>Tabla 3.5. Dimensiones del soporte superior.....</i>	<i>36</i>
<i>Tabla 3.6. Distribución espacial de los anclajes del soporte superior.....</i>	<i>36</i>
<i>Tabla 4.1. Parámetros de la señal de orientación en frontal con los motores apagados</i>	<i>48</i>
<i>Tabla 4.2. Comparativa de rangos dinámicos presentes en las señales de los sensores.....</i>	<i>50</i>
<i>Tabla P.1. Costes de las herramientas hardware</i>	<i>106</i>
<i>Tabla P.2. Costes de las herramientas software.....</i>	<i>107</i>
<i>Tabla P.3. Valores de la variable C_t en función de las horas trabajadas.....</i>	<i>108</i>
<i>Tabla P.4. Presupuesto de los costes materiales y tarifado por tiempo empleado</i>	<i>109</i>
<i>Tabla P.5. Costes del material fungible.....</i>	<i>110</i>
<i>Tabla P.6. Presupuesto total del Trabajo Fin de Grado.....</i>	<i>112</i>
<i>Tabla A.1. Dimensiones físicas y alimentación y consumo.....</i>	<i>115</i>
<i>Tabla A.2 Condiciones de funcionamiento e interfaz de comunicaciones.....</i>	<i>116</i>

Acrónimos

ACRÓNIMO	DESCRIPCIÓN
UAV	<i>Unmanned Aerial Vehicle</i>
VANT	Vehículo Aéreo No Tripulado
IMU	Unidad de Medidas Inerciales
INS	Sistema de Navegación Inercial
AHRS	Sistema de Referencia de Cabeceo y Actitud
DR	<i>Dynamic Range</i> (Rango dinámico)
EDR	<i>Effective Dynamic Range</i> (Rango Dinámico Efectivo)
fdp	Función de Densidad de Probabilidad
A_n	Acelerómetro eje n
G_n	Giróscopo eje n
M_n	Magnetómetro eje n
S_n	Señal n

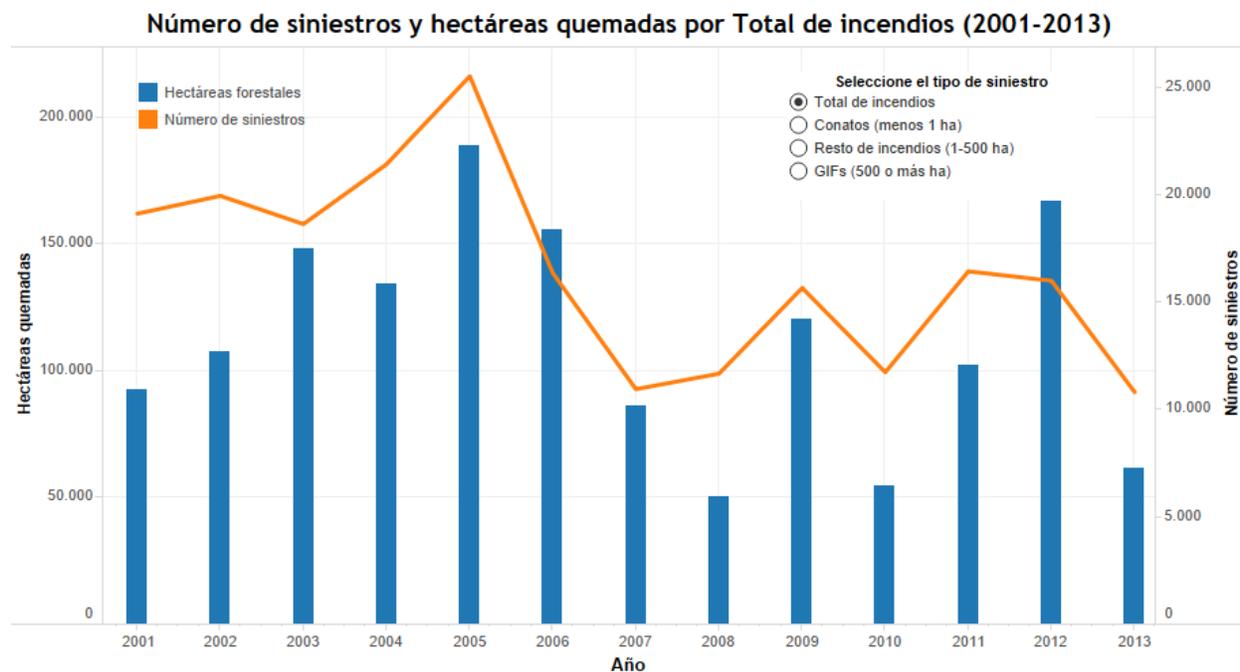
Parte I

Memoria

Capítulo 1. Introducción

1.1. Antecedentes

Los incendios forestales son un problema que genera la pérdida de grandes cantidades de terreno forestal: desde el año 2001 hasta el año 2013 se han quemado 1.514.312 hectáreas forestales (Figura 1.1), el equivalente a incendiar aproximadamente 10 veces la isla de Gran Canaria [1, 2].



Fuente: EGIF MAGRAMA / Elaboración propia

Figura 1.1. Datos incendios forestales en España

Desde hace unos años en el Instituto para el Desarrollo Tecnológico y la Innovación en Comunicaciones (IDeTIC), se ha abierto una línea de investigación de I+D+i en torno a la aplicación de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (TIC) en la detección y seguimiento de líneas de fuego en incendios forestales. Fruto de esta línea de I+D+i son los sistemas desarrollados gracias a dos proyectos:

- El primero de ellos es el sistema diseñado en el proyecto SeLIF [3]. En él se diseñó un sistema de detección y seguimiento de líneas de fuego en incendios forestales para una estación base móvil terrena. Al ser una técnica que opera desde tierra y alejado del foco del incendio, evita los problemas derivados de las fuertes turbulencias de aire presentes en las zonas cercanas al foco, y máxime en orografía abrupta.
- El segundo de ellos es el proyecto financiado por la Fundación Biodiversidad [4] en el que se está trasladando el sistema diseñado en el proyecto SeLIF a un UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*), también conocido como VANT (Vehículo Aéreo No Tripulado) o dron [5]. De esta manera se posiciona la cámara a una cierta altura, obteniendo como resultado una mayor visibilidad y movilidad. En este caso, el dron se debe mantener estático para tomar imágenes y poder georreferenciarlas.

Para el desarrollo de este último sistema se han realizado varios Trabajos Fin de Grado en los que se ha evaluado el uso de un dron multirrotor para este proyecto [6], y diseñado partes del sistema como es el módulo de comunicaciones y telemetría del dron con la base terrena [7], o el sistema de guiado del UAV hacia la estación de carga asistido por imágenes [8]. Con todo esto, el sistema estaría compuesto por un dron multirrotor donde se ubicará una cámara termográfica que nos permite detectar los incendios analizando los datos térmicos obtenidos en cada imagen [9], un gimbal que mediante el uso de motores permite mantener la cámara termográfica estable e inmóvil a pesar de que el dron esté en movimiento [10], una cámara convencional para la toma de imágenes, un sistema de posicionamiento formado por un GPS y un altímetro y una Unidad de Medida Inercial (IMU) encargada de proporcionar la orientación, formada por un magnetómetro, un giróscopo y un acelerómetro.

La orientación del dron se puede obtener de dos maneras:

- Mediante GPS: nos permite obtener la orientación del dron teniendo en cuenta la relación entre su posición anterior y la actual [11].
- Mediante magnetómetro: nos permite obtener la orientación del dron cuando este está en movimiento o estático, pues nos permite obtener la desviación del dron respecto al Norte magnético terrestre [12].

En el caso que nos concierne, el dron estará posicionado estáticamente tomando imágenes de la zona para, posteriormente, georreferenciar las imágenes tomadas. Para ello, debemos obtener los ángulos de navegación *pitch*, *roll* y *yaw* del dron. En uno de los proyectos anteriores [6] en los que se realizaron pruebas de toma de imagen desde dron (Figura 1.2) para posteriormente ser georreferenciadas, se observó que existían desplazamientos derivados de errores en la toma de datos del sistema de orientación, principalmente del yaw (Figura 1.3).



Figura 1.2. Sistema actual

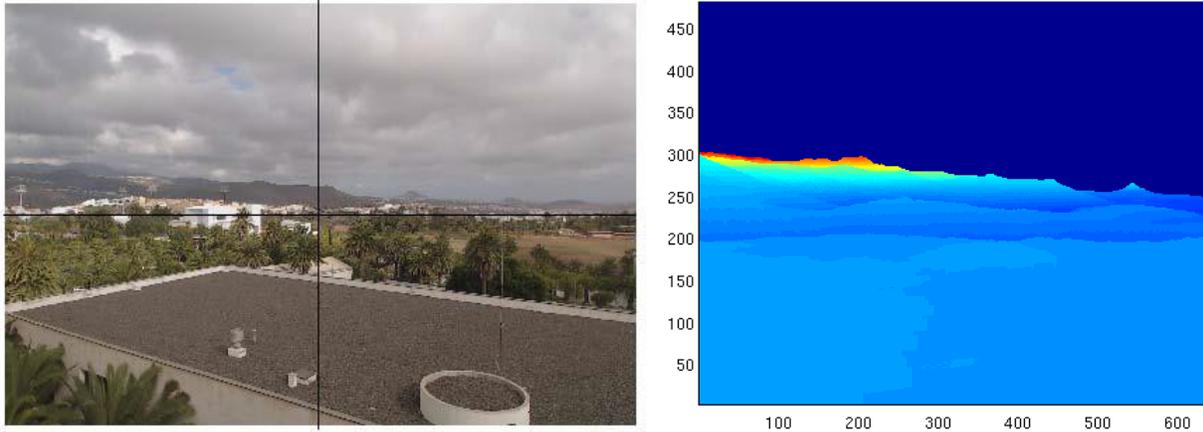


Figura 1.3. Desvío existente entre la posición real y la georreferenciación

Los ángulos *pitch* y *roll* del dron son medidos usando sensores inerciales, que están relacionados al movimiento. Al estar relacionados al movimiento, todo aquel fenómeno que desplace al sistema y ejerza una fuerza sobre éste, conllevará un error en la medida y será considerado como una interferencia. En cuanto a la orientación (*yaw*) del dron, depende de los ángulos *pitch* y *roll* mencionados anteriormente y del magnetómetro, un sistema muy sensible y cuyas medidas son perturbadas fácilmente. Tal es la magnitud de este hecho que, aun estando estático y sin aparentes fuentes de interferencia magnética que puedan afectarle, experimenta variaciones en su medida, razón por la que hay que caracterizarlo en estática, antes de embarcarlo en el dron. Además, dada la fuente de información del magnetómetro, el problema se incrementará cuando éste coexista con los motores del gimbal y del dron. Por lo tanto, es necesario evaluar las posibles interferencias magnéticas y mecánicas que puedan perturbar el cálculo de la orientación, y estudiar y aplicar técnicas que nos permitan disminuir el efecto que tienen estas interferencias sobre la medición de la orientación.

El principal problema de la existencia de variaciones en la medida de la orientación, es que un determinado error α en ángulo respecto del punto de interés, conlleva un error e en distancia que variará en función de la distancia r a la que se encuentre el observador del punto de interés (Figura 1.4). Para calcular el desvío e hay que calcular los catetos L_1 y L_3 del triángulo sombreado, siendo necesario calcular previamente el cateto L_2 , descrito por su relación con el seno del ángulo complementario de α (ecuación 1.1).

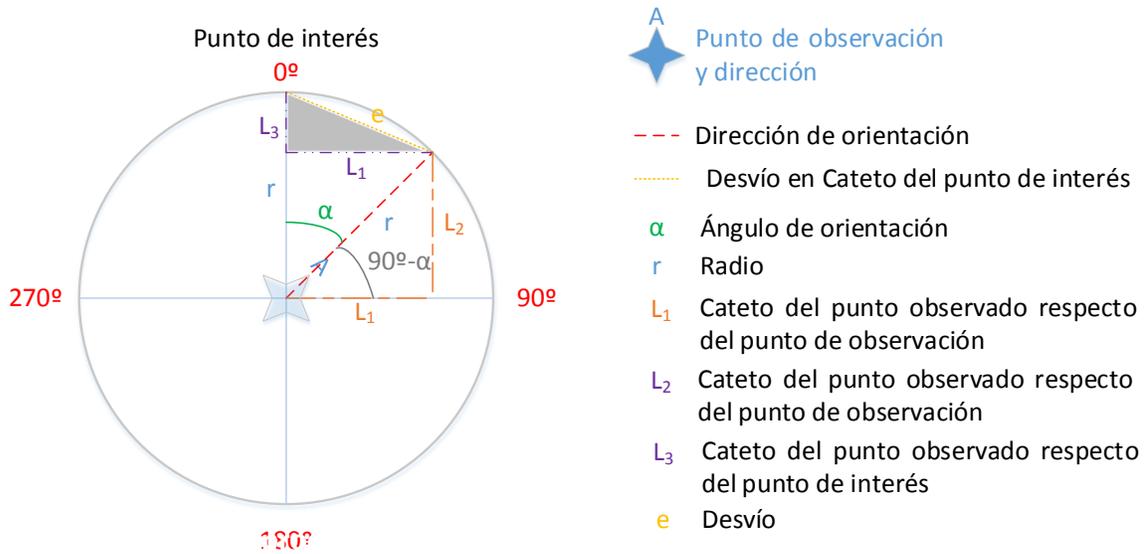


Figura 1.4. Relación de error en grados y error en metros

$$\text{sen}(90^\circ - \alpha) = \frac{L_2}{r} \rightarrow L_2 = r * \text{sen}(90^\circ - \alpha) \quad (\text{Ec. 1.1})$$

En cuanto al cateto L_1 , viene descrito a través de su relación con el coseno del ángulo complementario de α (ecuación 1.2).

$$\text{cos}(90^\circ - \alpha) = \frac{L_1}{r} \rightarrow L_1 = r * \text{sen}(90^\circ - \alpha) \quad (\text{Ec. 1.2})$$

El cateto L_3 se calcula como la diferencia existente entre el radio r y el cateto L_2 (ecuación 1.3), por lo que, finalmente, el desvío e cometido viene descrito por el Teorema de Pitágoras donde la hipotenusa es e y los catetos son L_3 y L_1 (ecuación 1.4), y cuya curva es la de la Figura 1.5, donde se observa que a medida que aumenta la dispersión de la orientación y la distancia r , aumenta el desvío e cometido.

$$L_3 = r - L_2 \quad (\text{Ec. 1.3})$$

$$e = \sqrt{L_3^2 + L_1^2} \quad (\text{Ec. 1.4})$$

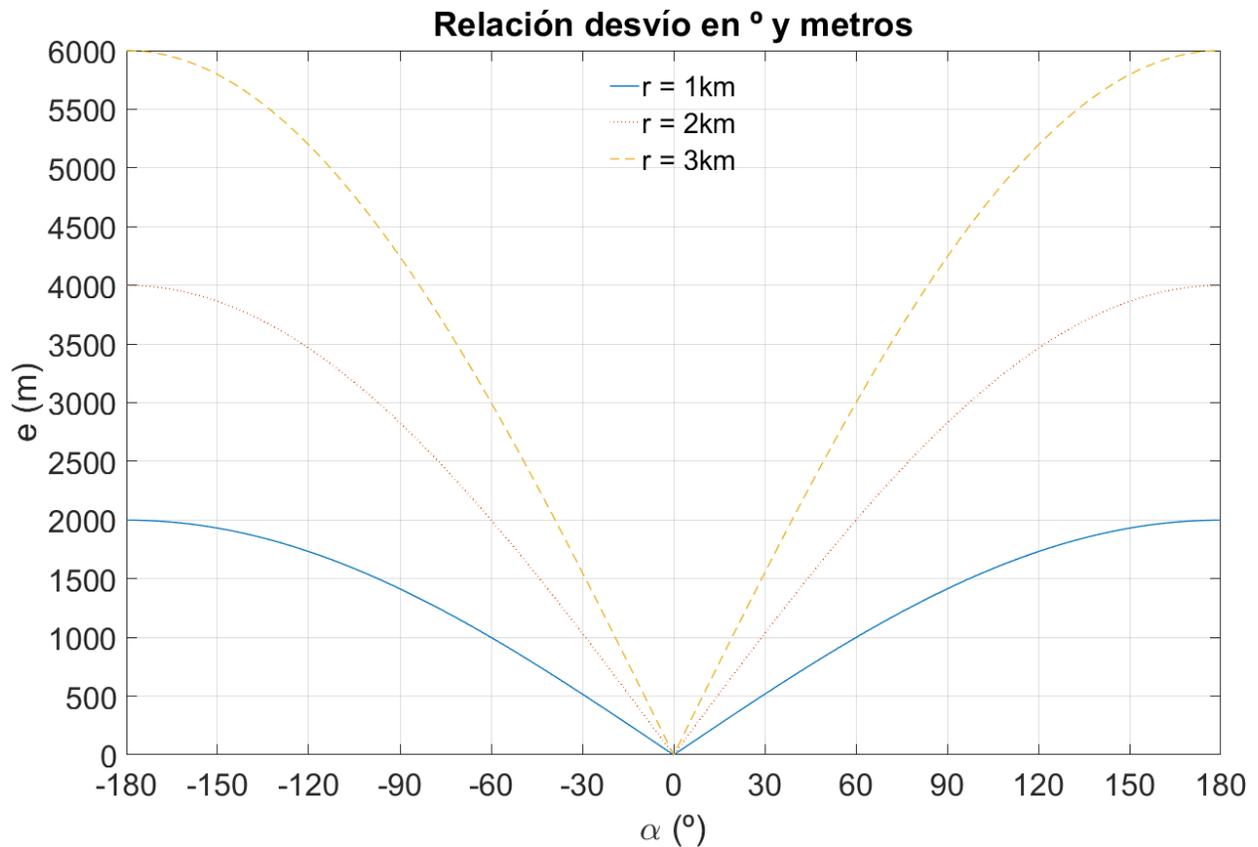


Figura 1.5. Curva de la relación de error en grados y error en metros

Un error en la determinación del ángulo evita que el incendio se pueda localizar con precisión. Por ejemplo, un error de 1° a una distancia de 3 km conlleva 52 metros de desvío.

1.2. Objetivos

El objetivo de este trabajo es evaluar y disminuir el efecto de las interferencias en sistemas de orientación embarcados en drones ligeros. Para ello, será necesario estudiar las interferencias electromagnéticas producidas por los dispositivos que coexisten con el magnetómetro en el dron y que puedan afectarle, especialmente las provocadas por los motores del gimbal, así como las interferencias mecánicas producidas por fuentes externas, tales como la vibración de los motores del gimbal y del dron. Además, aplicar técnicas *hardware* y *software* para la reducción del efecto de dichas interferencias sobre el cálculo de la orientación.

De esta manera, los objetivos secundarios serían la realización de un banco y procedimientos de caracterización y evaluación de las interferencias electromagnéticas y mecánicas existentes, y estudiar posibles soluciones que puedan minimizar las interferencias y mejorar la orientación estática del dron.

1.3. Peticionario

Tras haber superado satisfactoriamente las asignaturas especificadas en el Grado en Ingeniería en Tecnologías de la Telecomunicación con mención en Sistemas Electrónicos impartida por la Escuela de Ingeniería de Telecomunicación y Electrónica de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, se solicita, como requisito indispensable para la obtención del título de Graduado en Ingeniería en Tecnologías de la Telecomunicación, el desarrollo, la redacción, la exposición y la defensa de un Trabajo Fin de Grado.

1.4. Organización del trabajo

Teniendo en cuenta que la realización de pruebas finales en vuelo no fue posible debido a adversidades meteorológicas (viento, lluvia...), la metodología resultante seguida en este Trabajo Fin de Grado es la presente en la Figura 1.6, en la que se distinguen cuatro fases:

Fase 1. *Evaluación inicial del sistema de orientación*: en esta fase se determina la existencia de la oscilación de la señal de orientación obtenida y de los sensores integrados.

Fase 2. *Caracterización de las interferencias mecánicas*: en esta fase se realiza la evaluación y caracterización de las interferencias mecánicas que afectan al sistema de orientación. Para ello, se aísla el sistema del viento, se realiza la lectura de los sensores inerciales y de la orientación y se comparan los datos obtenidos con los motores del estabilizador apagados y encendidos.

Fase 3. *Caracterización de las interferencias magnéticas*: en esta fase se realiza la evaluación y caracterización de las interferencias magnéticas que afectan al sistema de orientación, de manera que se construye un banco de datos sobre el que basar las

comparaciones siguientes. Para llevar a cabo esta fase, se aísla mecánicamente el sistema del estabilizador, se realiza la lectura del magnetómetro y de la orientación obtenida y se comparan los datos obtenidos.

Fase 4. *Evaluación de técnicas de reducción de dispersión*: esta es la última fase del presente Trabajo Fin de Grado, y en él se realiza la evaluación y comparación de diferentes técnicas *hardware* y *software* para reducir la dispersión obtenida en la señal de orientación.

Siguiendo la metodología descrita anteriormente, el presente documento está compuesto por tres partes claramente diferenciadas: la memoria descriptiva, el presupuesto y el anexo. La memoria descriptiva se divide en 6 capítulos, además de la bibliografía utilizada. Inicialmente, en el Capítulo 2, se describen los sistemas de orientación, los sensores que lo integran y los diferentes tipos de sistemas de orientación. Posteriormente, en el Capítulo 3, dado que este trabajo está enfocado a caracterizar y evaluar las interferencias que puedan afectar a los sistemas de orientación, se describe el procedimiento seguido para el diseño y montaje de la plataforma de pruebas en tierra, pues es necesario caracterizarlas antes de embarcarlo en el dron. A continuación, en el Capítulo 4 se introduce al lector el sistema de orientación usado en este trabajo, así como la problemática encontrada y cómo se realizará el análisis de la información para, en el Capítulo 5, desarrollar los métodos seguidos para reducir el efecto de las interferencias, además de exponer los resultados obtenidos y la preparación del dron para las pruebas finales. Finalmente, se plantearán las conclusiones extraídas y las líneas futuras de investigación en el Capítulo 6. En cuanto los anexos del presente documento, el Anexo A alojará aquellas imágenes que, aun siendo importantes en el desarrollo de este trabajo, se ha decidido no plasmar en los capítulos principales de la memoria para no distraer al lector. En el Anexo B se definen las características del sistema de orientación usado y en el en el Anexo C se encontrarán las señales usadas en el análisis.

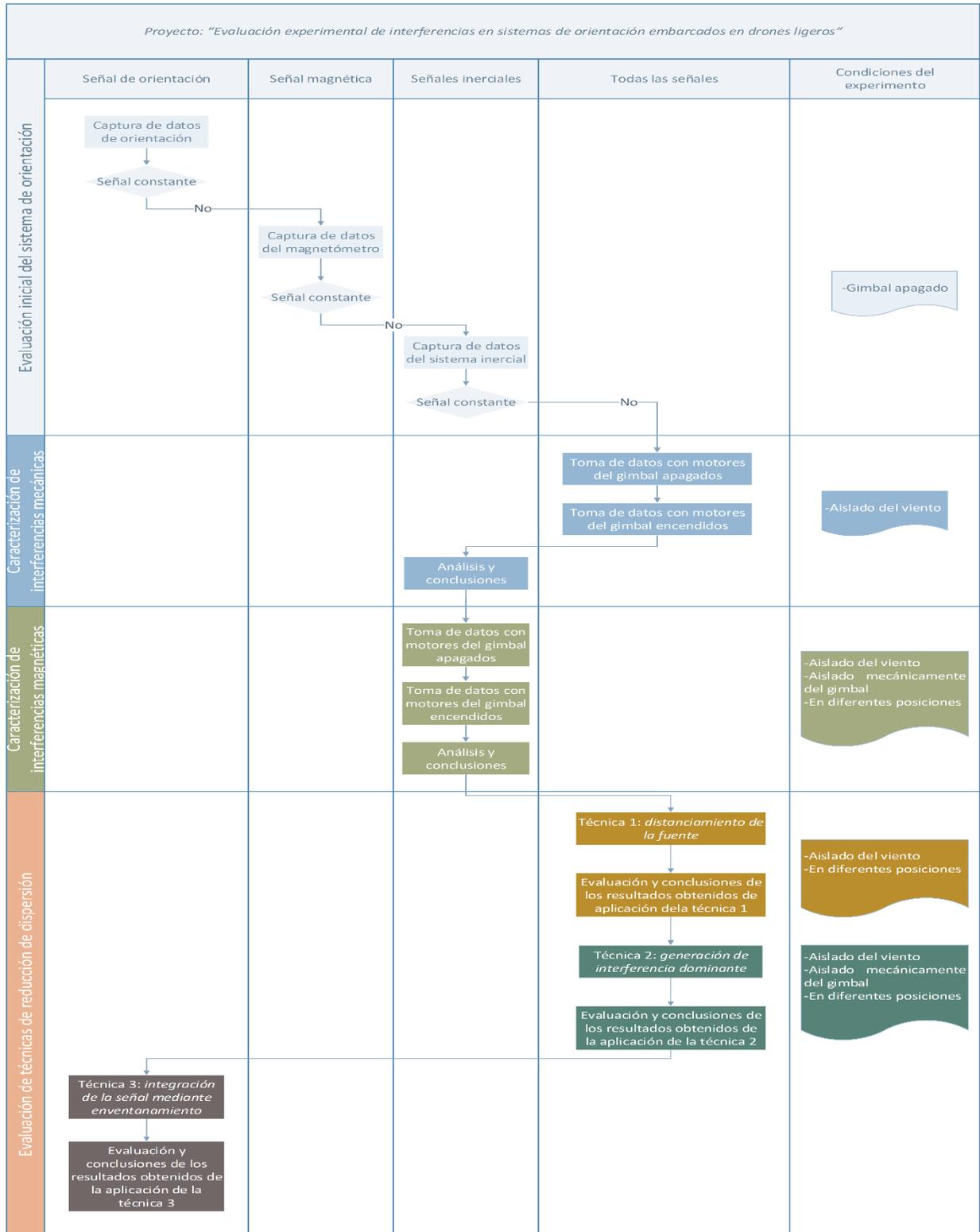


Figura 1.6. Metodología del presente Trabajo Fin de Grado

Capítulo 2. Los sistemas de orientación y sus sensores

En este capítulo estudiaremos cuáles son los sensores usados en los sistemas de orientación y cuál es el peso de cada uno dentro de las medidas. Además, se describen los tipos de sistemas de orientación existentes.

2.1. Sensores

Una parte básica en los sistemas de orientación son los sensores que permitirán calcular la orientación del dispositivo que integra este tipo de sistemas. Existen dos tipos de sensores esenciales:

1. Sistemas inerciales.

Los sistemas, o sensores, inerciales son aquellos ligados al movimiento y su campo de medida son la fuerza gravitatoria y las fuerzas inerciales ejercidas sobre ellos.

2. Magnetómetro.

El magnetómetro es un sensor cuya medida es la intensidad del campo magnético que lo rodea.

2.1.1. Sistemas inerciales

Se denominan sistemas inerciales a aquellos sistemas que usan la propiedad de inercia, es decir, la resistencia de un cuerpo a un cambio en el momento, para obtener mediciones de velocidad, rotación y fuerzas gravitacionales. Dentro de este grupo, existen dos sensores que permiten obtener datos relativos al movimiento angular y cambio en el movimiento lineal: el giróscopo y el acelerómetro respectivamente.

2.1.1.1 Acelerómetro

El acelerómetro mide las tres componentes de la fuerza de inercia que genera un cambio en el movimiento lineal del sensor. En la Figura 2.1 se ejemplifica el funcionamiento del acelerómetro.

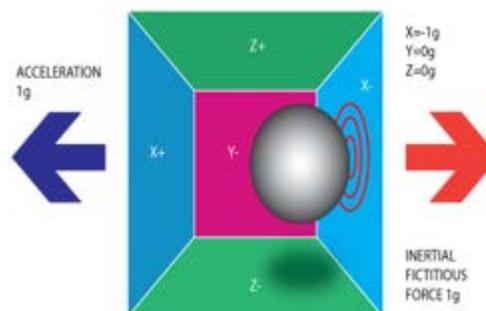


Figura 2.1. Funcionamiento del acelerómetro

Cuando el acelerómetro es sometido a una fuerza que provoca un cambio de movimiento en la masa inercial interna (en el caso de la Figura 2.1, una bolita), ésta se mueve en la dirección opuesta a la dirección de la fuerza ejercida. Hasta hace algunos años, el cálculo de la dirección de la fuerza ejercida se realizaba sabiendo en qué pared y con qué intensidad ha chocado, pero en la actualidad, existe un mayor número de sensores que permiten medir velocidades como pueden ser los acelerómetros piezo-eléctricos (Figura 2.2), que generan corrientes cuando se deforma su cristal interno, y muchos más [13]. De esta manera, sabiendo la dirección en la que una fuerza es ejercida sobre un cuerpo, se puede saber la dirección hacia la que éste se está moviendo, por lo que el objetivo de este sensor es determinar la dirección del movimiento del sistema en el que está integrado.

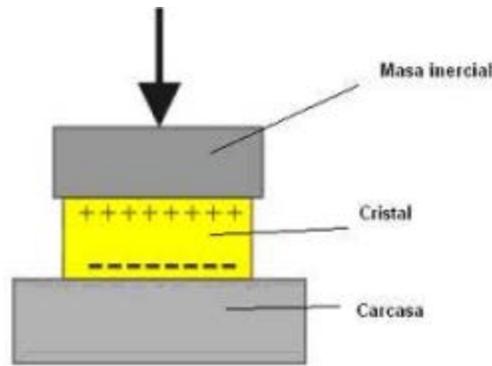


Figura 2.2. Acelerómetro piezo-eléctrico.

2.1.1.2 Giróscopo

El giróscopo es un sensor capaz de medir la aceleración angular de un sistema y ofrecer información sobre la orientación del sistema respecto de un eje inicial gracias a su principio de funcionamiento. Su principio de funcionamiento es la conservación del momento angular, en el que se define que cuando se altera la posición de un sistema que gira en torno a un eje, esto conlleva un cambio en su vector de velocidad, y a través de la relación entre ambos vectores de velocidad se puede calcular la orientación (Figura 2.3) [14, 15].

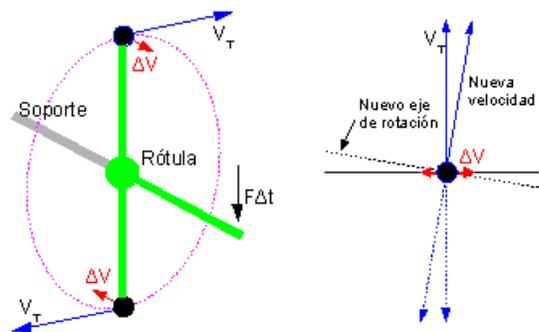


Figura 2.3. Principio de funcionamiento del giróscopo

En la actualidad existen los giróscopos electrónicos, en los que una masa interna se desplaza con las variaciones de la velocidad angular del sistema y genera corrientes variables (Figura 2.4) [15].

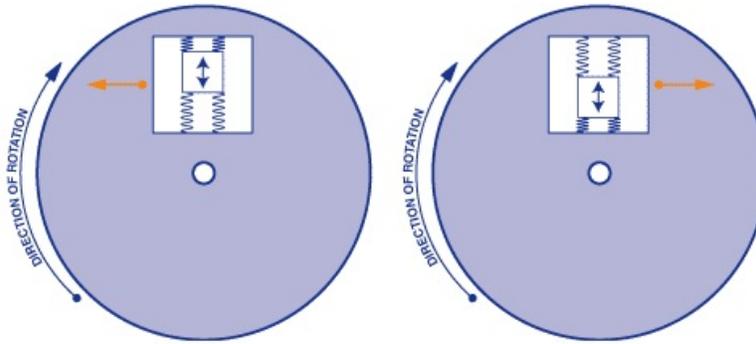


Figura 2.4. Giróscopo MEMS

2.1.2. Magnetómetro

Un magnetómetro es un dispositivo capaz medir la fuerza del campo magnético terrestre, cuya distribución de líneas de campo es la presente en la Figura 2.5. Gracias a este hecho, el magnetómetro nos permite obtener la orientación de un objeto respecto del Norte magnético terrestre, campo magnético que existe gracias a que la Tierra posee un núcleo de hierro fundido que está siempre en movimiento [12].

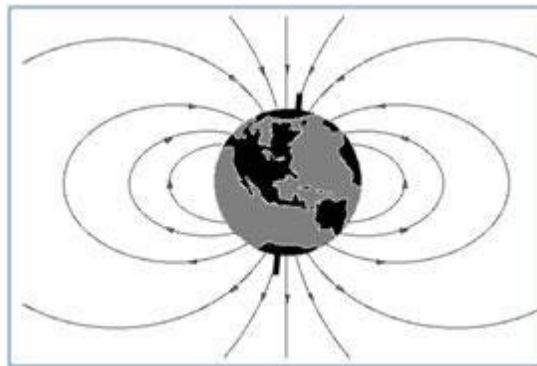


Figura 2.5. Líneas de campo magnético terrestre

El hecho de que se pueda medir la fuerza del Campo magnético terrestre en cualquier punto con un magnetómetro permite obtener la orientación del dispositivo que lo incorpore midiendo la fuerza del campo magnético terrestre en cada momento. Por consiguiente, si el campo magnético que mide el magnetómetro se ve alterado por fuentes externas, la orientación medida será errónea. Es el sensor más sensible de todos y hay que aislarlo de interferencias externas lo mejor posible. Estas interferencias pueden ser:

- Interferencias generadas por elementos pasivos (*Soft-Iron Distorsion*):

Estas interferencias son producidas por elementos ferromagnéticos que por si mismos no generan campos magnéticos, pero que al verse sometidos al efecto de estos sí lo generan y deforman al campo magnético que ha inducido su creación. Un ejemplo son los elementos férricos (Figura 2.6).

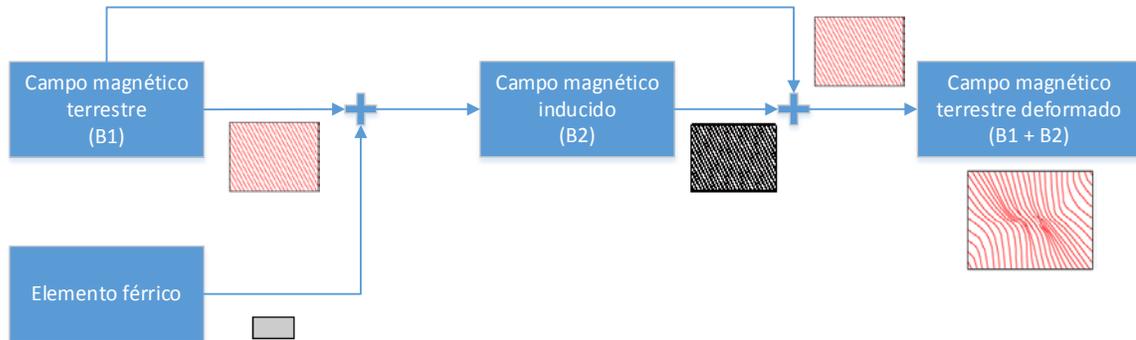


Figura 2.6. Efecto de introducir un elemento pasivo (férrico) en un campo magnético

- Interferencias generadas por elementos activos (*Hard-Iron Distorsion*):

Estas interferencias son los campos magnéticos generados por corrientes que circulan por cables tanto externos como internos al circuito o por fuentes de campo magnético como los imanes [16]. El efecto que tienen las *Hard-Iron Distorsion* sobre el campo magnético medido es el presente en la Figura 2.7.

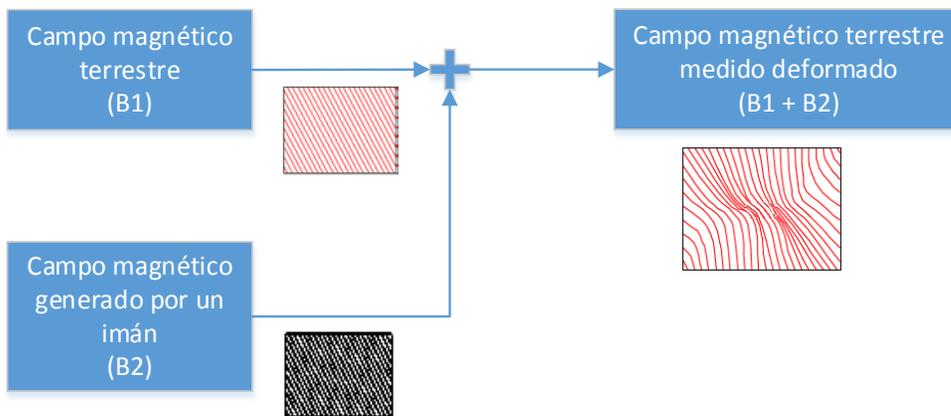


Figura 2.7. Efecto de introducir elemento activo en un campo magnético

2.2. Sistemas de orientación

Los sistemas de orientación son, como su propio nombre indica, aquellos sistemas que permiten obtener información sobre la orientación del objeto que integra dicho sistema. Estos sistemas pueden ir desde calcular la orientación respecto de una posición inicial respecto del Norte magnético y/o geográfico, por lo que es importante saber qué tipos hay y qué datos nos ofrecen.

2.2.1. IMU (*Inertial Measurement Unit*)

Una Unidad de Medidas Inerciales, *IMU* por sus siglas en inglés, es un sistema compuesto por subsistemas inerciales, que, como describimos anteriormente, principalmente son acelerómetros y giróscopos. Este sistema se caracteriza por aportar información cruda de los sensores. Es decir, no implementa ningún tipo de procesamiento de la información captada para aportar información sobre velocidad, orientación y posicionamiento del sistema que lo integra, por lo que este sistema es la base de los que se describirá en las siguientes secciones ya que es el que aporta la información de los sensores [17, 18]. La arquitectura de una IMU es la descrita en la Figura 2.8.

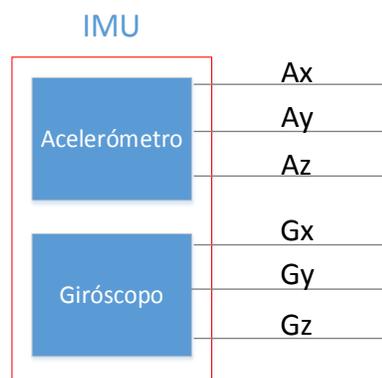


Figura 2.8. Unidad de Medidas Inerciales

2.2.2. INS (*Inertial Navigation System*)

Un Sistema de Navegación Inercial, *INS* por sus siglas en inglés es aquel sistema que, a través de la integración de una IMU y un procesamiento de la información que le ofrece dicho sistema a través de un algoritmo, ofrece información sobre la velocidad, orientación y posicionamiento del sistema que lo integra. Esta información, siempre y cuando no existan fuentes externas de

información como puede ser un GPS, es información relativa a la posición, velocidad y orientación inicial del sistema [18, 19]. Su arquitectura es la presente en la Figura 2.9.

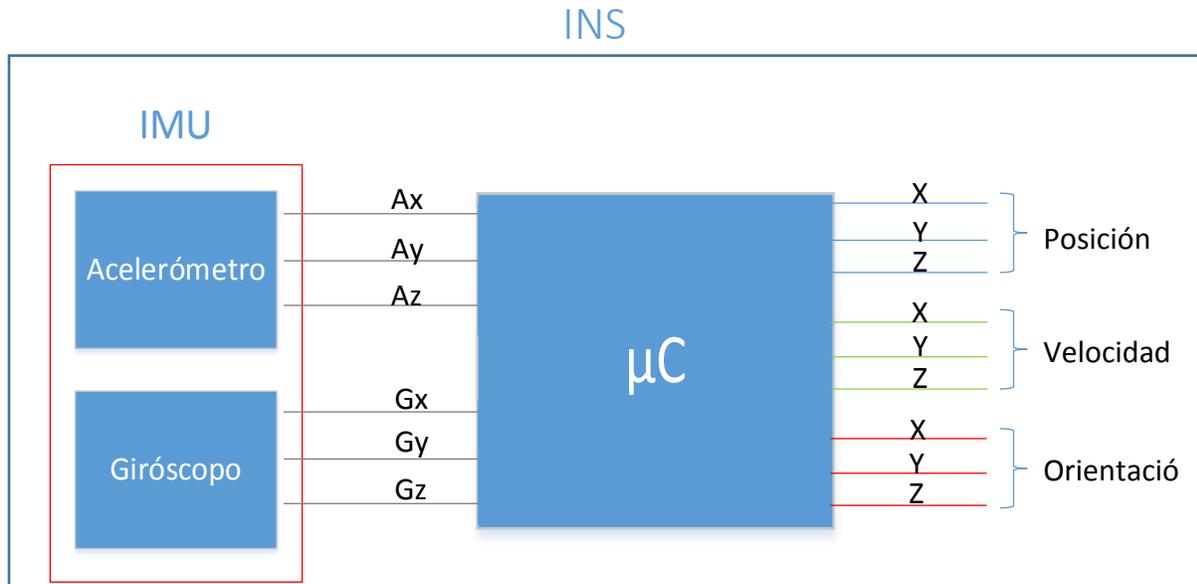


Figura 2.9. Sistema de Navegación Inercial

2.2.3. AHRS (Attitude and Heading Reference System)

Un Sistema de Referencia de Cabeceo y Actitud, *AHRS* por sus siglas en inglés, es capaz de aportar información sobre los ángulos *pitch*, *roll* y *yaw* de un sistema que se mueve en las tres dimensiones espaciales [17, 20], como se representa en la Figura 2.10. Para ello integra una IMU y un magnetómetro, y procesa la información que le ofrece dichos sistemas mediante un algoritmo, cuyos parámetros son los datos procedentes de los sensores, y un filtro de Kalman, para estabilizar (Figura 2.11). Estos ángulos describen el movimiento del sistema en torno a los siguientes ejes:

- *Pitch* (θ): Indica la rotación del sistema respecto del eje Y.
- *Roll* (ϕ): Indica la rotación del sistema respecto del eje Z.
- *Yaw* (ψ): Indica la rotación del sistema respecto del eje X.

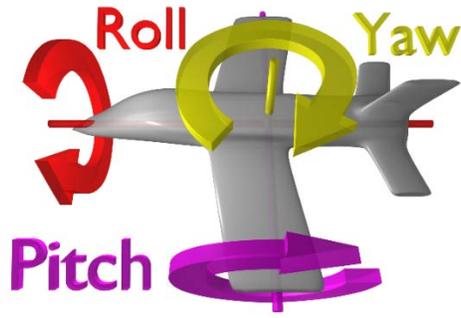


Figura 2.10. Ángulos de navegación

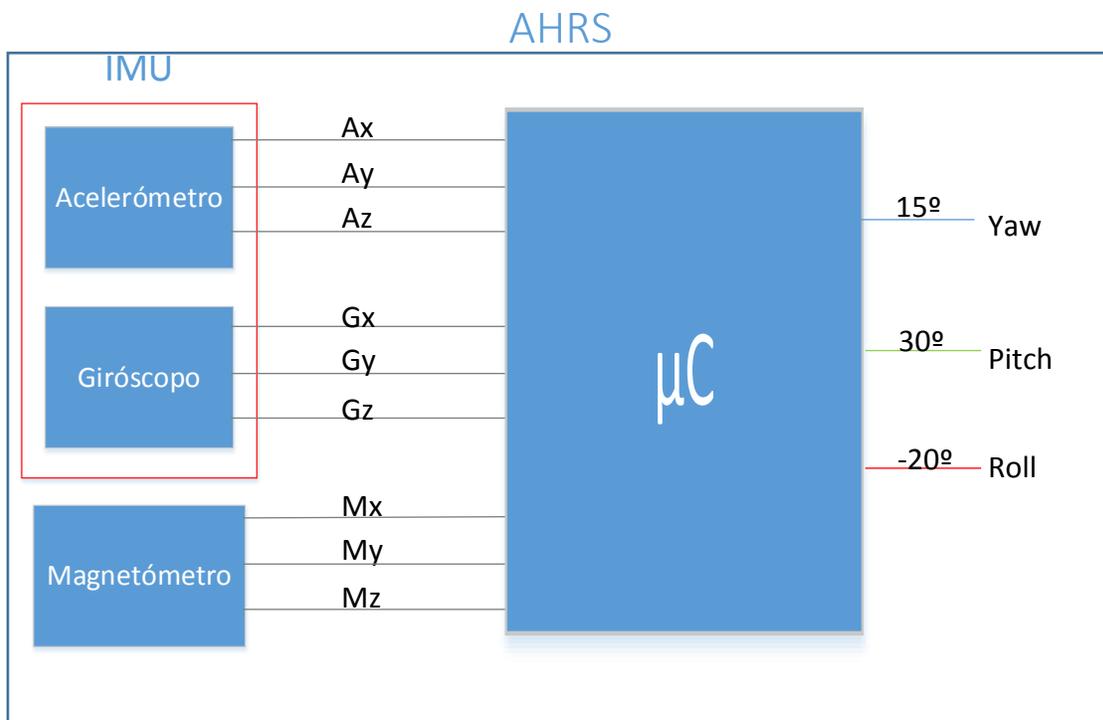


Figura 2.11. Sistema de Referencia de Cabeceo y Actitud

En este caso, la información de posición y orientación del sistema no son relativas a la posición inicial del sistema, sino es información absoluta, referida a la posición y orientación del sistema en cada momento, orientación que será dada respecto del Norte magnético debido a que tenemos un magnetómetro en el sistema.

2.3. Incidencia de los sensores en la medición

Dado que la finalidad de este Trabajo Fin de Grado es evaluar las interferencias en sistemas de orientación embarcados en drones ligeros, debemos saber cómo se realiza el cálculo de la orientación para así poder asignar “pesos” a cada uno de los sensores y determinar cuál es la fuente de error en las medidas. Es por esto que es necesario explicar el procedimiento matemático seguido para, a través de la integración de los datos procedentes de cada uno de los sensores, poder calcular la orientación del sistema.

La orientación del sistema puede modelarse como la rotación de este respecto de los tres ejes de referencia X,Y,Z, formando los ángulos *pitch*, *roll* y *yaw* descritos anteriormente. Considerando que en el instante inicial el sistema está inmóvil, tenemos que los vectores de Fuerza Gravitatoria y Campo Magnético son los que podemos ver en la Figura 2.12.

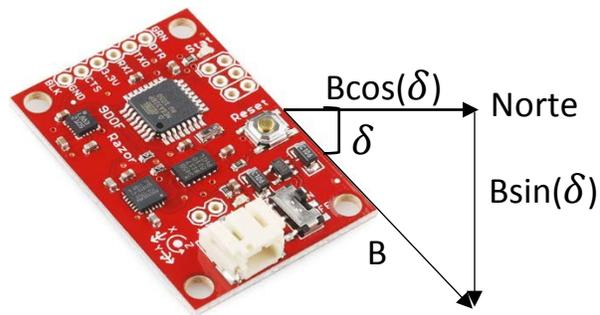


Figura 2.12. Vectores de Campo Magnético

Dada las condiciones anteriores, tenemos que la matriz del magnetómetro (B_r) es la siguiente:

Dada esta condición, la matriz del campo magnético medido, B_r , es la descrita en la ecuación 2.1 donde B es el campo magnético en la superficie terrestre, que va desde un mínimo de $22 \mu\text{T}$ en América del Sur hasta un máximo de $67 \mu\text{T}$ en el sur de Australia. En cuanto al ángulo δ , es el ángulo de inclinación del campo magnético medido respecto del Norte, y que va desde -90° en el Sur Magnético hasta 90° en el Norte Magnético pasando por 0° en el Ecuador.

$$B_r = B \begin{pmatrix} \cos(\delta) \\ 0 \\ \sin(\delta) \end{pmatrix} \quad (\text{Ec.2.1})$$

Una vez tenemos en cuenta las consideraciones anteriores, si rotamos el sistema respecto de los ejes X ($R_x(\psi)$), Y ($R_y(\theta)$) y Z ($R_z(\phi)$) y consideramos B_p la matriz del magnetómetro del sistema, tenemos que ésta está descrita por la ecuación 2.2

$$B_p = R_z(\phi)R_y(\theta)R_x(\psi)B_r = R_z(\phi)R_y(\theta)R_x(\psi)B \begin{pmatrix} \cos(\delta) \\ 0 \\ \sin(\delta) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B_{px} \\ B_{py} \\ B_{pz} \end{pmatrix} \quad (\text{Ec. 2.2})$$

Donde las matrices de rotación son las descritas en las ecuaciones 2.5, 2.4 y 2.3.

$$R_x(\psi) = \begin{pmatrix} \cos(\psi) & \sin(\psi) & 0 \\ -\sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{Ec. 2.3})$$

$$R_y(\theta) = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & 0 & -\sin(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) \end{pmatrix} \quad (\text{Ec. 2.5})$$

$$R_z(\phi) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\phi) & \sin(\phi) \\ 0 & -\sin(\phi) & \cos(\phi) \end{pmatrix} \quad (\text{Ec. 2.4})$$

La orientación del sistema será calculada respecto del Norte magnético, por lo que es necesario calcular la rotación del campo magnético respecto del eje X. Este cálculo puede realizarse partiendo de la ecuación 2.2.

$$R_x(\psi) \begin{pmatrix} B\cos(\delta) \\ 0 \\ B\sin(\delta) \end{pmatrix} = R_y(-\theta)R_z(-\phi)(B_p) \quad (\text{Ec. 2.7})$$

$$\Rightarrow \begin{pmatrix} \cos(\psi)B\cos(\delta) \\ -\sin(\psi)B\cos(\delta) \\ B\sin(\delta) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & 0 & \sin(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\phi) & -\sin(\phi) \\ 0 & \sin(\phi) & \cos(\phi) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} B_{px} \\ B_{py} \\ B_{pz} \end{pmatrix} \quad (\text{Ec. 2.6})$$

$$= \begin{pmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta)\sin(\phi) & \sin(\theta)\cos(\phi) \\ 0 & \cos(\phi) & -\sin(\phi) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta)\sin(\phi) & \cos(\theta)\cos(\phi) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} B_{px} \\ B_{py} \\ B_{pz} \end{pmatrix} \quad (\text{Ec. 2.9})$$

$$= \begin{pmatrix} B_{px}\cos(\theta) + B_{py}\sin(\theta)\sin(\phi) + B_{pz}\sin(\theta)\cos(\phi) \\ B_{py}\cos(\phi) - B_{pz}\sin(\phi) \\ -B_{px}\sin(\theta) + B_{py}\cos(\theta)\sin(\phi) + B_{pz}\cos(\theta)\cos(\phi) \end{pmatrix} \quad (\text{Ec. 2.8})$$

Combinando las ecuaciones 2.7 y 2.8, tenemos que:

$$\tan(\psi) = \frac{\sin(\psi)B\cos(\delta)}{\cos(\psi)B\cos(\delta)} = \frac{B_{pz}\sin(\phi) - B_{py}\cos(\phi)}{B_{px}\cos(\theta) + B_{py}\sin(\theta)\sin(\phi) + B_{pz}\sin(\theta)\cos(\phi)} \quad (\text{Ec. 2.10})$$

Despejando de la ecuación 2.10 la orientación (ψ), queda que:

$$\psi = \arctan\left(\frac{B_{pz}\sin(\phi) - B_{py}\cos(\phi)}{B_{px}\cos(\theta) + B_{py}\sin(\theta)\sin(\phi) + B_{pz}\sin(\theta)\cos(\phi)}\right) \quad (\text{Ec. 2.11})$$

La función arctan viene descrita por la gráfica presente en la Figura 2.13 , donde queda reflejado que a medida que los valores resultantes de la ecuación 2.11 aumenten respecto de su valor anterior, la orientación resultante también lo hará, y viceversa en caso de que los valores disminuyan, llegando a medir como máximo hasta $\pm 90^\circ$.

De la ecuación 2.11 se deducen las dos formas que existen para alterar la medición de la orientación:

1. **Alteración del campo magnético** → Interferencia magnética.
2. **Alteración de los ángulos *pitch* y *roll*, θ y ϕ respectivamente.** Estos dos ángulos se calculan mediante los sistemas inerciales, por lo que si se altera el estado inercial del sistema, la orientación se verá afectada → Interferencia mecánica.

Dada la naturaleza de cada una de las interferencias y los sensores asociados a éstas, el magnetómetro es el subsistema más sensible debido a que el campo magnético varía muy fácilmente (ver apartado 2.1.2).

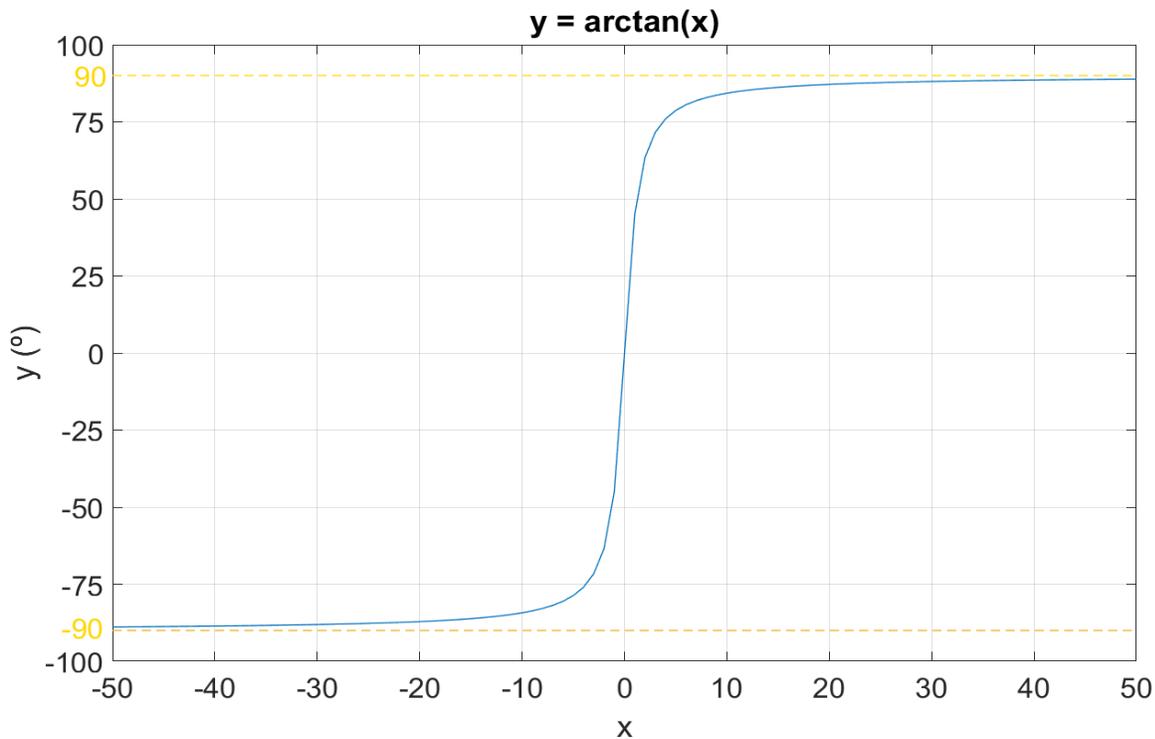


Figura 2.13. Gráfica función $\arctan(x)$

2.4. Sistema de orientación empleado

El sistema de orientación usado para llevar a cabo este trabajo es la 9DOF Razor IMU [21] (Figura 2.14), disponible en el laboratorio ya que se ha ido usando en trabajos anteriores, que combina tres sensores que nos permiten un total de nueve medidas (para más información, ir a Anexo A):

- Acelerómetro: Acelerómetro de 3 ejes (ADXL345)
- Giróscopo: Giróscopo de 3 ejes (ITG-3200)
- Magnetómetro: Magnetómetro de 3 ejes (HMC5583L)

Este dispositivo integra un procesador embebido ATmega328 que se encarga de procesar los datos procedentes de los sensores para aportar información sobre los ángulos *pitch*, *roll* y *yaw* del sistema a evaluar (ver apartado 2.2), por lo que se trata de un AHRS. La precisión máxima de este dispositivo es de 2º, y su esquema de bloques es el de la Figura 2.15.



Figura 2.14. 9DOF Razor IMU

Siguiendo el esquema de bloques de la Figura 2.15, lo primero es la calibración de los sensores (ver apartado 2.4.1) para que funcionen correctamente bajo las condiciones en las que se encuentren. Una vez calibrados, el sistema empieza a recibir los datos inerciales y magnéticos procedentes de los sensores integrados en el sistema, los compensa acorde a la calibración realizada (de ahí que la calibración sea una parte muy importante), realiza un cálculo preliminar de los ángulos *yaw*, *pitch* y *roll* para finalmente estabilizarlos mediante un filtro de Kalman.

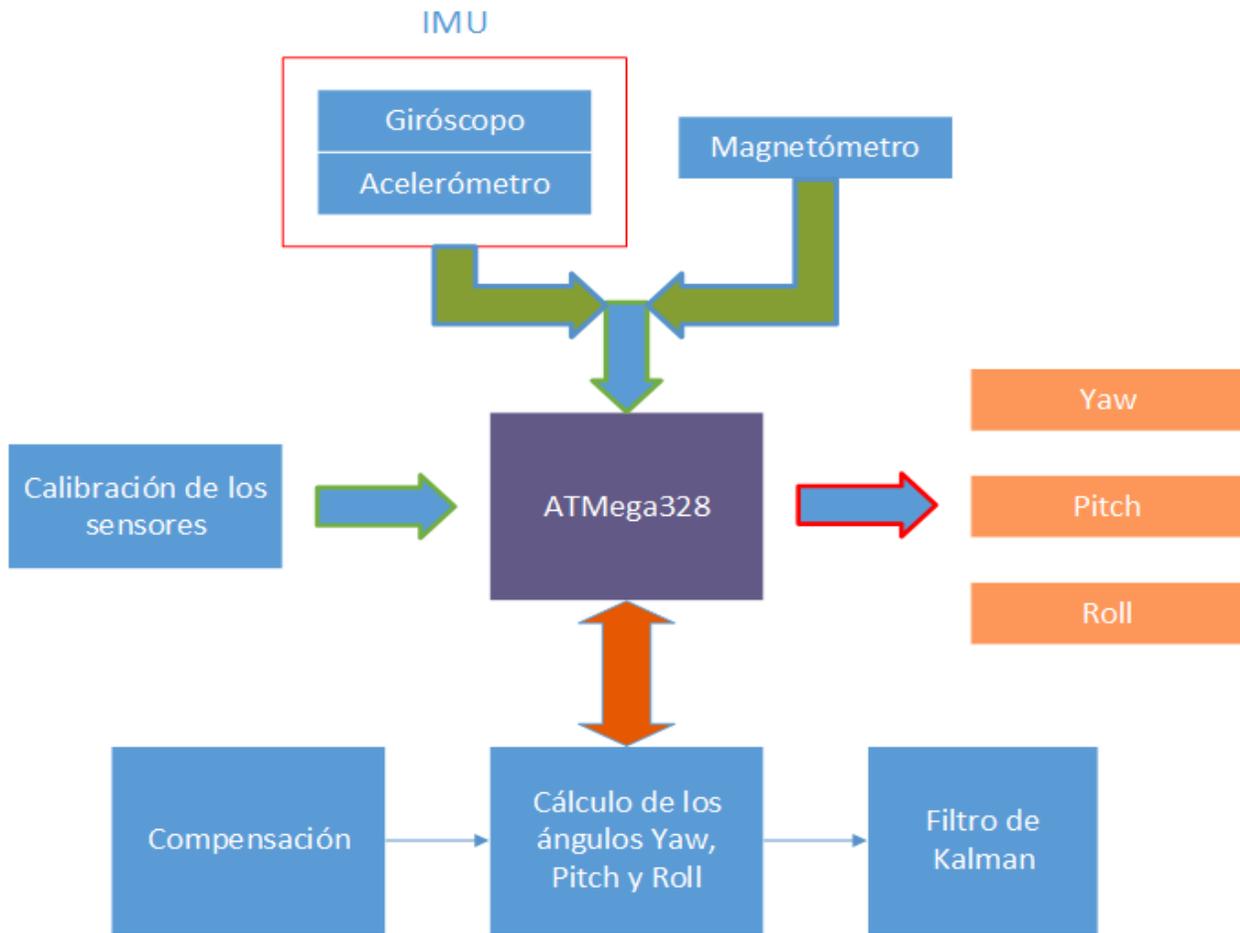


Figura 2.15. Esquema de bloques de la 9DOF Razor IMU

2.4.1. Calibración de los sensores

La calibración de los sensores es una parte fundamental de este trabajo, pues es lo que permite al sistema funcionar correctamente bajo distintas condiciones. La calibración del sistema se puede realizar mediante Arduino solamente, o mediante Arduino y Processing, donde en Arduino se calibran los sensores inerciales (giróscopo y acelerómetro) y en Processing se calibra el magnetómetro [22]. Esta última manera es la más eficaz debido a que es capaz de detectar los *soft and hard iron distortion* existentes, de manera que el magnetómetro está preparado para no verse influenciado por estas distorsiones.

Para la calibración de los sensores inerciales mediante Arduino, lo primero que hay que hacer es pasar al modo calibración. Para ello hay que escribir `#oc` en el monitor serie y se pasará primeramente a calibrar el acelerómetro. En ese momento aparecen por el monitor serie los

valores mínimos y máximos medidos en cada eje del acelerómetro (Figura 2.16). Para calibrar este sensor, hay que mover la IMU muy lentamente en todas las direcciones posibles, ya que solo se quiere medir la fuerza gravitatoria ejercida sobre los distintos ejes. Una vez hecho esto, se obtienen los valores máximos y mínimos presentes en la Tabla 2.1. Cabe destacar que la calibración de este sensor se realiza una única vez pues el campo gravitatorio es constante.

```
accel x,y,z (min/max) = -5.00/-1.00 25.00/29.00 225.00/232.00
```

Figura 2.16. Calibración del acelerómetro

EJE	MÍNIMO	MÁXIMO
X	-265	252
Y	-255	259
Z	-292	223

Tabla 2.1. Máximo y mínimo del acelerómetro

El siguiente paso es calibrar el giróscopo, para lo que se deberá escribir dos veces #on. Para la correcta calibración de este, debemos dejarlo al menos 10 segundos sobre una mesa de manera que este esté lo más recto y estático posible (Figura 2.17). Este parámetro dependerá de cómo esté posicionada la IMU, pues en función de esto la aceleración angular medida será distinta.

```
gyro x,y,z (current/average) = -29.00/-27.98 102.00/100.51 -5.00/-5.85
```

Figura 2.17. Calibración del giróscopo

Finalmente, la calibración del magnetómetro se realiza usando Processing pues permite realizar la calibración extendida, lo que permite inmunizar al sistema de un mayor número de interferencias. Para realizar la calibración del sistema hay que ejecutar el código Magnetometer_calibration.pde, descargado anteriormente de la web del tutorial, y mover la IMU en todas las direcciones posibles, al igual que se hizo con el acelerómetro. De esta manera, el sistema obtiene una matriz de valores del campo magnético medido en cada punto del espacio

(Figura 2.18). Este procedimiento hay que realizarlo cada vez que la posición de la IMU cambie o varíe la composición de la estructura.

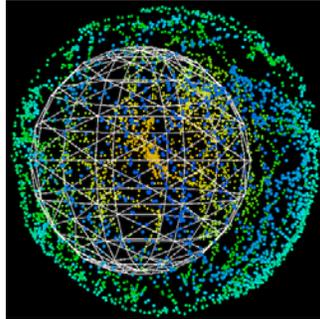


Figura 2.18. Calibración del magnetómetro usando Processing

Una vez realizada la calibración del sistema, solo falta ir al código Arduino e insertar los valores obtenidos anteriormente (Figura 2.19):

```
// SENSOR CALIBRATION
/*****
// How to calibrate? Read the tutorial at http://dev.gu.tu-berlin.de/projects/sf-razor-9dof-ahrs
// Put MIN/MAX and OFFSET readings for your board here!
// Accelerometer
// "accel x,y,z (min/max) = X_MIN/X_MAX Y_MIN/Y_MAX Z_MIN/Z_MAX"
#define ACCEL_X_MIN ((float) -265)
#define ACCEL_X_MAX ((float) 252)
#define ACCEL_Y_MIN ((float) -255)
#define ACCEL_Y_MAX ((float) 259)
#define ACCEL_Z_MIN ((float) -292)
#define ACCEL_Z_MAX ((float) 223)

// Magnetometer (standard calibration mode)
// "magn x,y,z (min/max) = X_MIN/X_MAX Y_MIN/Y_MAX Z_MIN/Z_MAX"
#define MAGN_X_MIN ((float) -600)
#define MAGN_X_MAX ((float) 600)
#define MAGN_Y_MIN ((float) -600)
#define MAGN_Y_MAX ((float) 600)
#define MAGN_Z_MIN ((float) -600)
#define MAGN_Z_MAX ((float) 600)

// Magnetometer (extended calibration mode)
// Uncomment to use extended magnetometer calibration (compensates hard & soft iron errors)
#define CALIBRATION_MAGN_USE_EXTENDED true
const float magn_ellipsoid_center[3] = {2580.40, -536.758, -217.256};
const float magn_ellipsoid_transform[3][3] = {{0, 0, 0}, {0, 0, 0}, {0, 0, 0}};

// Gyroscope
// "gyro x,y,z (current/average) = .../OFFSET_X .../OFFSET_Y .../OFFSET_Z"
#define GYRO_AVERAGE_OFFSET_X ((float) -67.58)
#define GYRO_AVERAGE_OFFSET_Y ((float) 3.55)
#define GYRO_AVERAGE_OFFSET_Z ((float) 18.81)
```

Figura 2.19. Código Arduino con calibración realizada

Capítulo 3. Diseño y montaje de la plataforma de pruebas

La estructura es una pieza vital en este trabajo pues permite anclar el gimbal y mantenerlo en la misma posición, lo que nos permitirá realizar pruebas lo más parecidas posibles entre sí y comparaciones objetivas en las mismas condiciones. Esto es estrictamente necesario ya que el grueso de este trabajo se realiza en tierra. El proceso a seguir en la realización de la estructura sigue varias fases. La primera es la medición, posteriormente el diseño de las piezas que lo componen, la fabricación de las piezas y finalmente el montaje de éstas.

3.1. Medición

La estructura deberá ser tal que permita el libre movimiento del gimbal sobre el mismo, por lo que hay que realizar la medición de sus dimensiones (Figura 3.1) para poder diseñar una estructura que cumpla con el requisito expuesto anteriormente.

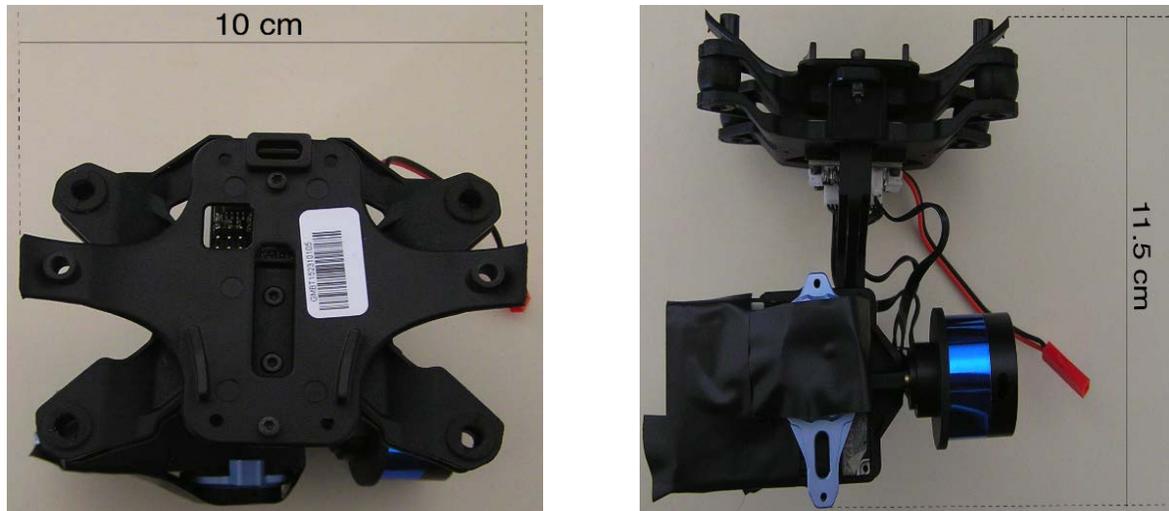


Figura 3.1. (Izquierda) Largo del gimbal. (Derecha) Altura del gimbal

3.2. Diseño de las piezas de la estructura.

El diseño es una fase compleja pues es necesario tener en cuenta que sea un diseño estable y rígido. De manera que cuando se vayan a realizar las pruebas, dicho soporte no incluya movimientos espontáneos que puedan contaminar los datos tomados, sea cómodo trabajar con él y permita libertad de movimiento al gimbal.

3.2.1. Diseño 1: Mediante reutilización de piezas

La idea principal era reutilizar piezas presentes en el laboratorio de Electrónica de Comunicaciones del Departamento de Señales y Comunicaciones, que se habían usado para pruebas en estática en interior. Las piezas presentes en la Figura 3.2 son la pieza que haría de base para anclar la estructura al trípode y el soporte superior donde anclar el gimbal. Para ensamblar estas dos piezas se diseñaron tres largueros laterales de 17 cm de alto por 1.8 cm de ancho, que no es más que la duplicación de la base de anclaje de las piezas azules presentes en la Figura 3.2. Este diseño no prosperó debido al peso de la estructura y a la incomodidad para trabajar con el gimbal montado sobre ésta.

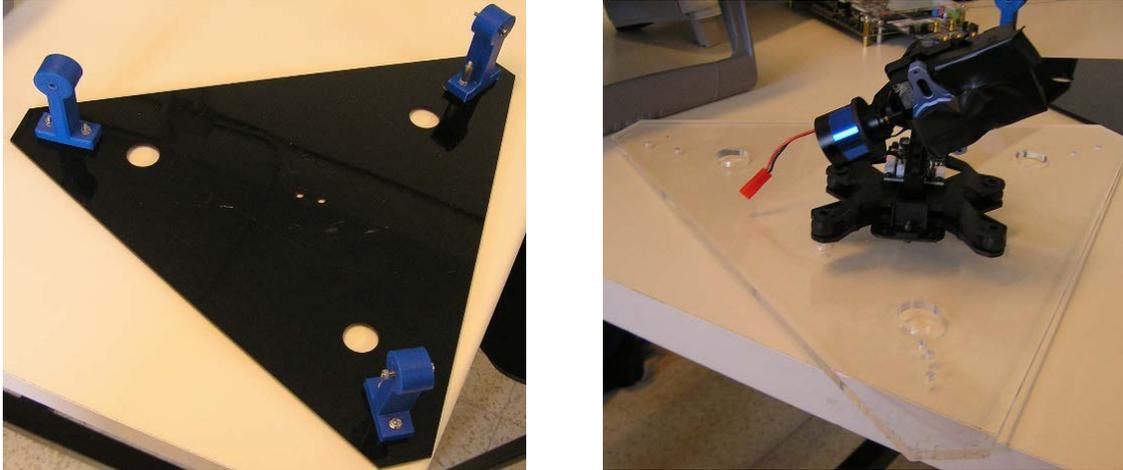


Figura 3.2. (Izquierda) Base reciclada. (Derecha) Soporte superior reciclado

Una vez que la versión inicial no ha prosperado, se decidió que la estructura debía ser modular, de manera que pudiéramos modificar sus dimensiones modificando solo algunas de las piezas que lo componen y no el diseño completo.

3.2.2. Diseño 2: Estructura formada por largueros y travesaño.

En la segunda versión, presente en la Figura 3.3, el criterio de diseño consistiría en una estructura en la que fuese cómoda trabajar y manipular el gimbal una vez estuviese montado sobre ésta, por lo que se decidió que la estructura tenía que tener forma de portería de fútbol, formada por: una base cuadrada de 20 cm de ancho por 20 cm de largo para anclar la estructura al trípode, dos largueros de 25 cm de alto por 5 cm de ancho para dar altura a la estructura, y un travesaño de 21 cm de largo por 1.5 cm de ancho para anclar el gimbal. El ensamblaje de las piezas se realiza mediante tornillos que permiten unir la base al trípode y a los travesaños, y los travesaños al larguero. Este diseño no prosperó debido a la poca estabilidad que ofrecía la estructura.

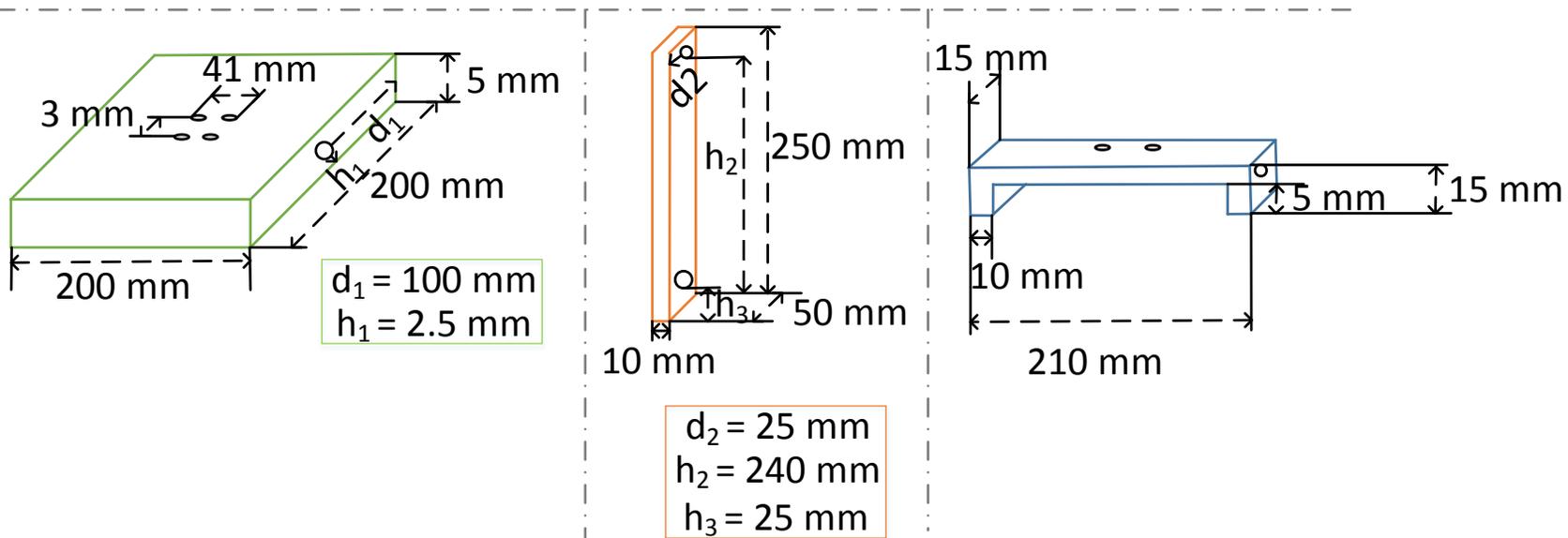
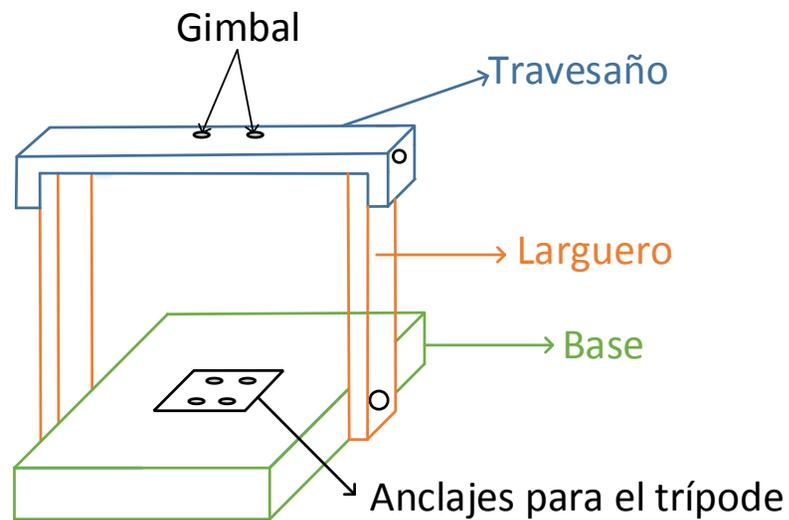


Figura 3.3. Diseño 2

3.2.3. Diseño 3 y final: mezcla de los dos anteriores

Finalmente, se decidió explotar los dos puntos fuertes de los diseños anteriores y combinarlos en uno solo; es decir, mezclar la libertad de trabajo que ofrece el diseño de la Figura 3.3 con triángulos como soportes laterales, sustituyendo a los largueros de manera que añadan estabilidad a la estructura. Por lo tanto, se optó por diseñar una estructura en la que se mantiene la base cuadrada de 20x20cm² pero cambian los soportes laterales y la forma del soporte superior del gimbal. En este caso, los soportes laterales son triángulos cuyos vértices son planos y miden 20 cm de ancho por 20 cm de alto, con cuatro anclajes inferiores para anclarlos a la base, uno lateral para anclar la pieza estabilizadora y uno superior para anclarlo al soporte superior del gimbal. El soporte del gimbal intenta simular la forma del anclaje del mismo y tiene cuatro anclajes laterales, dos para anclarlo a los soportes laterales y dos para anclar la pieza estabilizadora, y dos anclajes centrales para anclar el gimbal. Además, para añadir estabilidad a la estructura se añaden dos triángulos, uno en cada lado del soporte del gimbal, que permiten unir los soportes laterales al soporte superior del gimbal, impidiendo la inclinación de los soportes laterales cuando se produzcan movimientos laterales bruscos (ver apartado 3.3 en adelante).

Los cálculos realizados para posicionar correctamente los anclajes son los siguientes:

1. Base estructura – trípode

Las dimensiones de la base a fabricar y las del trípode al que se anclará la estructura son las presentes en la Tabla 3.1.

Base	Ancho (cm)	Alto (cm)
A fabricar	20	20
Trípode	4.1	4.1

Tabla 3.1. Dimensiones de las bases

Estableciendo que las distancias entre anclajes y el diámetro de estos elementos son las presentes en la Tabla 3.2.

Ancho (mm)	Alto (cm)	Diámetro (mm)	Número de anclajes
3	4.1	3.2	4

Tabla 3.2. Distancias entre anclajes de la base y su diámetro

Teniendo en cuenta que han de estar situadas en el centro de la base, la posición de los diferentes anclajes en el plano se rige por las siguientes ecuaciones:

$$\text{Posicion Eje X} > \text{centro} \rightarrow X = \text{centro} + \frac{\text{ancho}}{2} \rightarrow X = 10.15 \text{ cm} \quad (\text{Ec. 3.3})$$

$$\text{Posicion Eje X} < \text{centro} \rightarrow X = \text{centro} - \frac{\text{ancho}}{2} \rightarrow X = 9.85 \text{ cm} \quad (\text{Ec. 3.2})$$

$$\text{Posicion Eje Y} > \text{centro} \rightarrow Y = \text{centro} + \frac{\text{alto}}{2} \rightarrow Y = 12.1 \text{ cm} \quad (\text{Ec. 3.1})$$

$$\text{Posicion Eje Y} < \text{centro} \rightarrow Y = \text{centro} - \frac{\text{alto}}{2} \rightarrow Y = 7.9 \text{ cm} \quad (\text{Ec. 3.4})$$

Si la disposición de los anclajes es la presente en la Figura 3.4, la posición de los enganches es la presente en la Tabla 3.3.



Figura 3.4. Distribución de los anclajes de la sujeción al trípode

	Anclaje 1	Anclaje 2	Anclaje 3	Anclaje 4
Eje X (cm)	9.85	10.15	9.85	10.15
Eje Y (cm)	12.1	12.1	7.9	7.9

Tabla 3.3. Distribución espacial de los anclajes trípode-base

2. Base – soporte lateral

Los anclajes de la base con los soportes laterales serán ocho: cuatro por cada soporte lateral, dos por cada extremo del soporte. La distancia vertical que deberán tener entre ellos será de 1 cm, y del borde horizontal al primero será de 1 cm también, por

lo que la distancia del segundo respecto de dicho borde será de 2 cm. En cuanto a la distancia horizontal de los anclajes respecto del borde vertical, hay que tener en cuenta el ancho del material a utilizar: metacrilato de 5mm de espesor. Debido a que los anclajes se encontrarán centrados horizontalmente, la posición horizontal de éstos deberá ser de 2.5 mm. Si la distribución de los anclajes en la base es la presente en la Figura 3.5, su posicionamiento ha de ser el presente en la Tabla 3.4.

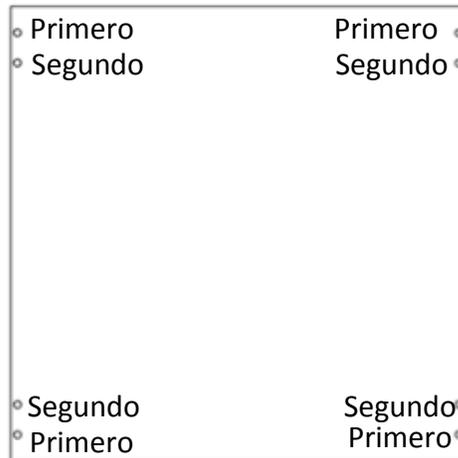


Figura 3.5. Distribución de los anclajes base-soportes laterales

	Primero	Segundo
Eje X (mm)	2.5	2.5
Eje Y (cm)	1	2

Tabla 3.4. Distribución de los anclajes base - soporte lateral respecto de los bordes

3. Soporte lateral – base

Sigue el mismo razonamiento y distribución que los anclajes del apartado anterior.

4. Soporte lateral – soporte superior - gimbal

Teniendo en cuenta que el ancho del vértice del soporte lateral es de 2 cm, el ancho del soporte superior también es de 2 cm. Dado que los anclajes han de estar centrados, su posición vertical respecto del borde es de 1 cm, y en cuanto a la

posición horizontal, siguiendo el mismo principio que en los apartados anteriores, su posicionamiento deberá ser a 2.5 mm (por el espesor del material). En cuanto a los anclajes para el gimbal, es necesario saber que la distancia que hay de centro a centro de los anclajes del gimbal es de 8.2 cm. Teniendo en cuenta lo anterior y que las dimensiones de la pieza son las presentes en la Tabla 3.5, la distribución espacial de estos anclajes es la presente en la Figura 3.6 y Tabla 3.6.

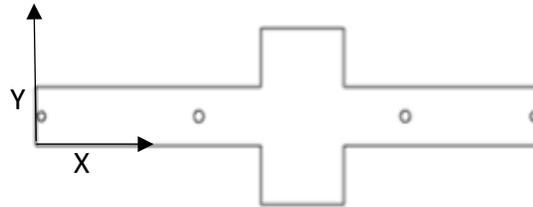


Figura 3.6. Forma y distribución de anclajes del soporte superior

Ancho (cm)	Alto (cm)
20	2

Tabla 3.5. Dimensiones del soporte superior

Anclajes centrales/laterales	Izquierdo	Derecho
Eje X (mm)	58.5/2.5	138.5/197.5
Eje Y (mm)	10/10	10/10

Tabla 3.6. Distribución espacial de los anclajes del soporte superior

5. Pieza estabilizadora

La pieza estabilizadora irá anclada al soporte lateral y al soporte superior, por lo que su forma es la de un triángulo. Al querer que esté alineada horizontalmente con las otras dos piezas, su largo es de 2 cm (el ancho de las otras dos) y los anclajes estarán a 1 cm respecto del borde vertical del soporte superior. En cuanto a su ancho y alto,

son de 3 cm para así poder anclar la pieza sin que los tornillos se intersectaran. Siguiendo el principio anterior, la posición vertical de los anclajes ha de ser de 2 cm respecto del borde del horizontal superior del soporte lateral. Para más detalle, ver el apartado 3.4 del presente documento.

3.3. Realización de piezas para el soporte mediante cortadora láser.

Una vez se diseñaron las piezas, se procedió a digitalizar los mismos para su posterior fabricación. Todas aquellas piezas que podían diseñarse mediante un plano 2D fueron realizadas mediante la cortadora láser disponible en el IDETIC. Una cortadora láser es una máquina que permite realizar cortes mediante la focalización de un láser sobre un material, de manera que lo funde y evapore realizándose el corte [23]. Para la realización de los planos, que posteriormente serán cortados mediante láser, se usó el programa Corel Draw X5 presente en el ordenador del puesto de trabajo del laboratorio del IDETIC donde está ubicada la cortadora láser. Los diseños realizados son los presentes en la Figura 3.7.

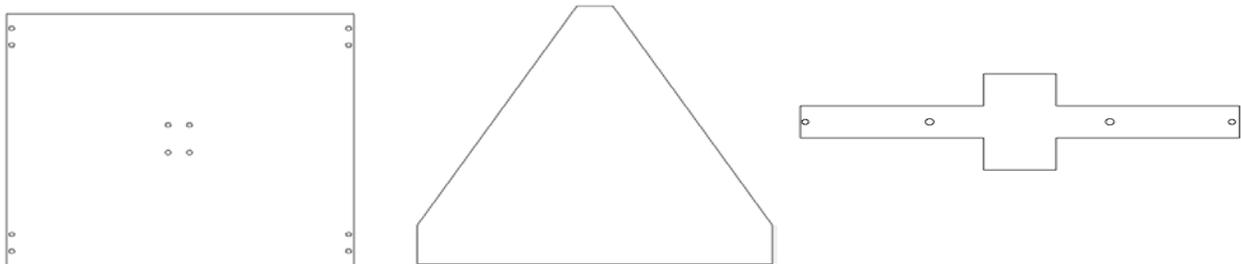


Figura 3.7. De izquierda a derecha diseño de: la base, el soporte lateral y el soporte superior

Siendo las piezas finales las que se pueden ver en la Figura 3.8.



Figura 3.8. De izquierda a derecha: base, soporte lateral y soporte superior

3.4. Realización de piezas para el soporte mediante impresora 3D.

La fabricación de las piezas para añadir estabilidad a la estructura y de anclaje del trípode a la estructura, se realizaron mediante un programa de modelado de piezas 3D para su posterior impresión usando la impresora 3D disponible en el IDeTIC.

La pieza de anclaje trípode-estructura es una pieza básica en este diseño pues nos permitirá, como su propio nombre indica, anclar la estructura al trípode de manera que sean una única estructura. De esta manera, podremos realizar los experimentos siempre en las mismas condiciones de movimiento y estabilidad. El diseño 3D y la forma final de esta pieza es el presente en la Figura 3.9 (ver Anexo B, Figura B.1).

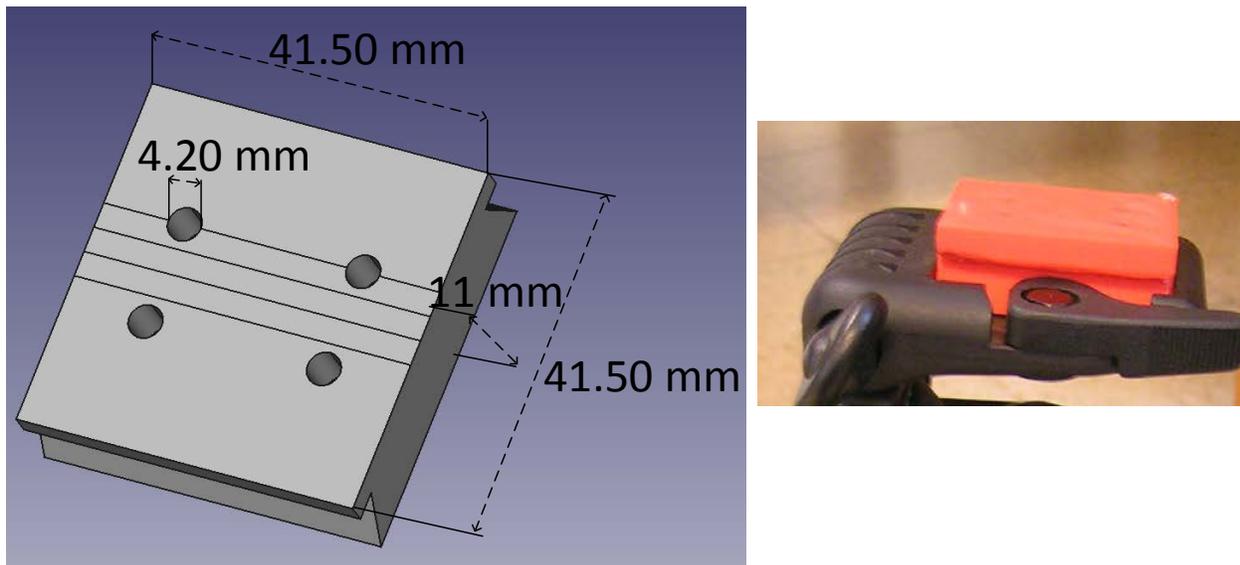


Figura 3.9. (Izq.) Diseño 3D del anclaje trípode-estructura. (Der.) Forma y montaje final.

La pieza para añadir estabilidad a la estructura nació de la idea de conseguir que el movimiento de la estructura fuera uniforme y no se crearan desplazamientos laterales involuntarios debido a inestabilidad. Es por esto que se diseñaron para que anclaran los soportes laterales al soporte superior del gimbal. Estas piezas son dos triángulos de ancho alto 3 cm, lago 3 cm y ancho 2 cm, cuyo diseño y forma podemos ver en la Figura 3.10 (ver Anexo B, Figura B.2).

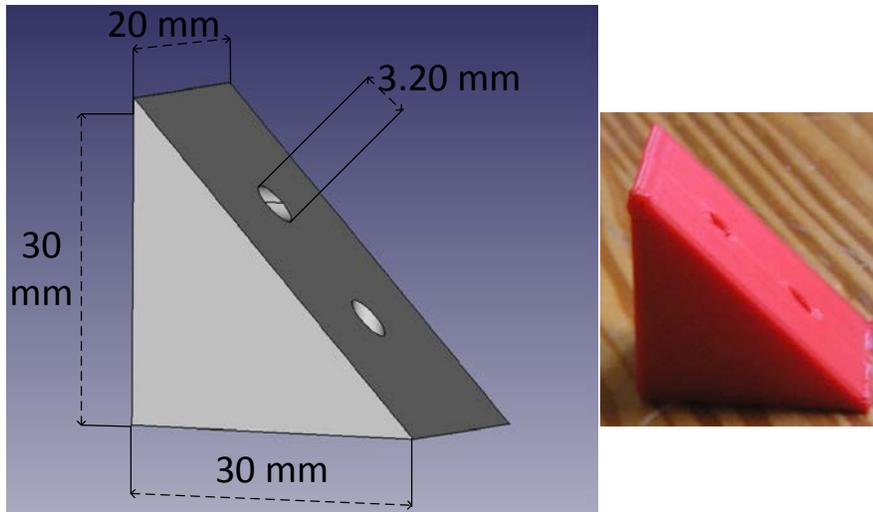


Figura 3.10. (Izq.) Diseño 3D del estabilizador. (Der.) Forma final.

3.5. Montaje del soporte.

Una vez han sido fabricadas todas las piezas, el siguiente paso es el proceso de montaje, en el que se realizó el anclaje de las piezas mediante el atornillamiento de las mismas. Para la apertura de los anclajes fue necesaria la utilización de un taladro de columna disponible en el taller con broca de sección 3mm. La estructura final es la Figura 3.11 (ver Anexo B, Figura B.3).

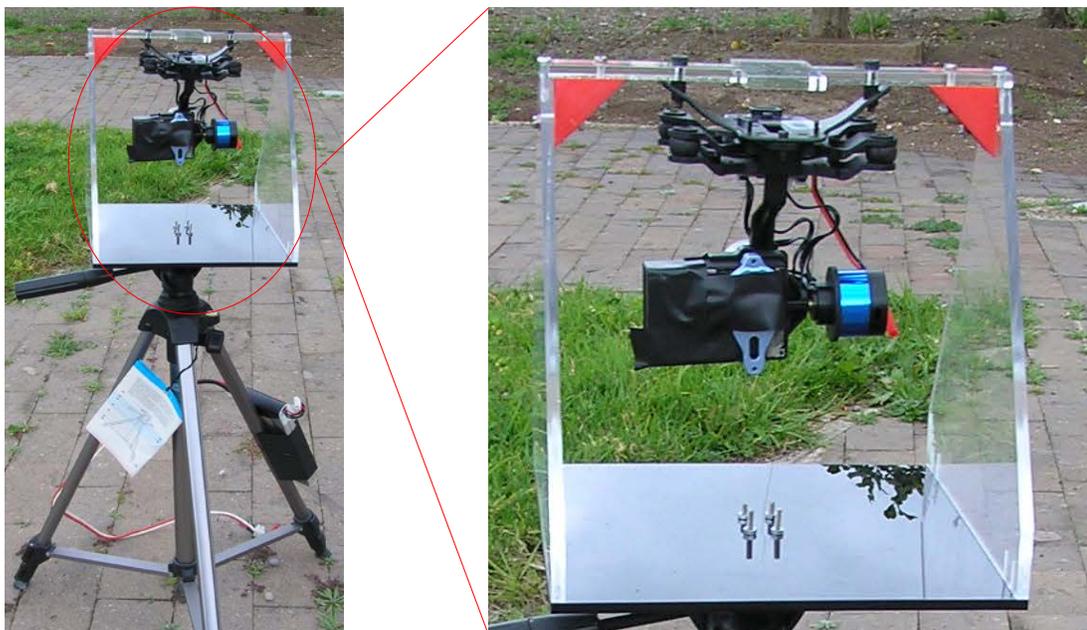


Figura 3.11. Estructura final

Capítulo 4. Evaluación de interferencias

Este capítulo describe el sistema de orientación usado para la realización de las pruebas, la metodología seguida a la hora de su realización y la caracterización y evaluación de las interferencias existentes. Las pruebas mostradas en las siguientes secciones se han realizado en trípode, pues hay que analizar el comportamiento del sistema antes de su montaje en el dron.

4.1. Parámetros para criterios de evaluación

Dado que el fin de este trabajo es caracterizar y evaluar las interferencias que puedan afectar al sistema de orientación, se analizarán en éste y posteriores capítulos un gran número de señales. Es por esto que necesitamos definir un conjunto de parámetros que permitan caracterizar cada una de las señales. El entorno de trabajo usado es Matlab, una herramienta software optimizada para resolver problemas de ingeniería y científicos [24]. En cuanto a los parámetros, es necesario definir dos conjuntos que permitan abarcar diferentes aspectos de la señal. Estos son:

1. Rango dinámico (DR)

El rango dinámico (DR) de la señal representa la diferencia entre el valor máximo y mínimo de ésta, que se obtiene en Matlab mediante los comandos $max(x)$ y $min(x)$ respectivamente [25, 26]. Es muy importante ya que permite determinar si la dispersión cometida es admisible o no para la finalidad planteada. Dentro de este, se hará referencia al definido en este Trabajo Fin de Grado como Rango Dinámico Efectivo (EDR), que es aquel en el que oscila más del 95.44% de la señal que se

corresponde con el intervalo de confianza $(\mu-2\sigma, \mu+2\sigma)$. De manera que permita realizar comparaciones entre señales sin tener en cuenta los picos esporádicos que puedan aparecer y que deformen el rango dinámico de la señal.

2. Envolvente

En este Trabajo Fin de Grado, se denomina envolvente de la señal x a la señal que determina la evolución de ésta. Este parámetro es útil ya que permite observar la evolución de la señal independientemente de lo ruidosa que ésta pueda ser. Esta señal se obtiene en Matlab a través del comando *smooth(x)*, que permite aplicar un filtro paso bajo a la señal x y eliminar las partes abruptas de la señal [27].

3. Histograma (fdp)

El histograma de la señal es una gráfica que aporta información sobre la frecuencia de aparición de los valores de la señal, y permite obtener la función de densidad de probabilidad de la misma, por lo que es de gran utilidad para la realización de un futuro análisis estadístico [28]. El histograma de una señal x se obtiene en Matlab mediante el comando *histogram(x)* [29]

4. Media (μ)

La media de la señal es el primero de los parámetros estadísticos de primer orden usados en este trabajo. Para su cálculo en Matlab existe el comando *mean(x)*, que devuelve la media de una señal x [30]. La media es una característica numérica que proporciona una idea de la localización de la señal sobre la distribución de valores de la misma. Característica que es de gran utilidad dada la necesidad de tener un valor que permita determinar los posibles *offsets* presentes en las distintas señales, y un valor de referencia que se pueda relacionar con el valor real de la medida. Además, este parámetro será de gran utilidad cuando se busquen tamaños de ventana de integración que permitan reducir la dispersión de la señal [28].

5. Desviación estándar (σ)

La desviación estándar es otro de los parámetros estadísticos de primer orden usados, y es un parámetro que ofrece información sobre la dispersión de los valores de la señal respecto a su media [28]. Para su cálculo se usa el comando *std(x)*, que permite obtener la desviación estándar de una variable *x* en Matlab [31].

6. *Skewness* o coeficiente de simetría

El *skewness*, o coeficiente de simetría, es un parámetro estadístico de orden mayor y ofrece información sobre la simetría del histograma de la señal. Si este parámetro es igual a 0 significa que la distribución es simétrica, si está sesgada a la derecha (pico hacia la izquierda) será mayor que 0, y en caso de estar sesgada a la izquierda (pico hacia la derecha) será menor a 0 [28]. En Matlab, este parámetro se obtiene mediante el comando *skewness(x)*, siendo *x* la señal [32].

7. *Kurtosis* o coeficiente de apuntamiento

La *kurtosis*, o coeficiente de apuntamiento, es otro de los parámetros de orden mayor usados y ofrece información sobre la concentración de los valores entorno de la media, por lo que da información sobre la semejanza de la distribución de probabilidad de la señal con una distribución normal. Este parámetro, al igual que en el caso del *skewness*, viene definido por tres zonas: si es igual a 3 significa que la distribución de probabilidad presenta una pendiente de forma gaussiana estandarizada. Si es mayor a 3 indica que la distribución de los valores es de mayor pendiente que en el caso de la gaussiana estandarizada; en otras palabras, la distribución de los valores es más cercana a la media (colas menos anchas que la normal y centro más apuntado). Finalmente, si es menor a 3 significa que los valores se encuentran alejados de la media (colas más anchas que la normal y centro menos apuntado) (Figura 4.1) [28]. La *kurtosis* de una señal *x* en Matlab se obtiene con el comando *kurtosis(x)* [33].

En resumen, los parámetros usados para el criterio de evaluación son el rango dinámico, el rango dinámico efectivo, el histograma, la media, la desviación estándar, el coeficiente de variación, el

skewness y la kurtosis. Un ejemplo de la aplicación de estos parámetros se muestra en la Figura 4.2, donde se representa la señal obtenida, y todos los parámetros anteriormente descriptos. Como se observa, el coeficiente de simetría de la señal es mayor que 0, por lo que la fdp de la señal está sesgada hacia la derecha, y además, el coeficiente de apuntamiento es menor a 3, lo que provoca que la fdp sea más achatada y con la cola más ancha que la fdp gaussiana.

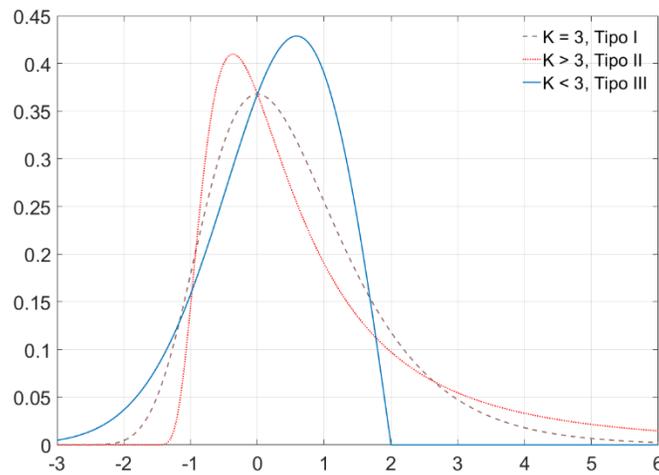


Figura 4.1. FDP con diferentes valores de kurtosis

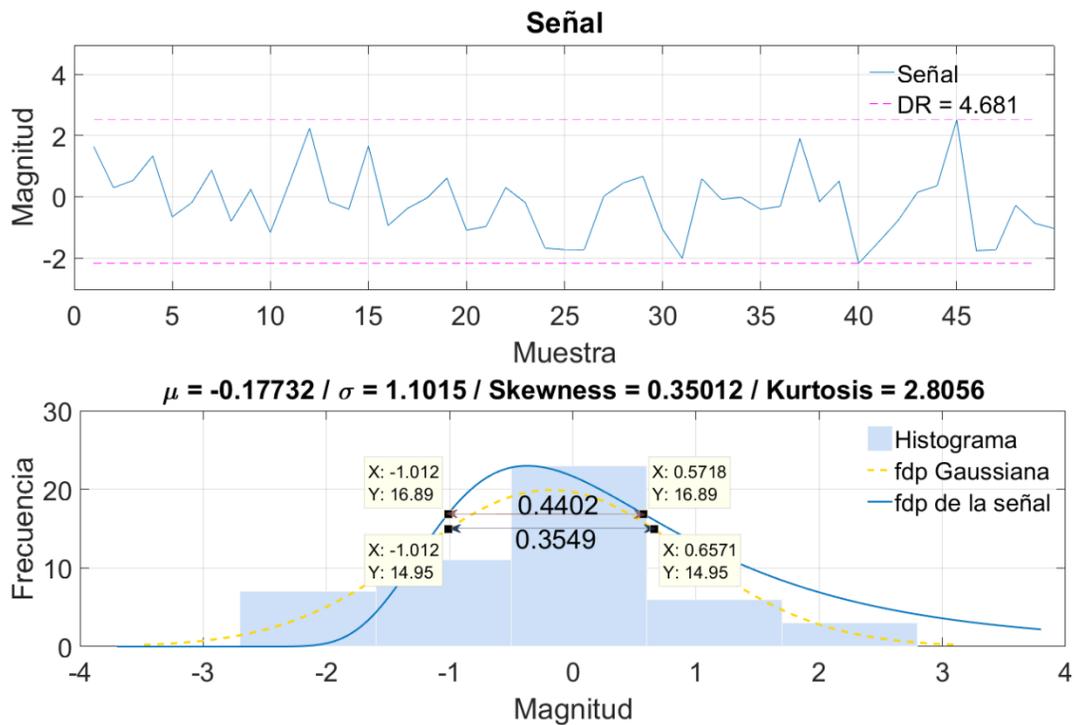


Figura 4.2. Ejemplo de parámetros

4.2. Consideraciones previas a la realización de la evaluación

Una vez vistos los parámetros que se usarán en el análisis de las señales que se verán próximamente, lo siguiente es determinar las condiciones en las que se realizarán las pruebas en trípode.

La información de la orientación de la imagen irá alojada en la información de ésta, por lo que tanto el sistema de orientación como la cámara deberán moverse al unísono. Para conseguir imágenes estables, la cámara irá anclada en un gimbal, por lo que el sistema de orientación deberá estar anclado también a dicho dispositivo. Un gimbal es un dispositivo electrónico formado por una plataforma de fijación, varios motores y un sistema de control que permite mantener un objeto en una posición fija a través de la lectura de sus sensores y la regulación de sus motores [34]. El gimbal usado en este trabajo es el Gimbal Tarot T-2D Brushless (Figura 4.3), porque ya se había usado en trabajos previos desarrollados en el IDeTIC y estaba disponible.



Figura 4.3. Gimbal Tarot T-2D Brushless

Los motores eléctricos de este dispositivo están compuestos por imanes permanentes y bobinados de hilo conductor, por lo que generará un doble campo magnético [35]:

1. A causa de los imanes permanentes del motor.
2. A causa de la circulación de corriente por los hilos conductores.

Además, habría que añadir las posibles interferencias generadas por la estructura metálica del gimbal, la electrónica que acompaña a este sistema y todos los embarcados en el dron. Dadas las consideraciones anteriores sobre el posicionamiento de la IMU para lograr el fin propuesto y sobre los motores *brushless*, la coexistencia de ambos sistemas puede generar datos erróneos de orientación debido a interferencias magnéticas y mecánicas provocadas por los motores del gimbal, por lo que es necesario evaluar dichas interferencias y buscar soluciones que nos permitan reducir el error, en caso de producirse.

Para que las condiciones de orientación fuesen semejantes en cada experimento, se procedió a realizarlas siempre en el mismo lugar: frente al Centro Teológico ubicado en la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, Tafira (Figura 4.4, zona remarcada en rojo). Además, se dibujó en el suelo la forma en la que deberían estar colocadas las patas del trípode (Figura 4.4). No obstante, la colocación del sistema no fue siempre exactamente la misma en todos los casos, por lo que los datos presentes en éste y posteriores capítulos no están en torno al mismo valor central. Sin embargo, esto no induce a ningún tipo de problema ya que el dato de interés es la dispersión de las señales y no su valor central. Finalmente, el flujo de trabajo llevado a cabo en cada experimento es el presente en la Figura 4.5.



Figura 4.4. Lugar de pruebas

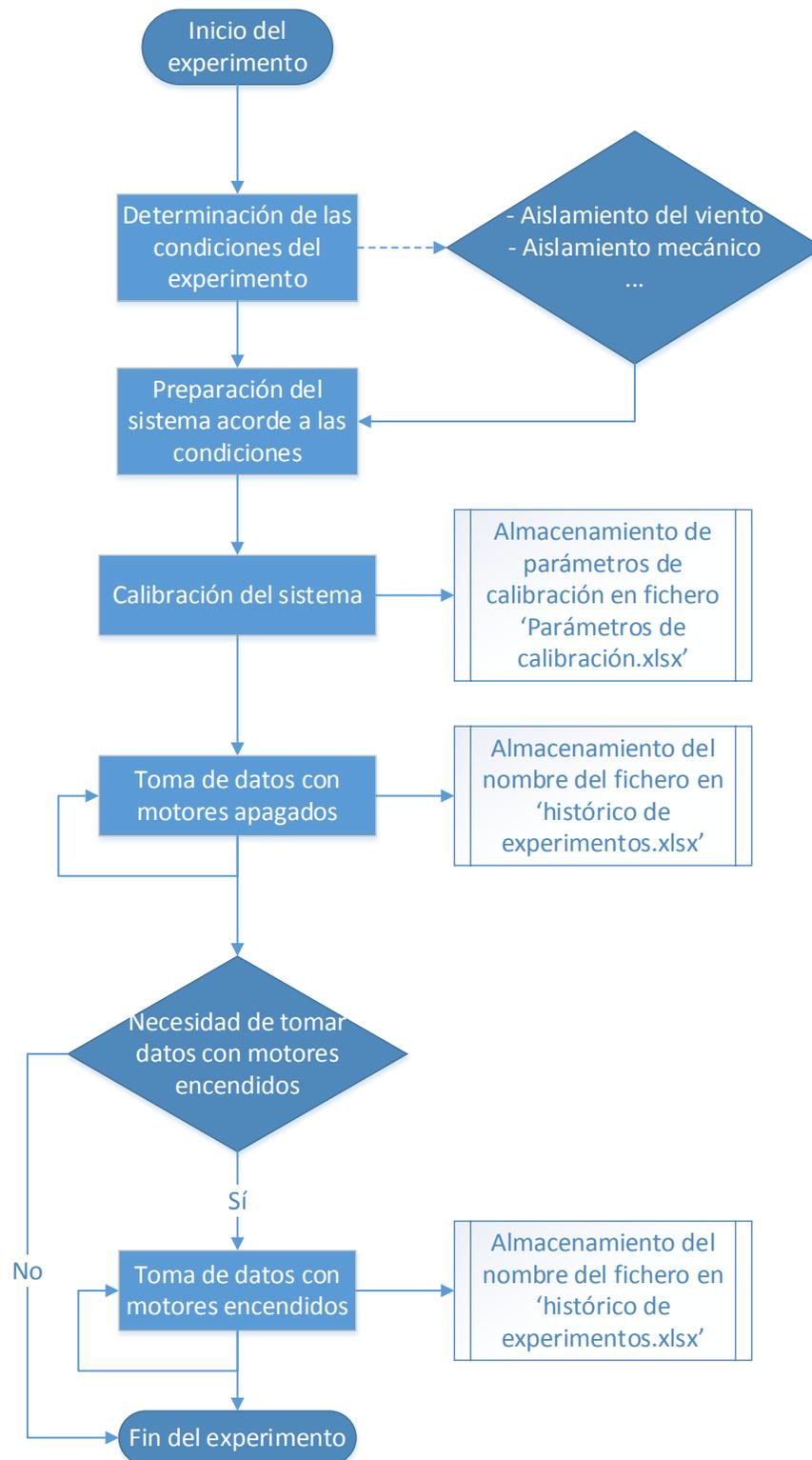


Figura 4.5. Flujo de trabajo llevado a cabo en la evaluación de las interferencias

4.3. Introducción y evaluación inicial de la señal de orientación y los sensores

Para introducir al lector en el conjunto de señales que se usarán en las secciones siguientes, se visualizará qué ocurre con la señal de orientación y de los sensores cuando se encuentran aislados del viento, tal y como se muestra en la imagen derecha de la Figura 4.4, y el sistema estabilizador se encuentra en reposo. Dada estas condiciones, la existencia de interferencias mecánicas es prácticamente nula y cabe pensar que las señales obtenidas deben ser constantes en el tiempo pues a priori, no existe ningún tipo de fuentes de interferencias externas que puedan afectarles. Pero, como se verá en la presente y siguientes secciones, las señales obtenidas no son constantes en el tiempo, sino que oscilan en torno a su valor medio.

En cuanto a la señal de orientación (Figura 4.6), ésta oscila 2.27° respecto de su media. No obstante, esta oscilación no es de amplitud constante, sino que varía a lo largo del tiempo. En términos estadísticos, solo el 6% de las muestras superan los 0.5° de dispersión; es decir, que el 94% se encuentran por debajo de 0.5° de dispersión respecto de la media de la señal. En cuanto a la fdp de la señal (Figura 4.7), como era de esperar dados los valores de *skewness* y *kurtosis* de la señal (Tabla 4.1), es sesgada hacia la izquierda y de mayor pendiente que la fdp normal. Finalmente, en términos espaciales, considerando que la distancia respecto del punto de interés es de 1 km, se comete un desvío de 8.72 metros el 94% de las veces, llegando a tener un máximo de 23.9 metros cuando la señal es mínima.

μ	σ	<i>Skewness</i>	<i>Kurtosis</i>
54.6692 °	0.2683 °	-0.1873	3.6375

Tabla 4.1. Parámetros de la señal de orientación en frontal con los motores apagados

En cuanto a la señal de los sensores, dado que la orientación es una extensión de los datos de éstos, también serán oscilantes, lo que indica la extrema delicadeza de los sistemas con los que se trabaja en este Trabajo Fin de Grado. Empezando por los sistemas inerciales (Figura C.1-Figura C.6), se observa que leves movimientos provocados por el viento generan oscilaciones en la señales. Además, se puede observar la conexión natural existente entre los dos subsistemas que

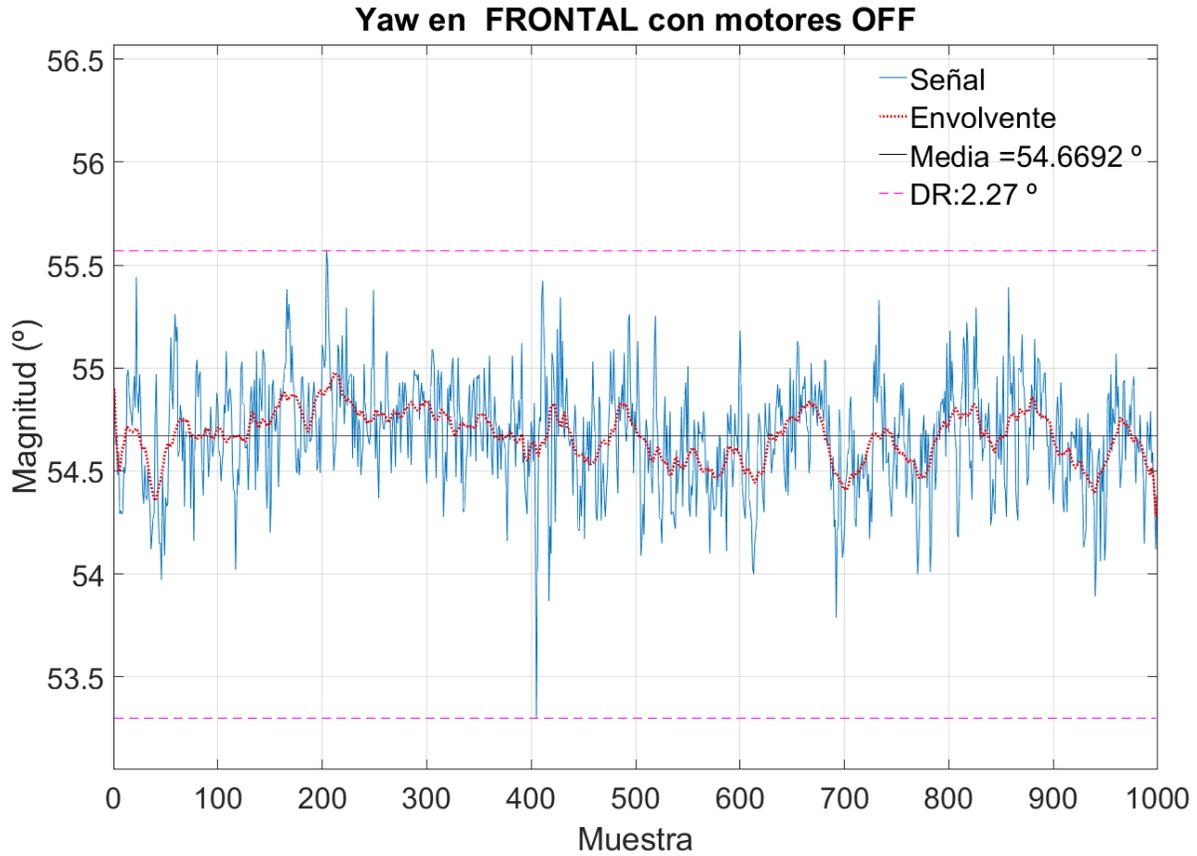


Figura 4.6. Yaw con motores apagados y aislado del viento

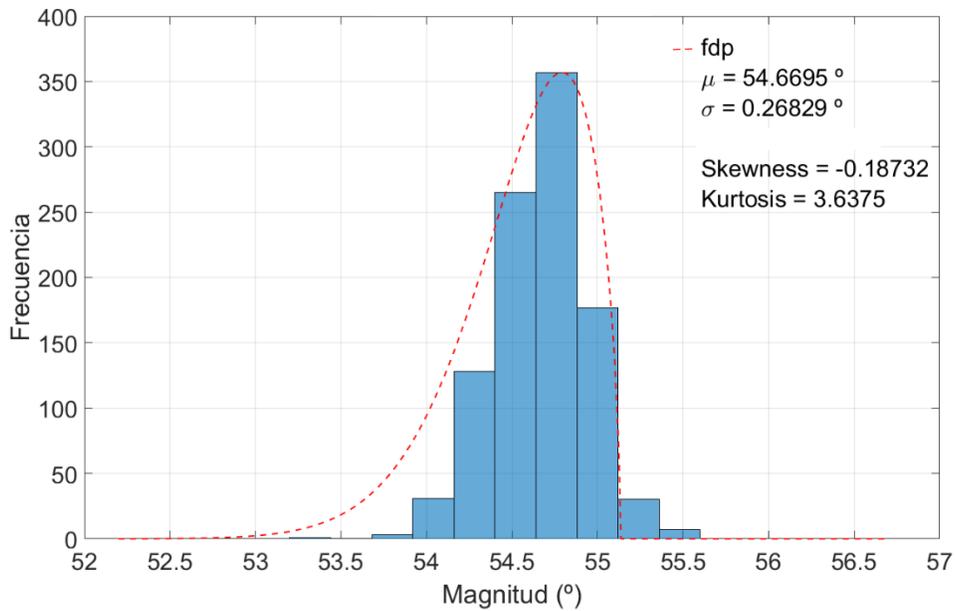


Figura 4.7. Histograma yaw frontal en reposo

integran al sistema inercial en la muestra 404, donde en sendos subsistemas se encuentra el mínimo de la señal. En cuanto al magnetómetro (Figura C.7-Figura C.9), se observa que el campo magnético medido no es constante, lo que indica que, aunque a priori se pueda pensar que no existan fuentes de interferencia magnética cerca del sistema, la existencia de infraestructuras metálicas (coches, motos, móviles...) deforman el campo magnético que rodea al sistema. Finalmente, al igual que en el caso de la señal de orientación, se aprecia que la dispersión de los valores de las señales es muy distante de los valores máximos y mínimos de éstas (Tabla 4.2), siendo las apariciones de éstos prácticamente nulas a lo largo de cada una de ellas.

Sensor	Eje X		Eje Y		Eje Z	
	DR	EDR	DR	EDR	DR	EDR
Acelerómetro (mg/LSB)	11.06	5.20 (94.99%)	7.97	2.20 (95.20%)	13.40	8.20 (98.90%)
Giróscopo (°/s)	30.00	5.80 (97.50%)	13.00	3.40 (94.39%)	38.00	7.20 (95.40%)
Magnetómetro (mGauss)	14.04	8.15 (94.25%)	2.91	1.60 (95.30%)	3.10	2.01 (94.50%)

Tabla 4.2. Comparativa de rangos dinámicos presentes en las señales de los sensores

En conclusión, los datos obtenidos son oscilantes y sus respectivos rangos dinámicos se encuentran alterados, como consecuencia de la aparición de picos esporádicos en las señales. Por lo tanto, es necesario caracterizar el sistema cuando está en reposo y con aparentes fuentes externas de interferencia, de manera que se pueda determinar las fuentes de error que afectan al sistema.

4.4. Evidencias de la existencia de las interferencias

Lo primero de todo es evaluar visualmente si verdaderamente el sistema se ve afectado cuando encendemos el gimbal. Para ello, se tomarán los datos relativos a la orientación cuando los

motores del gimbal están apagados y cuando están encendidos para, posteriormente, realizar una comparación de la dispersión de ambas señales (Figura 4.8).

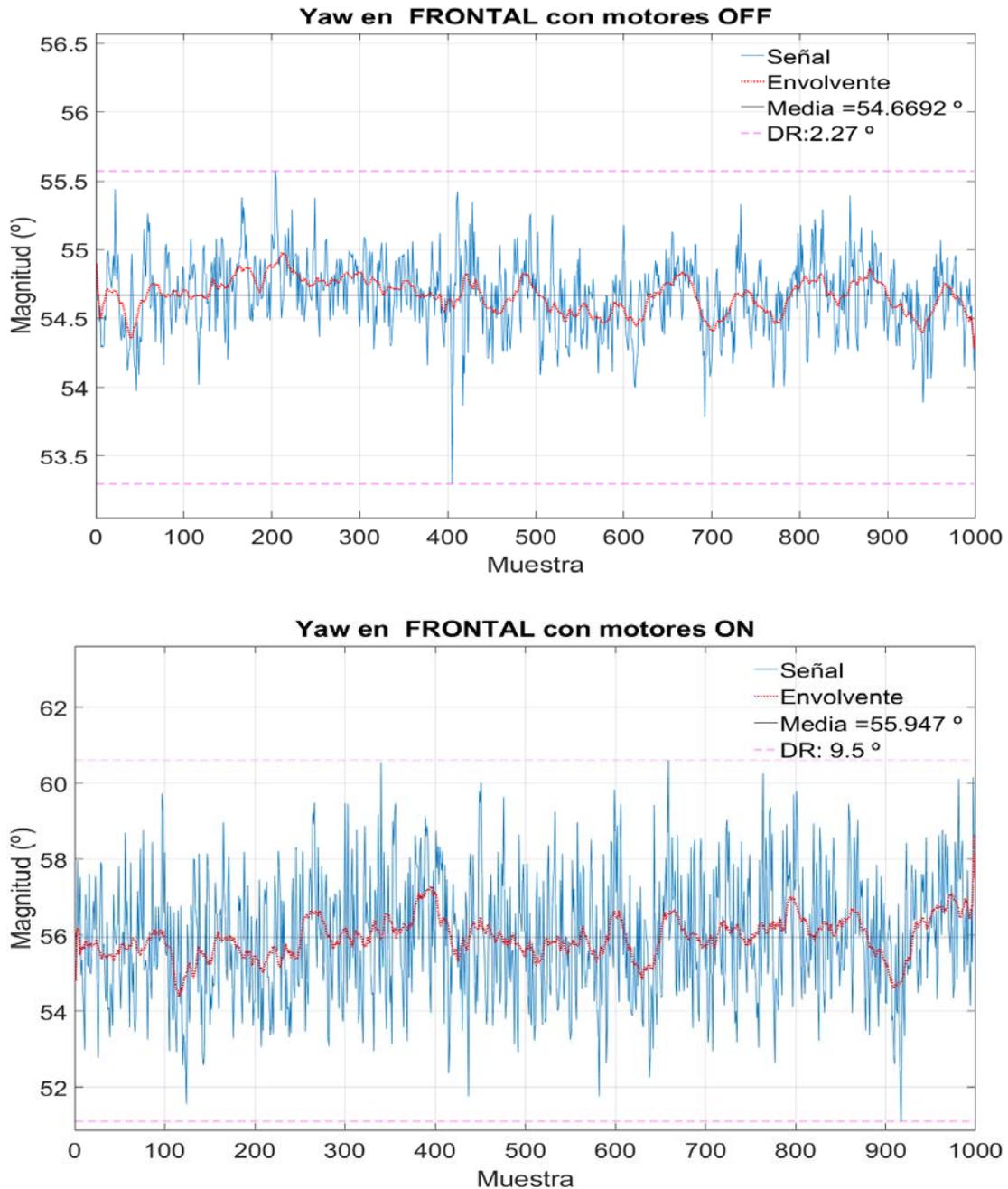


Figura 4.8. Evidencia de la existencia de interferencias

Se aprecia que con los motores del gimbal apagados, el rango dinámico de la señal de orientación es de 2.27°, lo que conlleva un desvío máximo de 31.61m en términos espaciales (todos los datos espaciales están referenciados a 1km del punto de interés). Respecto de su EDR, se tiene que

ésta es de 1° , que traducido a distancia es un desvío de 17.45m. En términos estadísticos, la desviación estándar es relativamente baja, como consecuencia del bajo rango dinámico de la señal, y su fdp tiene $skewness < 0$ y $kurtosis > 3$ (Figura 4.9), lo que conlleva que sea sesgada hacia la izquierda y con mayor pendiente que una fdp normal.

En cuanto a la señal de orientación cuando los motores del gimbal están encendidos, el rango dinámico de la señal es de 9.5° , que en términos espaciales conllevaría un desvío máximo de 165.61m. En este caso, su EDR es de 2.63° , que en términos espaciales es un desvío de 45.90m. En cuanto a los términos estadísticos de esta señal, aumenta la desviación estándar, como consecuencia del aumento del rango dinámico de la señal, y su fdp tiene $skewness > 0$ y $kurtosis < 3$ (Figura 4.9), siendo ésta por lo tanto sesgada hacia la derecha y con menor pendiente que una fdp normal (colas más anchas).

Del análisis de ambas señales, se extrae que encender los motores del gimbal conlleva un aumento del rango dinámico de la señal, siendo éste de un 318.50% en términos angulares y un 423.92% en términos espaciales. No obstante, en términos de EDR, el aumento es de un 163% en términos tanto angulares como espaciales, lo que es sustancialmente menor que la comparativa anterior. En cuanto a los parámetros estadísticos de las señales se obtiene que al encender los motores del gimbal, éstos varían de manera que:

1. Aumenta la desviación estándar, como consecuencia del aumento de la dispersión.
2. Aumenta el $skewness$ de la señal, haciendo que la distribución de valores sea más simétrica, aunque aun sesgada (Figura 4.10).
3. Disminuye la $kurtosis$ de la señal, modificando la fdp de la señal de manera que ésta es más ancha que la otra (Figura 4.10).

Todos los hechos anteriores indican la existencia de un conjunto de interferencias cuando se encienden los motores del gimbal, que están afectando al correcto cálculo de la orientación del dron. Es por esto por lo que es necesario evaluar y caracterizar cada una de ellas para conocer su naturaleza, su efecto sobre el sistema y reducir su influencia.

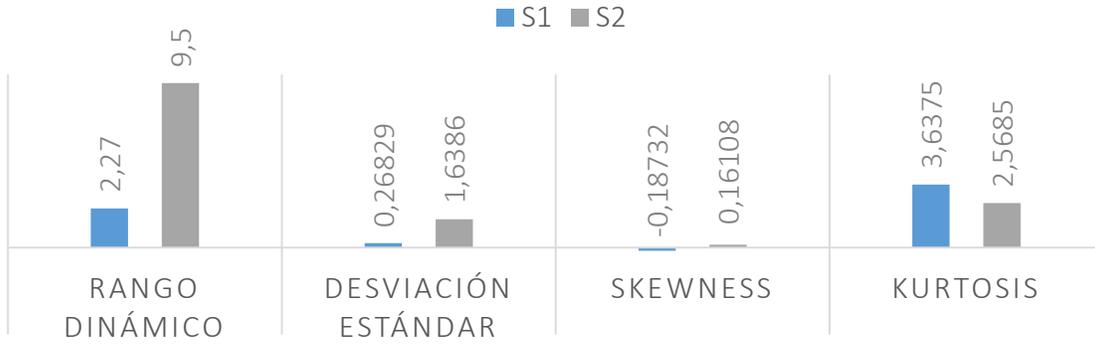


Figura 4.9. Comparativa de parámetros

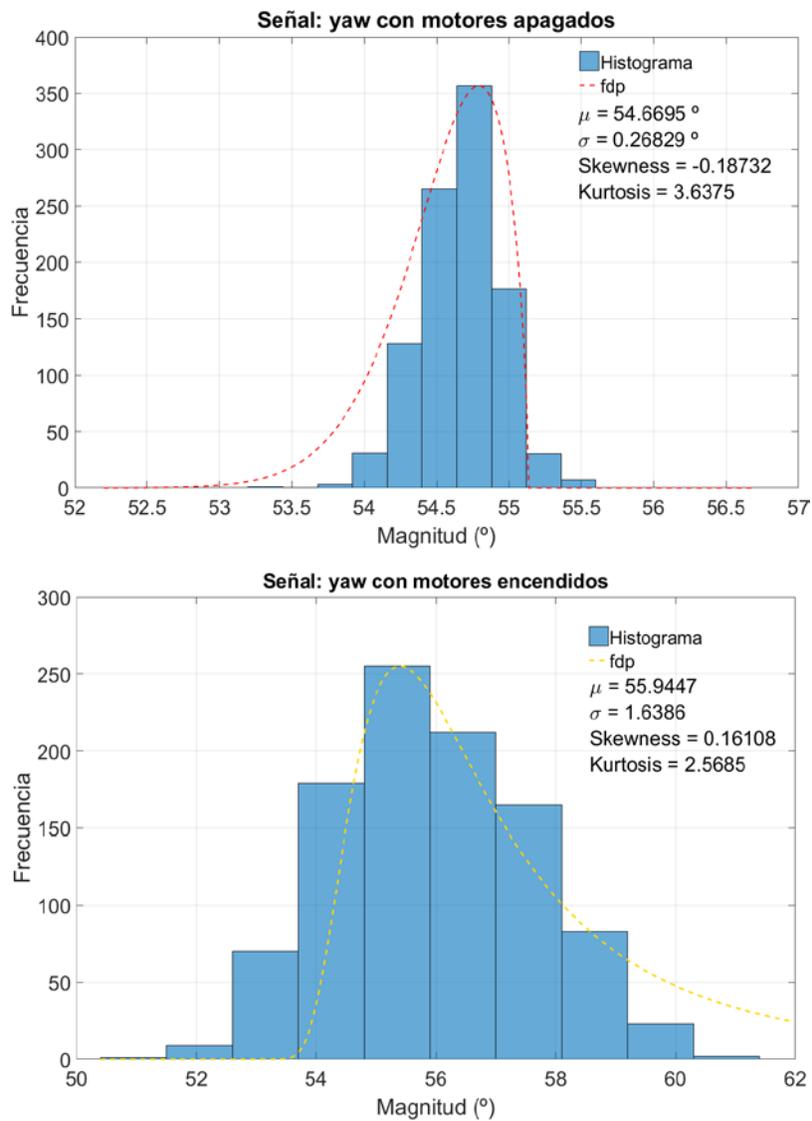


Figura 4.10. Comparativa de histogramas (I)

4.5. Interferencias mecánicas

La Primera Ley de Newton o Ley de Inercia dice lo siguiente: *“Todo cuerpo persevera en su estado de reposo o movimiento uniforme y rectilíneo a no ser que sea obligado a cambiar su estado por fuerzas impresas sobre él.”* Según esta ley y el hecho de que los sistemas de medidas inerciales están ligados al movimiento del sistema (ver Capítulo 2, apartado 2.1.1), cualquier fuerza aplicada sobre éstos conllevará una variación en su momento de inercia, y por ende, en los datos que ofrecen y en la orientación calculada. Este tipo de fuentes de error se denominarán interferencias mecánicas debido al hecho de que son provocadas por movimientos mecánicos en los sistemas inerciales (ver Capítulo 2, apartado 2.3).

Como se menciona en el apartado 4.2, la IMU irá alojada en el gimbal, por lo que sufrirá las oscilaciones generadas cuando éste intente mantener estable el sistema de georreferenciación, compuesto, entre otros, por la IMU. Esta vibración se considerará como interferencia mecánica ya que su efecto es alterar el momento inercial del sistema, y por lo tanto, el cálculo de la orientación (ver Capítulo 2, apartado 2.3).

Para llevar a cabo la evaluación de estas interferencias, se ha determinado que las condiciones en las que ha de realizarse el experimento son las siguientes:

- 1.- Colocar la IMU en el lateral izquierdo del gimbal, aislarlo del viento por si éste pudiera generar vibraciones, y obtener los parámetros procedentes de todos los sensores y del cálculo de la orientación (Figura 4.11).



Figura 4.11. Aislamiento de la IMU del viento

- 2.- Colocar la IMU a 2mm de distancia del gimbal, aislarlo del viento y aislarlo de las vibraciones mediante espuma (Figura 4.12).

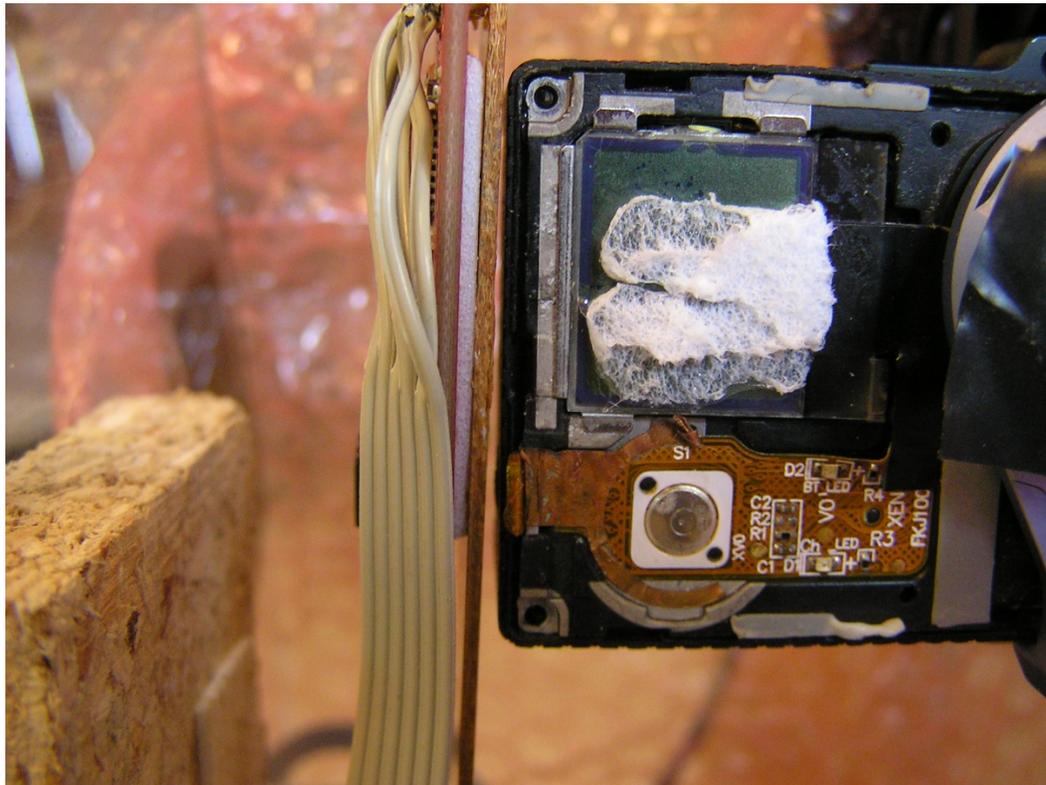


Figura 4.12. Posicionamiento de la IMU a 2mm del gimbal

Colocando la IMU en estas dos posiciones, se obtienen datos de la IMU en dos marcos de referencia: cuando está pegada al sistema y vibran al unísono, y cuando ésta está despegada y a priori las vibraciones dejan de afectarle en un alto porcentaje. Lo primero que hay que analizar es la dispersión de la señal de orientación cuando la IMU está pegada y separada del gimbal y los motores encendidos (Figura 4.13). Empezando por la señal de orientación cuando la IMU está pegada al gimbal, el rango dinámico de la señal es de 10.62° , lo que en términos espaciales sería una desviación máxima de 185.09m. En términos de EDR, se tiene que ésta es de 3.8° , por lo que la desviación espacial pasaría a ser de 66.31m. En cuanto a los términos estadísticos de la señal (Figura 4.14), la desviación estándar es de aproximadamente 2.15° , y la fdp tiene *skewness* ≈ 0 y *kurtosis* < 3 , por lo que esta es prácticamente simétrica y de pendiente menor que la fdp normal. En cuanto a la señal de orientación cuando la IMU se encuentra despegada, su rango dinámico es de 6.47° , que en términos espaciales se traduce como un desvío máximo de 112.86m.

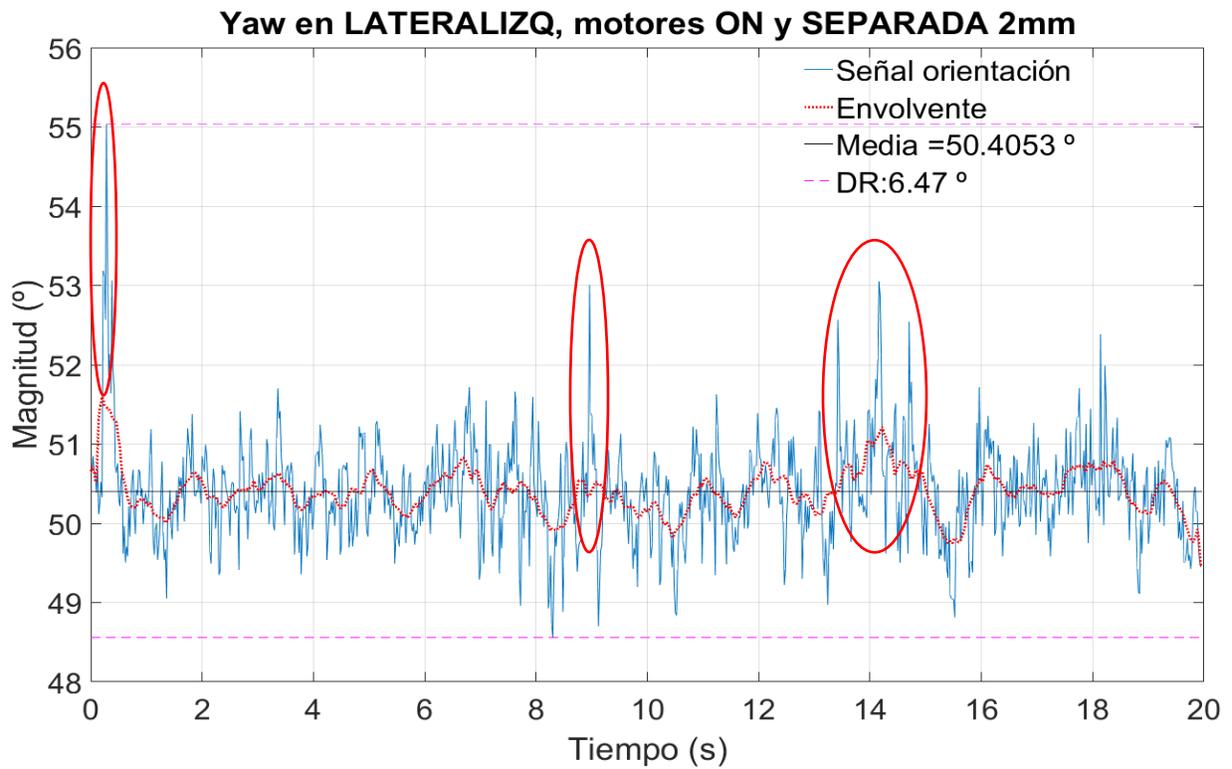
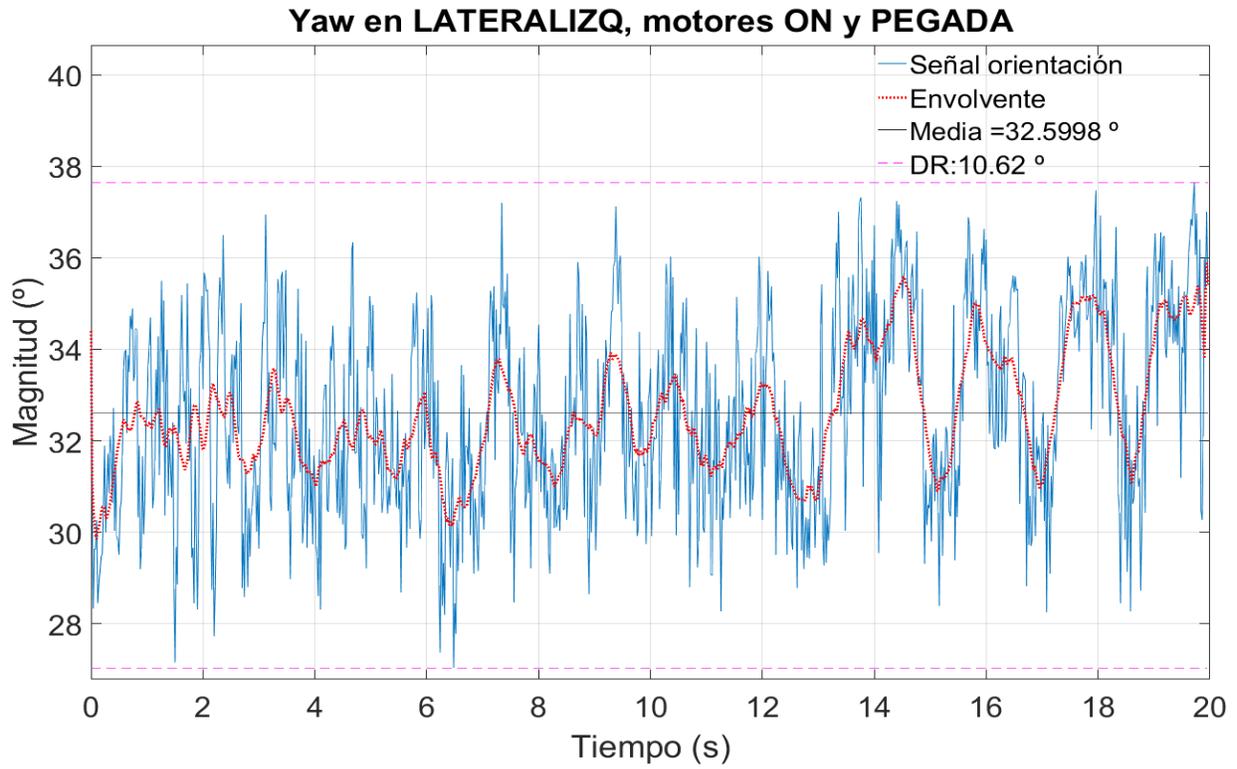


Figura 4.13. Comparativa de yaw (I)

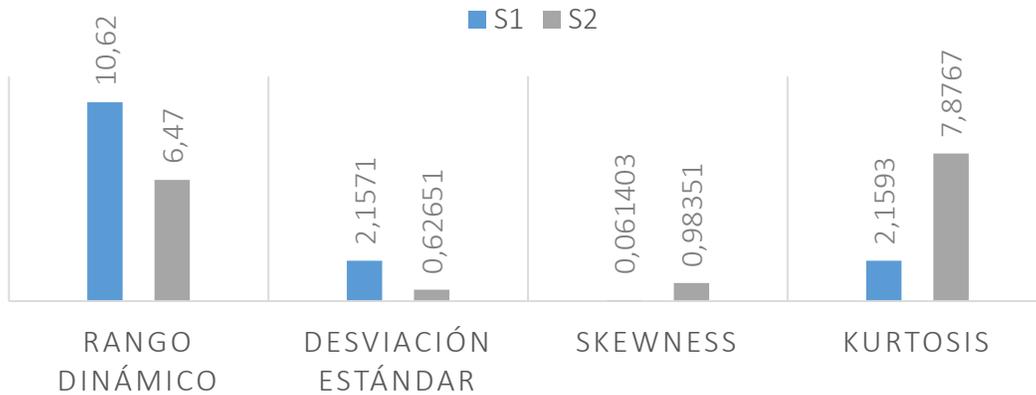


Figura 4.14. Comparativa de parámetros (II)

En cuanto a su EDR, ésta es de 1.1º, por lo que el desvío espacial sería de 19.19m. En cuanto a sus términos estadísticos (Figura 4.14), la desviación estándar ha disminuido hasta los aproximadamente 0.63º, y su fdp tiene *skewness* > 0 y *kurtosis* > 3, por lo que es asimétrica (sesgada hacia la derecha) y de pendiente mayor que una fdp normal (colas estrechas).

De la comparación de los datos de ambas señales, se observa que cuando la IMU se encuentra pegada al gimbal:

1. El rango dinámico aumenta un 64.14%, siendo el aumento del desvío espacial de un 64%, y el EDR aumenta un 245.45%, que en términos espaciales se traduce en un 254.54%.
2. La desviación estándar aumenta, como consecuencia del aumento de la dispersión.
3. El *skewness* pasa de ser prácticamente 0 (distribución normal) a 0.98 como consecuencia de la existencia de los picos en la señal (resaltados en rojo en la Figura 4.13), de manera que la fdp de la señal se sesga hacia la derecha, y por lo tanto, la distribución de valores no es simétrica (Figura 4.15).
4. La *kurtosis* pasa de ser menor a 3 (distribución con colas anchas) a mayor que 3, de manera que la fdp de la señal es apuntada, indicando que existe una mayor concentración de valores en torno a su media (Figura 4.15).

Una vez vista la alteración que sufre la señal de orientación cuando el sistema se encuentra pegado al gimbal, es necesario esclarecer el porqué de esa alteración. Es decir, analizar los datos

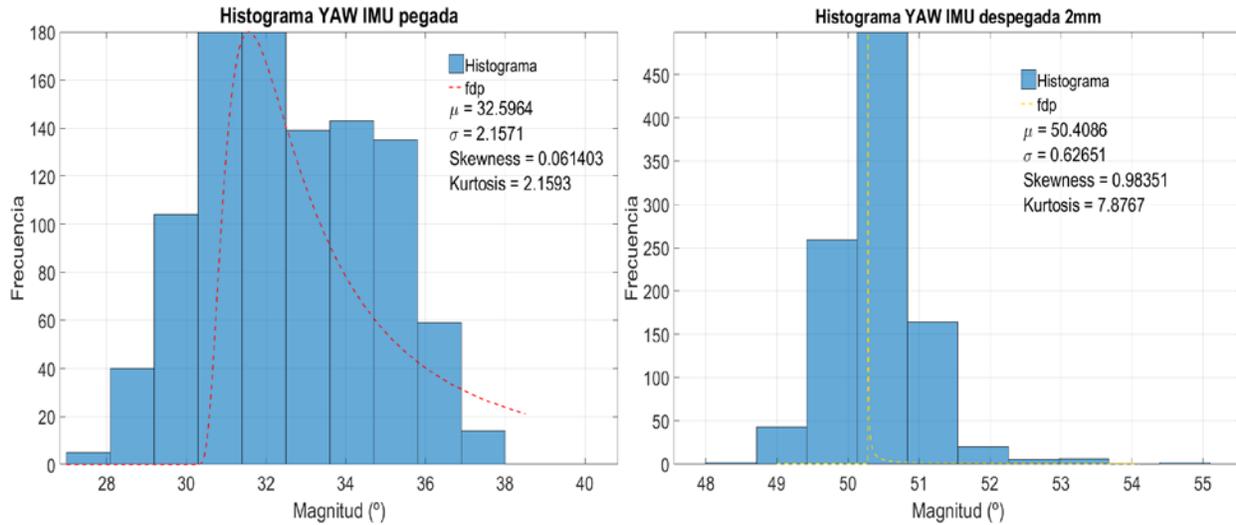


Figura 4.15. Comparativa de histogramas (I)

procedentes de los distintos sensores que componen al sistema de orientación con el fin de determinar cuál es la fuente de interferencias. El primer sensor a analizar es el magnetómetro, siendo la Figura 4.16 (ampliada en Anexo C, Figura C.10 – Figura C.15) en la que se puede ver la señal magnética en cada uno de los ejes.

Como se puede observar, en algunos ejes existe una cierta fluctuación de los datos que aumentan el rango dinámico de la señal. Es por esto que es necesario realizar la evaluación del rango dinámico efectivo; es decir, de aquel en el que se encuentra la práctica totalidad de la señal (Figura 4.17), siendo el rango de éste no superior a 2.35 mGauss, por lo que se puede considerar que la interferencia magnética es prácticamente constante en el caso que concierne a esta sección.

Dada la consideración previa, es necesario analizar las señales procedentes del giróscopo y del acelerómetro pues son, a priori, las principales fuentes de error en este caso. Empezando por las señales acelerométricas (Figura 4.18, ampliada en Anexo C, Figura C.16 – Figura C.21), cuando la IMU está separada del gimbal el rango dinámico de éstas es de 14.23 mg/LSB en el eje X, 65.74 mg/LSB en el eje Y y 45.57 mg/LSB en el eje Z. En cuanto a los términos estadísticos, en el eje X la fdp tiene $skewness > 0$ y $kurtosis < 3$, por lo que la fdp es sesgada a la derecha y con menos pendiente que una fdp normal, en el eje Y y Z tiene $skewness < 0$, siendo la $kurtosis > 3$ en el eje

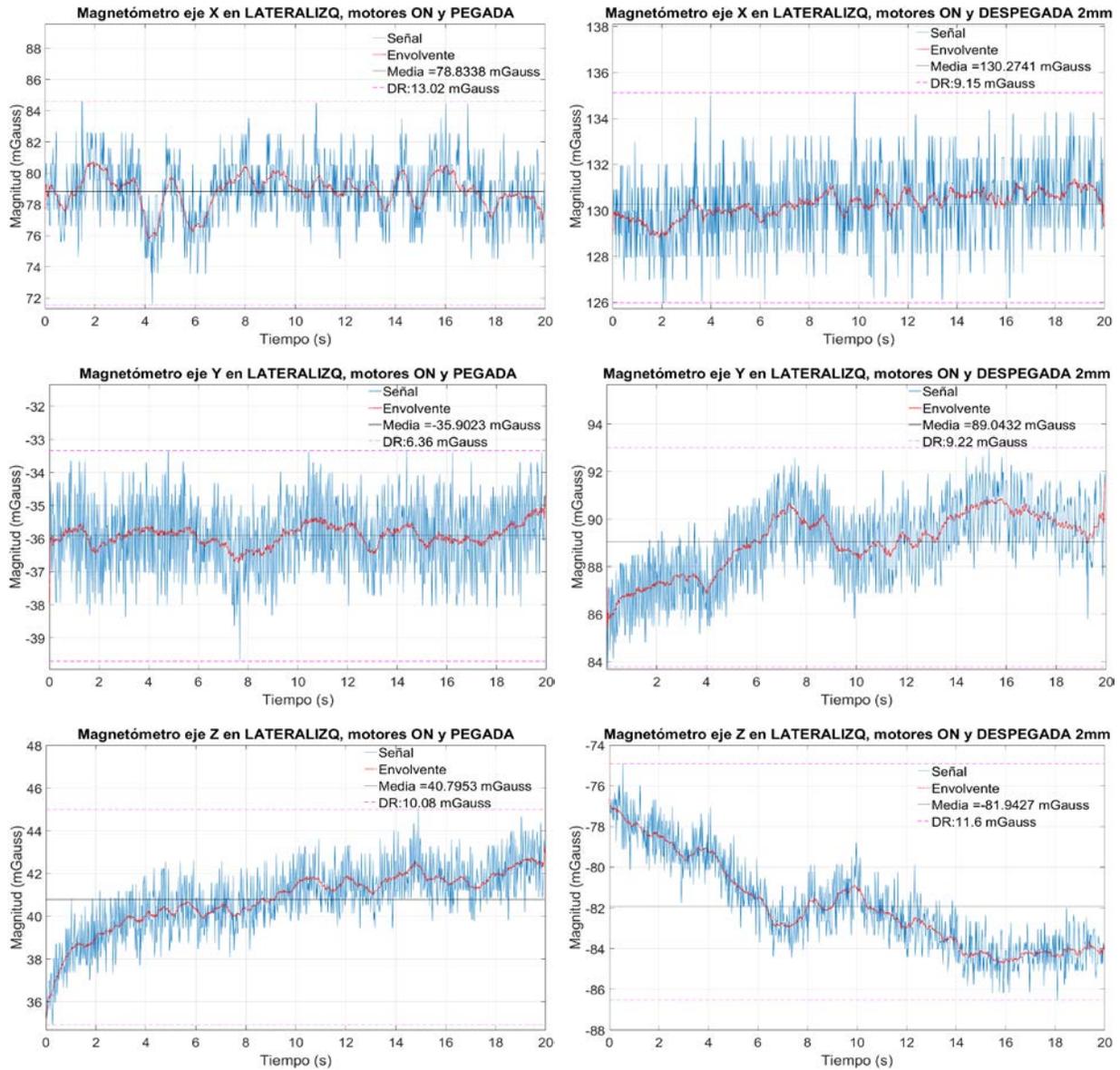


Figura 4.16. Señal magnética con la IMU pegada y despegada 2mm del gimbal

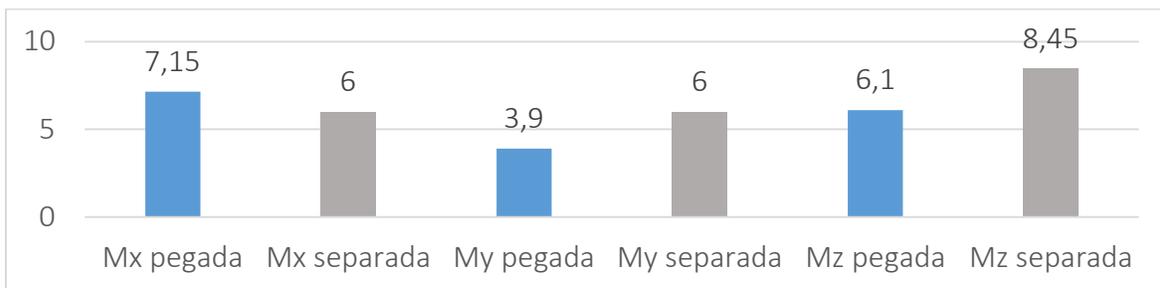


Figura 4.17. Rango dinámico efectivo del magnetómetro (I)

Y y menor a 3 en el eje Z, por lo que la fdp de ambas señales es sesgada hacia la izquierda pero con mayor pendiente que una fdp normal en el eje Y, y con menos en el eje Z (Figura 4.19).

En cuanto a la señal acelerométrica cuando la IMU se encuentra pegada al gimbal, el rango dinámico de ésta en los diferentes ejes es de 20.29 mg/LSB en el eje X, 45.57 mg/LSB en el eje Y y 34.85 mg/LSB en el eje Z. Respecto de los términos estadísticos, la fdp de la señal en el eje X es sesgada hacia la izquierda ($skewness < 0$) y ligeramente sesgada a la derecha ($skewness > 0$) en los ejes Y y Z, además de ser con mayor pendiente que una fdp normal en el eje X ($kurtosis > 3$) y con menor pendiente en los ejes Y y Z ($kurtosis < 3$) (Figura 4.19).

En definitiva, se observa que existe una mayor dispersión de las señales cuando la IMU se encuentra pegada al gimbal, siendo los aumentos de 214.24% en el eje Y y 30.76% en el eje Z. En cuanto al eje X, la existencia de picos provocados por el viento ha provocado el aumento del rango dinámico de la señal cuando esta se encuentra separada del gimbal, siendo este aumento de 388.61% (Figura 4.19). Esto indica que el sistema es más inmune a las corrientes de viento cuando se encuentra pegada al gimbal, pues vibran al unísono y éste le hace de amortiguador. En términos estadísticos (Figura 4.19), se observa un aumento de la desviación estándar en aquellas señales en las que el rango dinámico aumenta, así como la deformación de la fdp de la señal como consecuencia de la aparición de picos en las señales.

Finalmente, en cuanto a las señales procedentes del giróscopo (Figura 4.20, ampliada en Anexo C, Figura C.22– Figura C.27), empezando por las obtenidas cuando la IMU se encuentra separada del gimbal, el rango dinámico de ésta en los diferentes ejes es de 21°/s en el eje X, 192°/s en el eje Y y 47°/s en el eje Z. En cuanto a los términos estadísticos, se obtiene que las señales de los ejes X e Y tienen una fdp sesgada a la derecha ($skewness > 0$) y sesgada a la izquierda ($skewness < 0$) en el eje Z, siendo todas ellas con mayor pendientes que una fdp normal ($kurtosis > 3$) (Figura 4.21).

En cuanto a las señales giroscópicas obtenidas cuando la IMU está pegada al gimbal, el rango dinámico en los diferentes ejes es de 346°/s en el eje X, 11°/s en el eje Y y 50°/s en el eje Z. Respecto de los términos estadísticos de cada una de las señales, la fdp de cada una de las señales

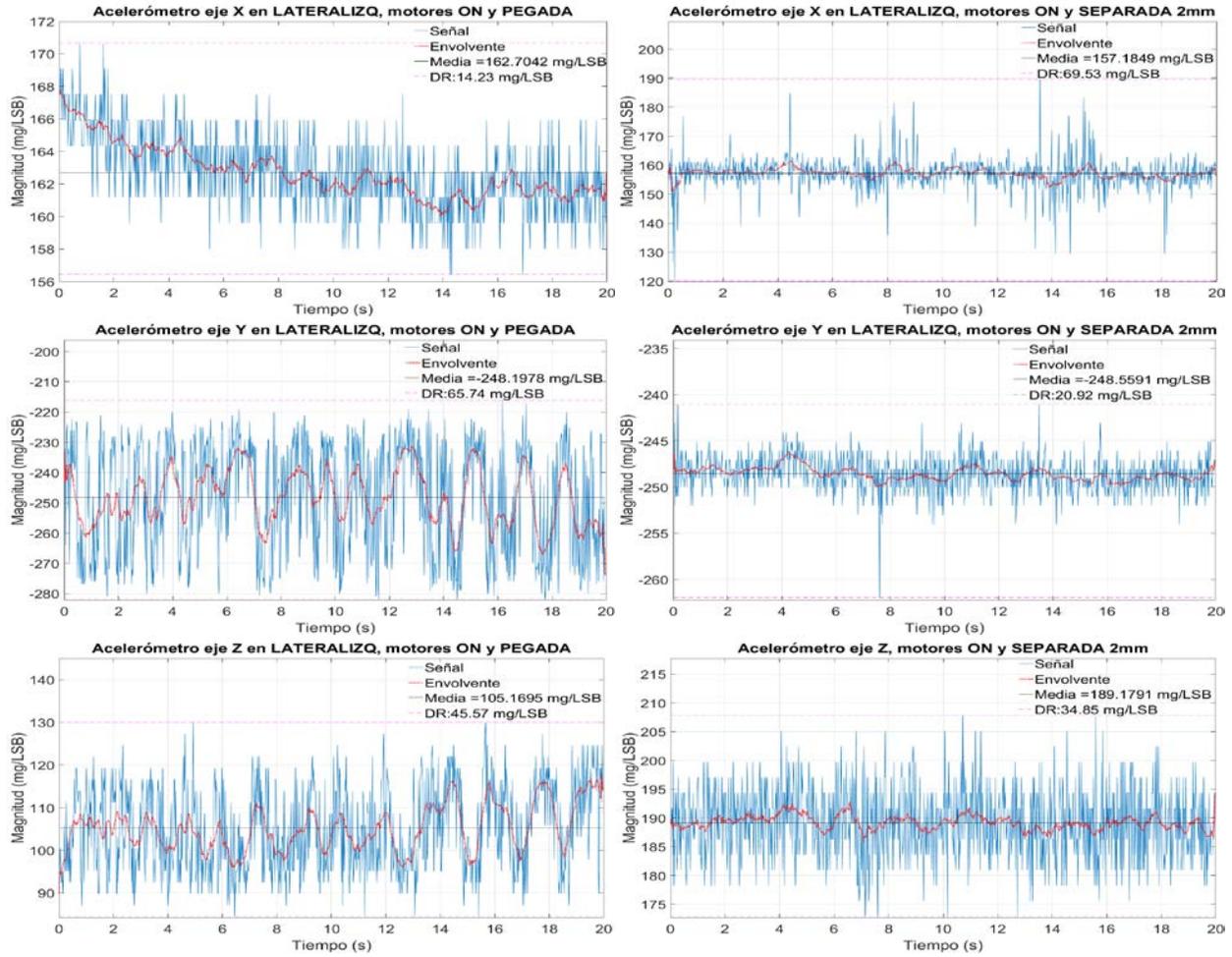


Figura 4.18. Señal del acelerómetro con la IMU pegada y despegada 2mm del gimbal

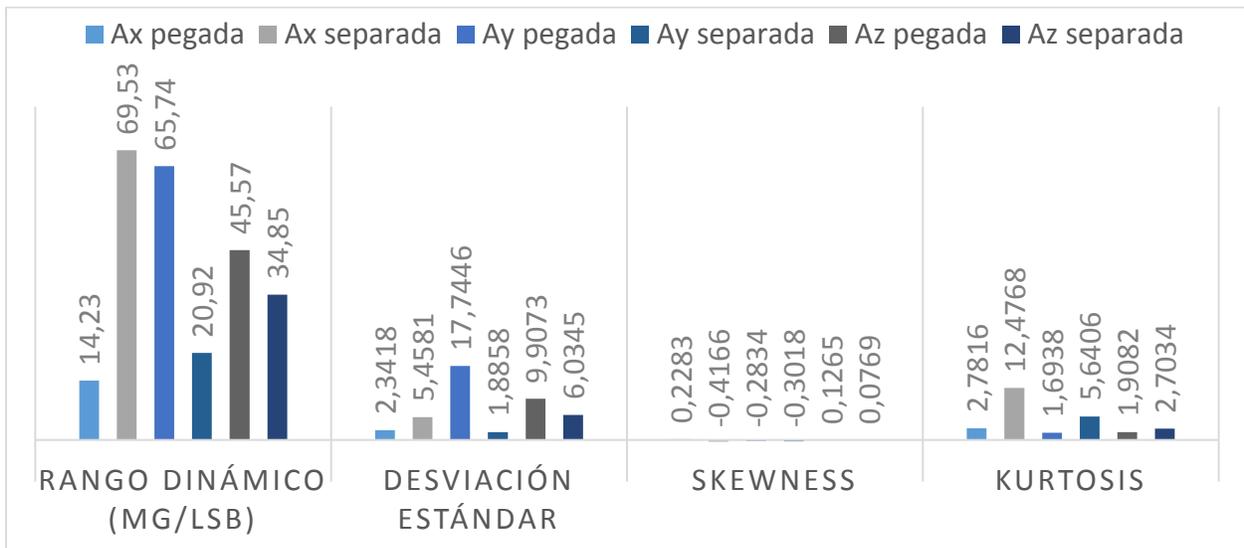


Figura 4.19. Comparativa de parámetros (III)

es prácticamente simétrica ($skewness \approx 0$) y ligeramente con menor pendiente que una fdp normal ($kurtosis < 3$) (Figura 4.21).

Del análisis de los datos anteriores, se extrae que cuando la IMU se encuentra pegada al gimbal, el rango dinámico aumenta un 1547.62% en el eje X y un 6.38% en el eje Z. En cuanto al eje Y, la propia vibración estructural provocada por la vibración del gimbal y corrientes de viento que penetrasen la malla protectora, alteraron el momento de inercia del sistema en el eje Y, por lo que en vez de disminuir el rango dinámico éste aumentó un 1645.45%. Atendiendo a su EDR, que es de 27 °/s, el aumento del rango dinámico sería de un 145.45%, una cantidad sustancialmente menor. En cuanto a los términos estadísticos, se tiene lo mismo que en los casos anteriores: aumento de la desviación estándar en aquellas señales en las que aumenta el rango dinámico, y la alteración de la fdp de la señal como consecuencia de la aparición de picos en las señales.

En conclusión, las interferencias mecánicas generadas por el gimbal tienen una fdp muy próxima a una distribución normal, por lo que el efecto de éstas sobre el estado natural del sistema es aumentar su rango dinámico, y como consecuencia, su desviación estándar. En cuanto a las corrientes de viento, las interferencias generadas por éstas no son de fdp próxima a una distribución normal, por lo que su efecto sobre el sistema es aumentar su rango dinámico, y en consecuencia su desviación estándar, y alterar la fdp del sistema inicial, dejando de ser próxima a una distribución normal. Todo esto conlleva el aumento del rango dinámico, la desviación estándar y la deformación de la fdp de la señal de orientación obtenida (ver Figura 4.15), indicando que es prácticamente imposible predecir el efecto que tiene el viento sobre los sistemas inerciales, y por ende en la señal de orientación, por lo que habrá que buscar métodos de aislamiento mecánico que permitan reducir su efecto.

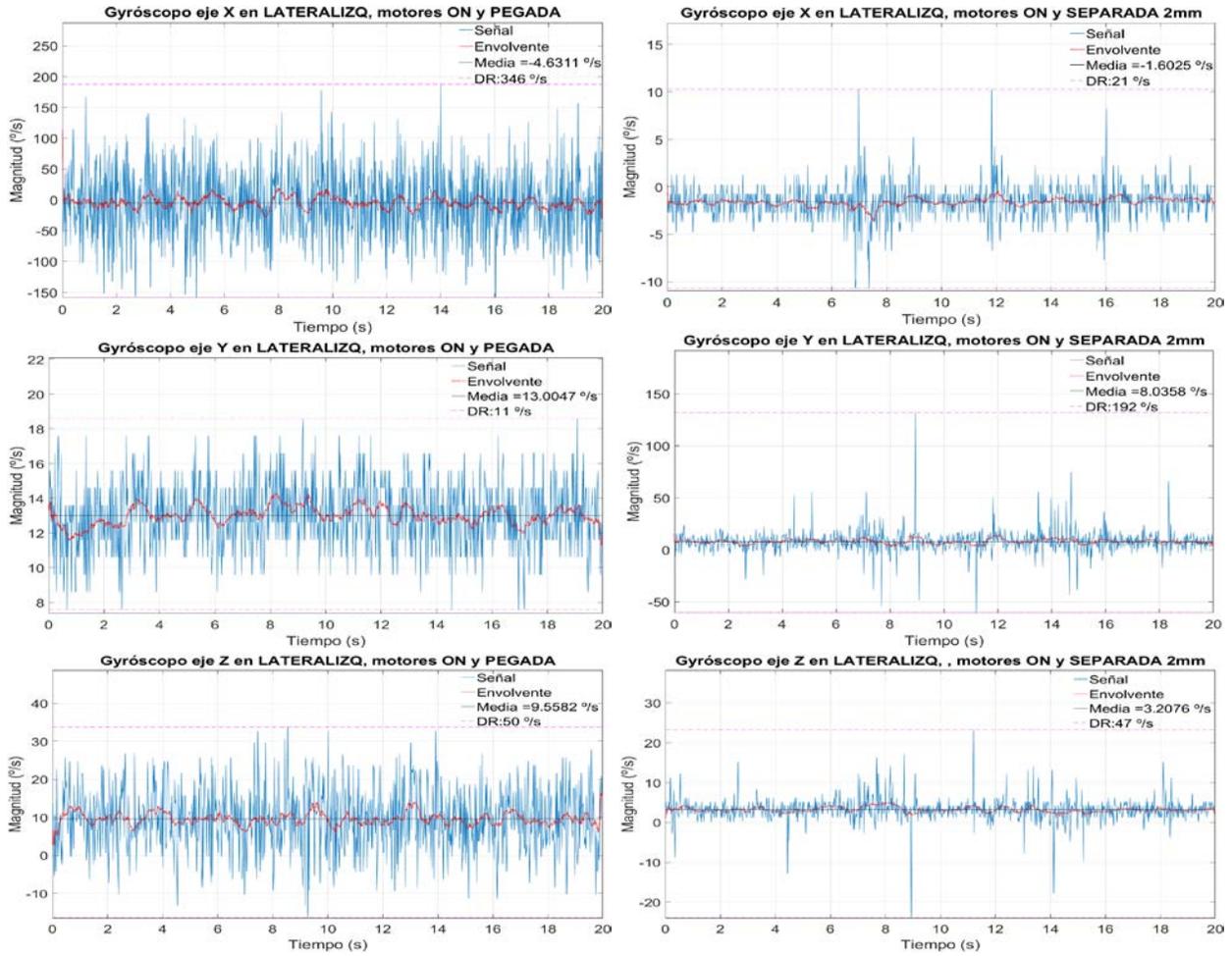


Figura 4.20. Señal del girómetro con la IMU pegada y despegada 2mm del gimbal

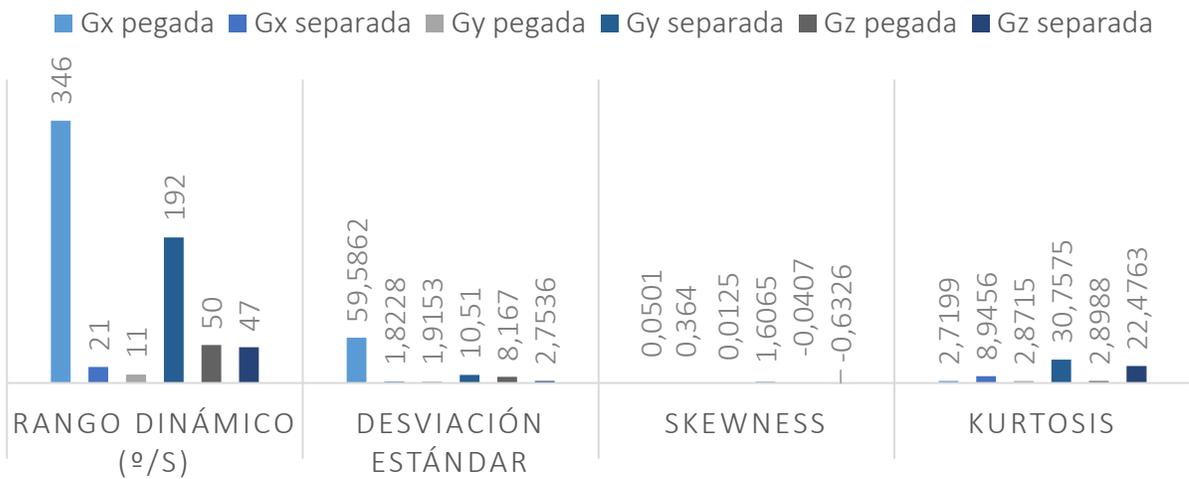


Figura 4.21. Comparativa de parámetros (IV)

4.6. Interferencias magnéticas

Una vez han sido caracterizadas las interferencias mecánicas y evaluado su efecto sobre el cálculo de la orientación, lo siguiente es evaluar las interferencias magnéticas provocadas por el funcionamiento de los motores del gimbal, ya que, como se describe en el apartado 2.3, alteraciones en el campo magnético que rodea a la IMU conllevarán alteraciones en la medida de la orientación del sistema.

Para llevar a cabo el análisis de estas interferencias, se ha procedido a posicionar la IMU tal y como está en la Figura 4.22 y obtener los parámetros inerciales, magnéticos y de orientación medidos cuando los motores del gimbal están funcionando y cuando no, de manera que se pueda observar la existencia de dichas interferencias.

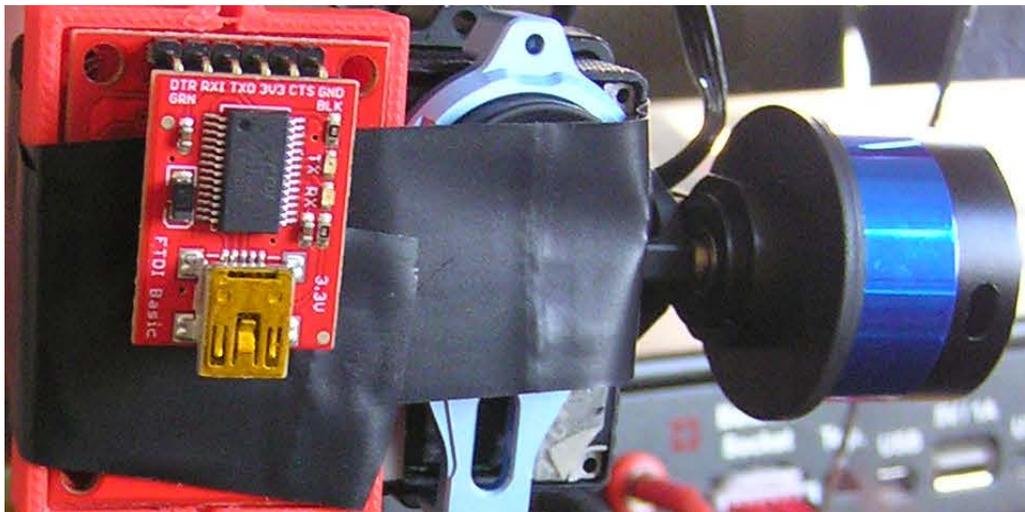


Figura 4.22. IMU en el frontal del gimbal

La Figura 4.23 representa la señal de orientación obtenida en cada uno de los casos. Empezando por la señal de orientación obtenida cuando los motores del gimbal están apagados, el rango dinámico de esa señal es de 2.27° . En cuanto a los términos estadísticos, la fdp de la señal es sesgada a la izquierda ($skewness < 0$) y con más pendiente que una fdp normal ($kurtosis > 3$) (Figura 4.24). Siguiendo con la señal obtenida cuando los motores están encendidos, el rango dinámico de ésta es de 9.5° , siendo la fdp de ésta sesgada a la derecha ($skewness > 0$) y con menor pendiente que una fdp normal ($kurtosis < 3$) (Figura 4.24).

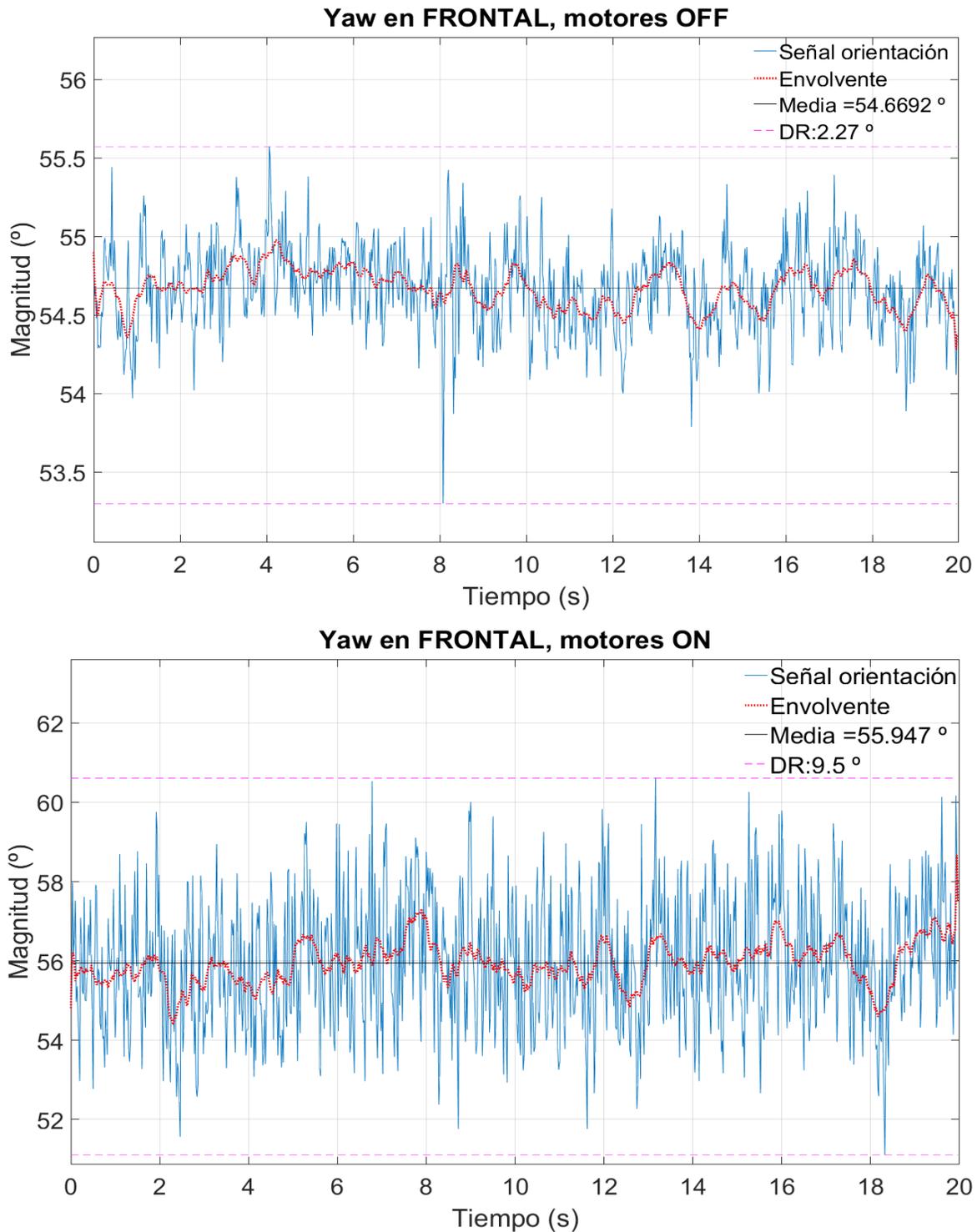


Figura 4.23. Comparativa de yaw (II)

Por lo tanto, encender los motores del gimbal conlleva un aumento del rango dinámico de la seña, así como la alteración de la fdp de la señal (Figura 4.25).

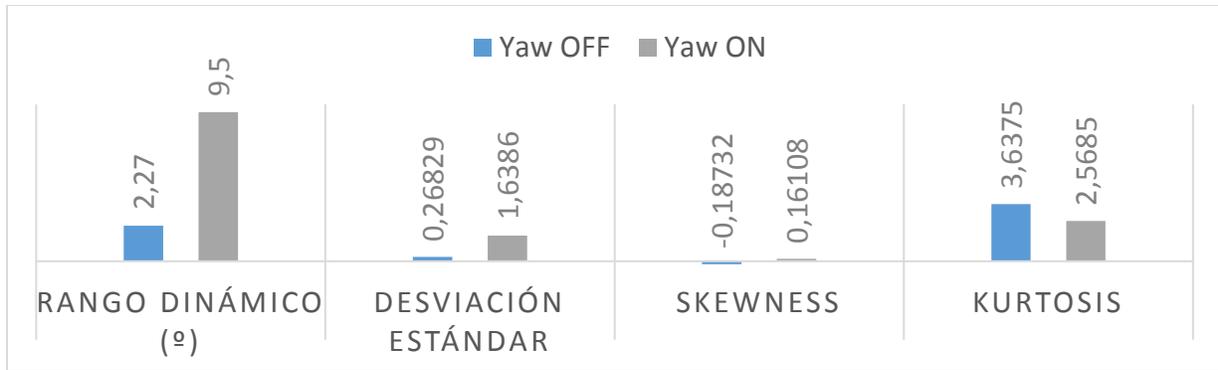


Figura 4.24. Comparativa de parámetros (V)

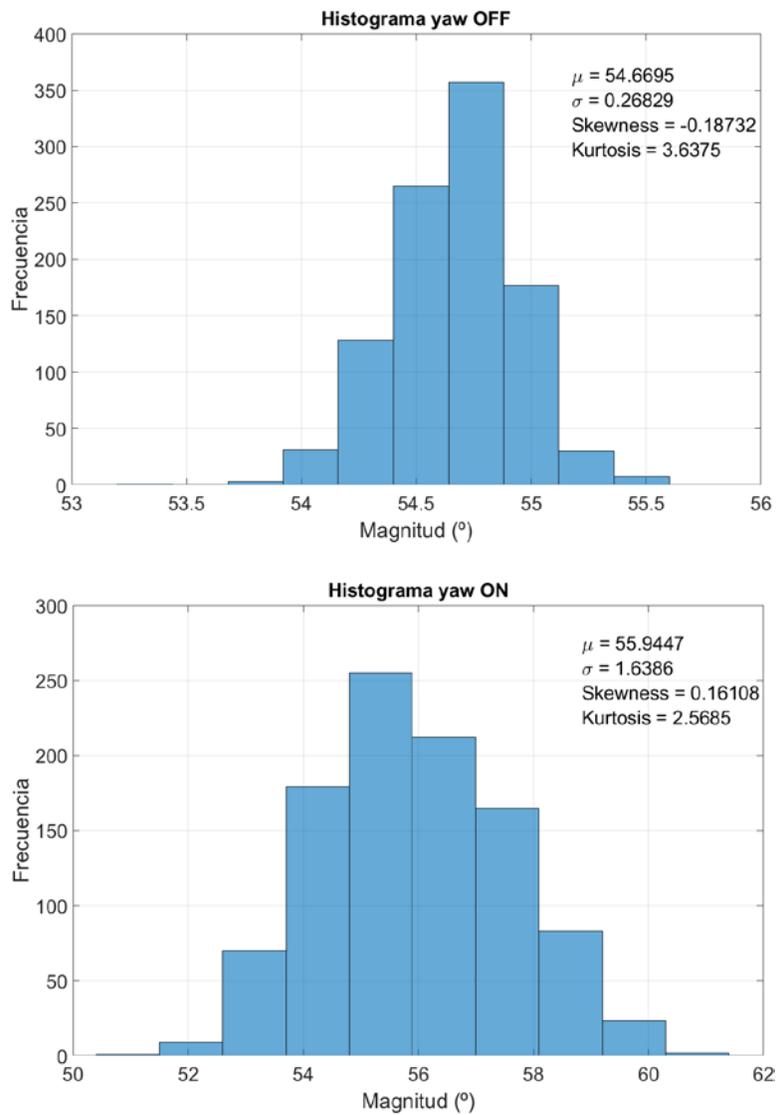


Figura 4.25. Comparativa de histogramas (II)

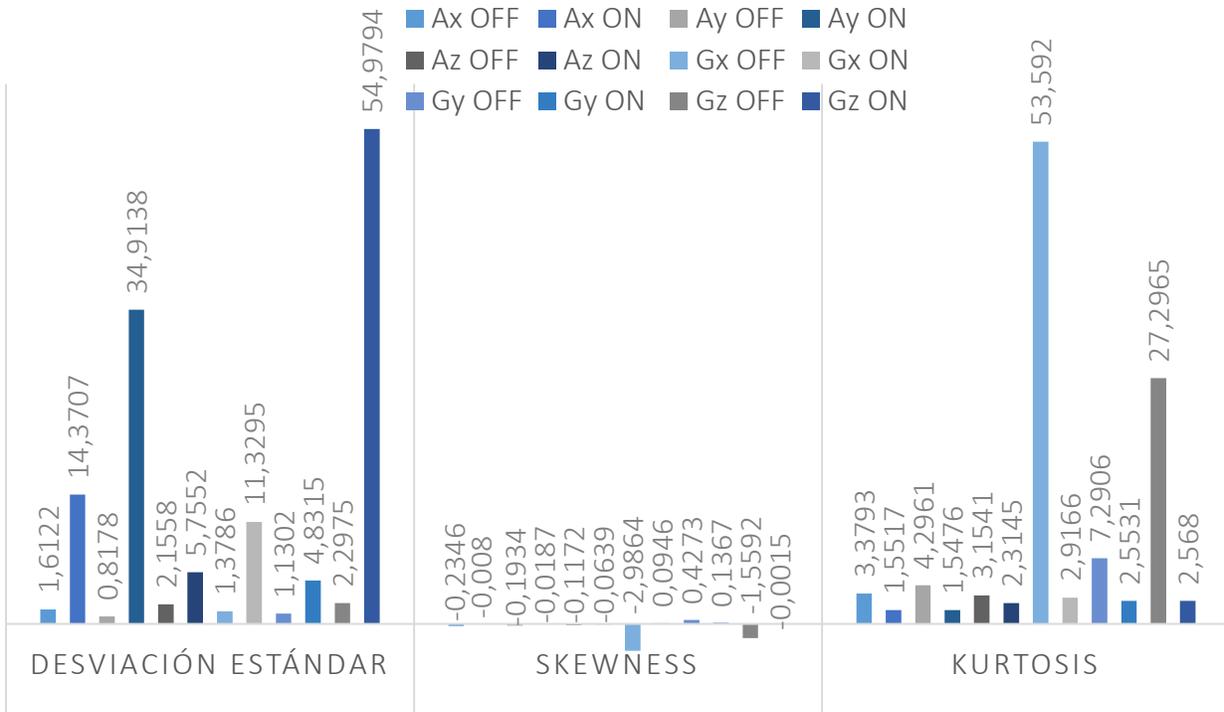


Figura 4.26. Comparativa de parámetros (VI)

Dado lo anterior, es prioritario esclarecer la existencia de una interferencia magnética que afecte al sistema. Aunque previo al análisis de las señales magnéticas, es necesario el estudio de los parámetros estadísticos de la señales inerciales (ver Anexo C, Figura C.28 – Figura C.39), para poder discriminar el efecto de éstos sobre el sistema frente al de las interferencias magnéticas. La Figura 4.26 recoge los parámetros estadísticos de las señales inerciales, y de ellos se extrae que la fdp de todas las señales obtenidas cuando el gimbal está apagado es sesgada hacia la derecha ($skewness > 0$) y colas estrechas ($kurtosis > 3$). En el caso en el que el gimbal está encendido, el caso es el contrario: las fdp son más próximas a una distribución simétrica ($skewness \approx 0$) y con colas anchas ($kurtosis < 3$), por lo que el efecto introducido por éstos es aumentar el rango dinámico de la señal de orientación, y no modificar su fdp.

Una vez determinado el efecto de los sensores inerciales sobre el sistema de orientación, lo siguiente es evaluar las señales magnéticas obtenidas (Figura 4.27, ampliada en Anexo C, Figura C.40 – Figura C.45). A priori, se concluye que el simple hecho de encender los motores del gimbal conllevará un aumento del rango dinámico de las señales magnéticas. Empezando por las señales

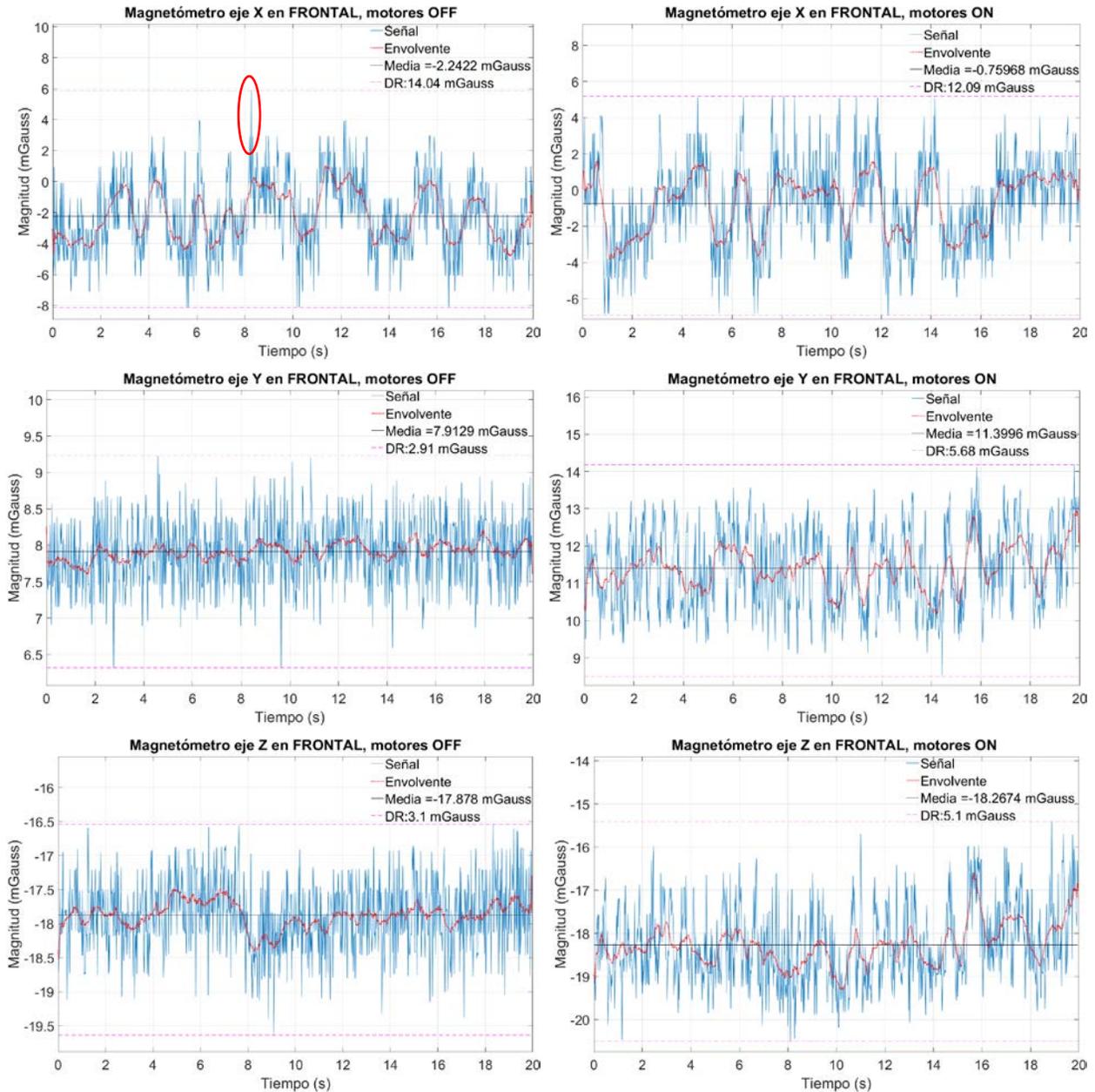


Figura 4.27. Señal magnética con IMU en posición frontal-izquierdo

obtenidas cuando los motores del gimbal están apagados, el rango dinámico en cada uno de los ejes es de 14.04 mGauss en el eje X, 2.91 mGauss en el eje Y y 3.1 mGauss en el eje Z. En términos estadísticos, solo la fdp del eje X presenta sesgo hacia la izquierda ($skewness > 0$), como consecuencia de la existencia de un pico en la señal (remarcado en rojo en la Figura 4.27), siendo el resto prácticamente simétricas ($skewness \approx 0$) (Figura 4.28).

En cuanto a la señal magnética obtenida cuando los motores del gimbal están encendidos, el DR

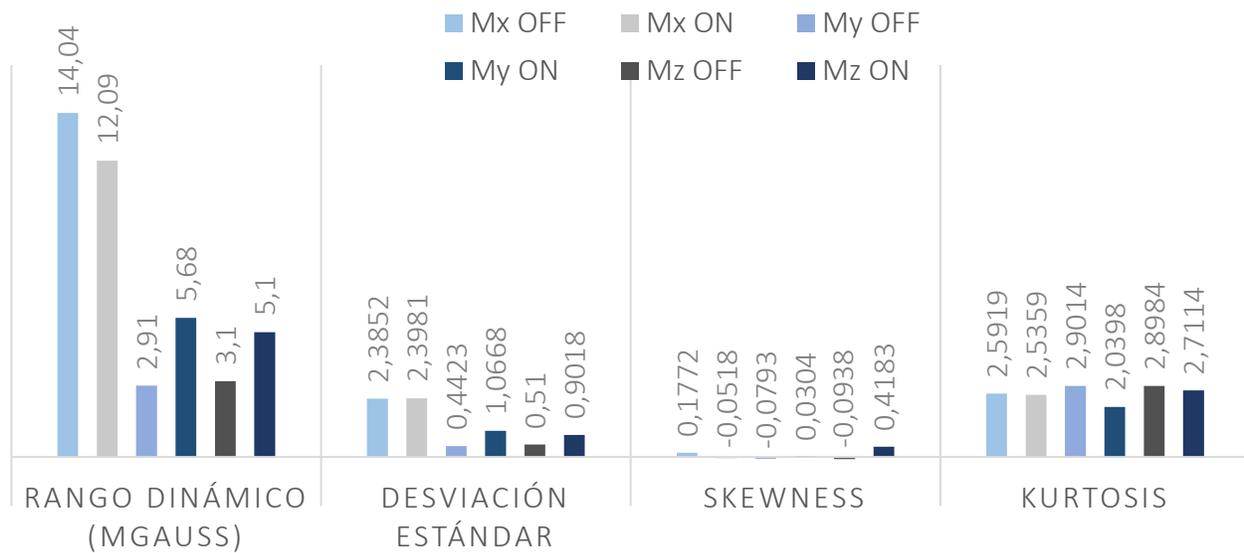


Figura 4.28. Comparativa de parámetros (VII)

de las señales es de 12.09 mGauss en el eje X, 5.68 mGauss en el eje Y y 5.1 mGauss en el eje Z. Estadísticamente, solo la fdp de la señal del eje Z es sesgada a la derecha ($skewness > 0$), siendo el resto prácticamente simétricas ($skewness \approx 0$), así como todas tienen menos pendiente que una fdp normal ($kurtosis < 3$) (Figura 4.28).

El análisis de los datos anteriores determina que existe un aumento en el rango dinámico de las señales cuando los motores del gimbal están encendidos, siendo éste de un 95.2% en el eje Y y un 64.52% en el eje Z. En cuanto al eje X, se observa la existencia de un pico (resaltado en rojo) en el caso en el que los motores del gimbal están apagados que provoca un aumento del rango dinámico. Si ese pico se normaliza al resto de valores máximos de la señal, se obtiene que el rango dinámico es de 12.09 mGauss, consiguiéndose un aumento nulo. En cuanto a los términos estadísticos de estas señales, se tiene que la fdp de la señal magnética del eje X se ve alterada, siendo simétrica cuando los motores del gimbal están encendidos, y en el eje Z la fdp se sesga a la derecha ($skewness > 0$), siendo ésta la causante del sesgo de la fdp de la señal de orientación. Además, todas las señales presentan colas anchas ($kurtosis < 3$), siendo éste el causante de las colas anchas presentes en la señal de orientación.

En conclusión, los motores del gimbal generan interferencias magnéticas cuya fdp es prácticamente simétrica y que alteran el estado inicial del magnetómetro. De manera que su efecto es el de modificar la fdp de las señales y hacerlas más simétricas, y aumentar el ancho de las colas de éstas. Además, la existencia de algunos picos esporádicos generan una distorsión en la fdp de la señal (sesgo hacia la derecha en este caso), de manera que, si las demás señales sufren el efecto descrito al principio de estas líneas, ésta última señal con fdp modificada determinará la forma de la fdp de la señal de orientación, sufriendo los mismos efectos que la señal que deforma su fdp: sesgo hacia la derecha y colas más anchas. Es por esto, que es necesario implementar técnicas tanto *hardware* como *software* que permitan reducir el efecto que tienen las interferencias magnéticas sobre el cálculo de la orientación.

Capítulo 5. Mitigación del efecto de las interferencias magnéticas y pruebas finales

Hasta este momento, se han caracterizado y evaluado las interferencias que afectan al sistema de orientación, así como caracterizado su efecto en trípode, en tierra. A continuación, en el presente capítulo, se explicarán las propiedades del campo magnético tenidas en cuenta para mitigar el efecto de éstas sobre el sistema de orientación. Además, se explicará el procedimiento seguido y se realizará un análisis comparativo para verificar la mitigación de las interferencias magnéticas mediante técnicas *hardware*. También se explica la metodología seguida para establecer la existencia de técnicas *software* útiles en este caso para mitigar el efecto, así como un ejemplo. Por último, se detalla el montaje y procedimientos seguidos para realizar las pruebas en vuelo.

5.1. Reducción del error mediante distanciamiento del sistema de la fuente

5.1.1. Consideraciones iniciales

Antes de afrontar las diferentes maneras de solucionar este problema, es necesario tener en cuenta la condición de que los motores del gimbal son una fuente puntual de interferencias magnéticas, de manera que la intensidad del campo magnético que generan está descrita por la

ley inversa del cuadrado; es decir, la intensidad del campo generado es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia (ecuación 5.1) [36].

$$H \propto \frac{1}{r^2} \quad (\text{Ec. 5.1})$$

Esta ley indica que si un cuerpo A se encuentra a una distancia r del foco magnético S y se ve sometido a una intensidad X, cuando éste se encuentre a una distancia $2r$ y por el efecto cuadrático, la intensidad a la que se verá sometido el cuerpo es una cuarta parte del campo magnético medido en r (Figura 5.1).

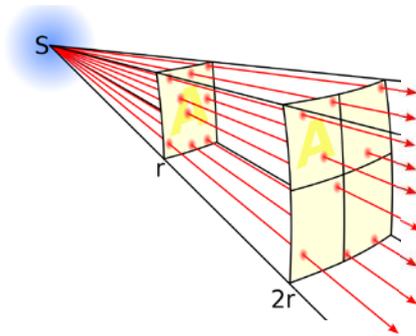


Figura 5.1. Ley inversa del cuadrado

5.1.2. Aplicación

Teniendo en cuenta la propiedad del campo magnético descrita anteriormente, una manera de disminuir el efecto que tiene el campo magnético generado por los motores del gimbal sobre el cálculo de la orientación, es alejar la IMU del foco; es decir, de los motores del gimbal.

Para verificar este hecho se ha procedido a posicionar la IMU en diferentes lugares (Figura 5.2), de manera que se pueda realizar un análisis comparativo del campo magnético medido, así como de la orientación obtenida en cada uno de los casos.

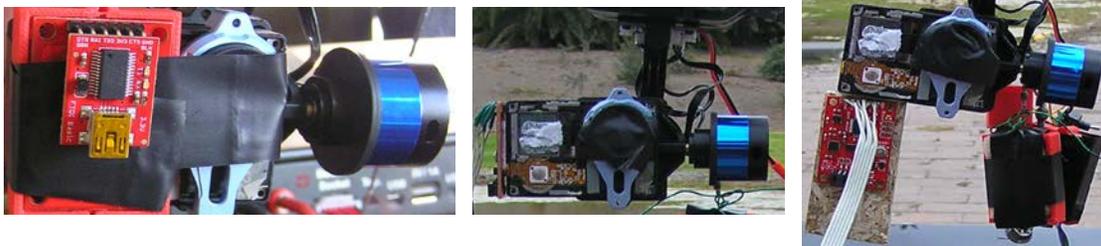


Figura 5.2 Posiciones de la IMU para evaluación

La Figura 5.3 (ampliada en Anexo C, Figura C.46 – Figura C.54) es la representación de las señales de campo magnético medido en cada una de las posiciones. En cuanto a las señales magnéticas obtenidas en la posición frontal, el rango dinámico de éstas es de 12.09 mGauss en el eje X, 5.68 mGauss en el eje Y y 5.1 mGauss en el eje Z. En cuanto a las señales obtenidas en la posición lateral, el rango dinámico de éstas es de 8 mGauss en el eje X, 0.59 mGauss en el eje Y y 0.65 mGauss en el eje Z. Finalmente, el rango dinámico de las señales obtenidas en la posición inferior es de 11.01 mGauss en el eje X, 1.37 mGauss en el eje Y y 1.31 mGauss en el eje Z. De los datos anteriores se extrae que el rango dinámico de las señales disminuye a medida que alejamos la IMU del foco de interferencias, siendo éstas disminuciones (respecto del valor máximo: posición frontal) de un 33.83% en el eje X, 89.61% en el eje Y y 87.25% en el eje Z en el caso en el que la IMU se encuentra en el lateral izquierdo, y de un 8.93% en el eje X, 75.88% en el eje Y y un 74.31% en el eje Z cuando la IMU se encuentra en el inferior.

En cuanto a los términos estadísticos, se aprecia una convergencia hacia una fdp de pendiente próxima al de una distribución normal, ya que la *kurtosis* se aproxima a 3, exceptuando en aquellos en los que se aprecian picos espontáneos, en los que al igual que ocurre con la simetría, la *kurtosis* empeora, siendo ésta mayor que 3, y por lo tanto la pendiente de la fdp es mayor que en el caso de una distribución normal.

Dado lo anterior, cabe esperar que el rango dinámico de la señal de orientación sea mínimo en el caso en el que la IMU se encuentra en el lateral izquierdo, ya que es en el que el rango dinámico de la señal magnética es menor. El rango dinámico de la señal de orientación obtenida en cada una de las posiciones es de 9.5° en el frontal, 14.65 ° en el lateral izquierdo y 3.63° en el inferior. Esto se traduce en un desvío espacial máximo de 165.62m, 255m y 63.35m respectivamente. Como se extrae de los datos anteriores, el mínimo rango dinámico en la señal de orientación se da cuando la IMU se encuentra en el inferior del gimbal (Figura 5.5), siendo ésta menor en un 61.79% tanto angularmente como espacialmente.

En términos estadísticos (Figura 5.6), se observa que la desviación estándar es mínima en la posición inferior y máxima en el lateral izquierdo, así como el rango dinámico de la señal. Además, la simetría de la fdp de las señales es máxima en el frontal y mínima en el lateral izquierdo (sesgada a la izquierda), siendo la pendiente de ésta con mayor pendiente en el lateral izquierdo

5.1. Reducción del error mediante distanciamiento del sistema de la fuente

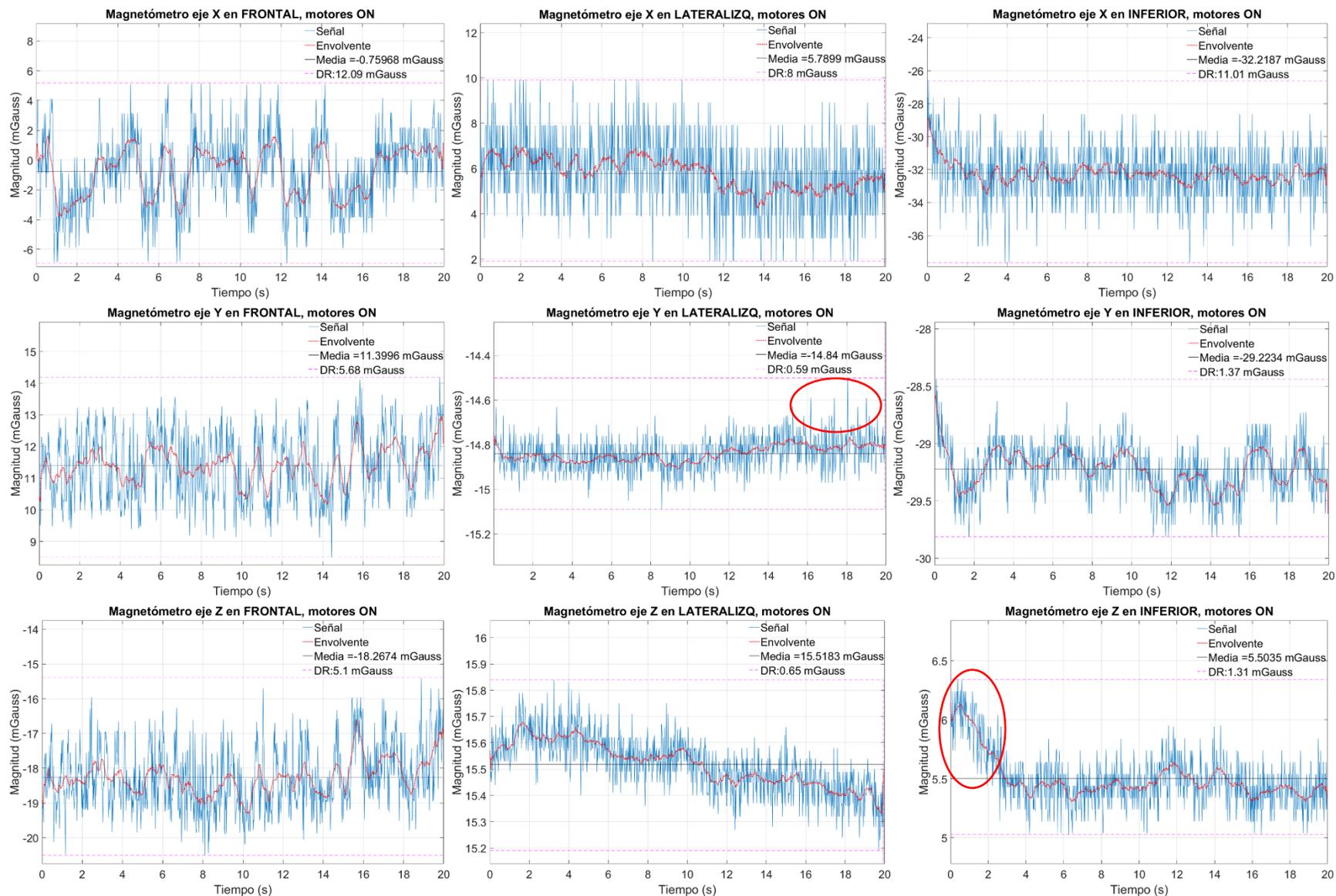


Figura 5.3. Campo magnético medido

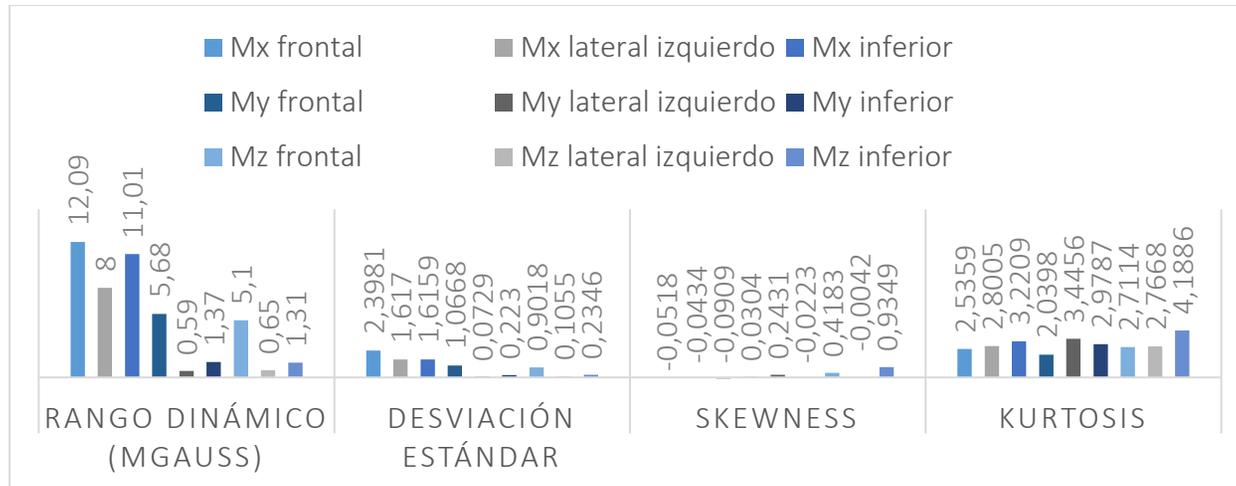


Figura 5.4. Comparativa de parámetros (VIII)

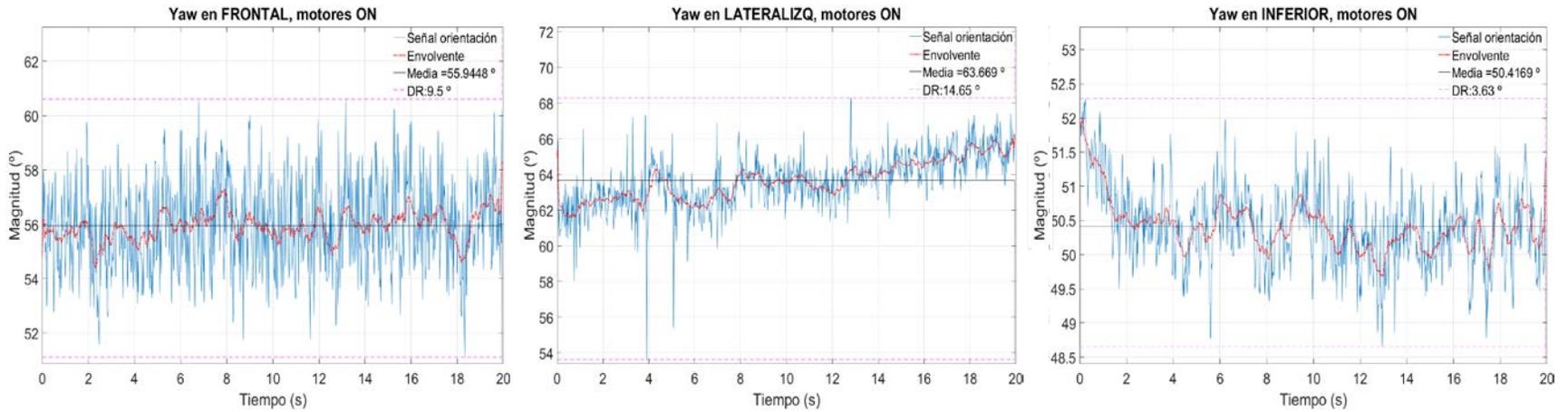


Figura 5.5. Yaw en diferentes posiciones

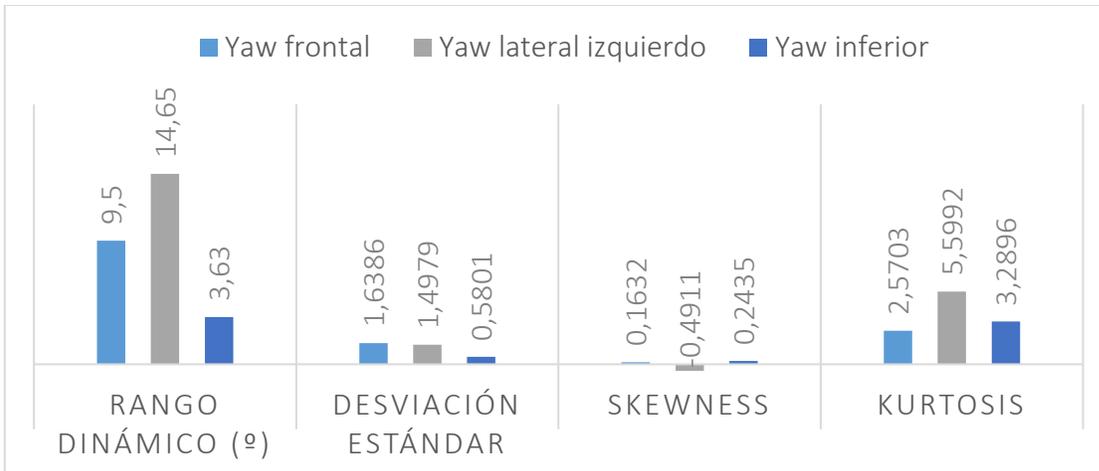


Figura 5.6. Comparativa de parámetros (IX)

y próximo al de una distribución normal en el resto de posiciones. El conjunto de datos anteriores esclarece que alejar la IMU del foco de interferencias magnéticas ayuda a reducir el rango dinámico, tanto de la señal magnética como de la orientación. Pero, este hecho no se da en el caso de tener la IMU en el lateral izquierdo, por lo que es necesario el análisis del resto de sensores, de manera que se pueda esclarecer el porqué de los datos obtenidos en esa posición.

El análisis de los sensores inerciales (ver Anexo C, Figura C.55-Figura C.72) determina que el DR de la señal de orientación es máximo en el lateral izquierdo debido a que, en esa posición, se da el mayor rango dinámico en casi todos los ejes (solo mínimo en el eje X del acelerómetro e intermedio en el eje Y del mismo y Z del giróscopo). Además, en esa posición se obtiene la mayor asimetría (sesgo hacia la derecha en todos los casos, excepto en el eje X del acelerómetro y en el eje Z del giróscopo) y la fdp con mayor pendiente (Figura 5.7 y Figura 5.8). Es por todo lo anteriormente descrito que el rango dinámico del yaw es máximo en esa posición, ya que, como se ha explicado en el Capítulo 4, apartado 4.5, la asimetría y el aumento del rango dinámico en los sensores inerciales provocan el aumento del rango dinámico de la señal de orientación, así como la deformación de la fdp de ésta. En cuanto al yaw en inferior, es mínimo ya que el rango dinámico de los sensores inerciales en su posición es mínimo o intermedio, y en cuanto a su fdp, es muy próxima a una distribución normal ya que presenta valores de *skewness* y *kurtosis* muy próximos a los estandarizados en la mayoría de los ejes de los sistemas inerciales.

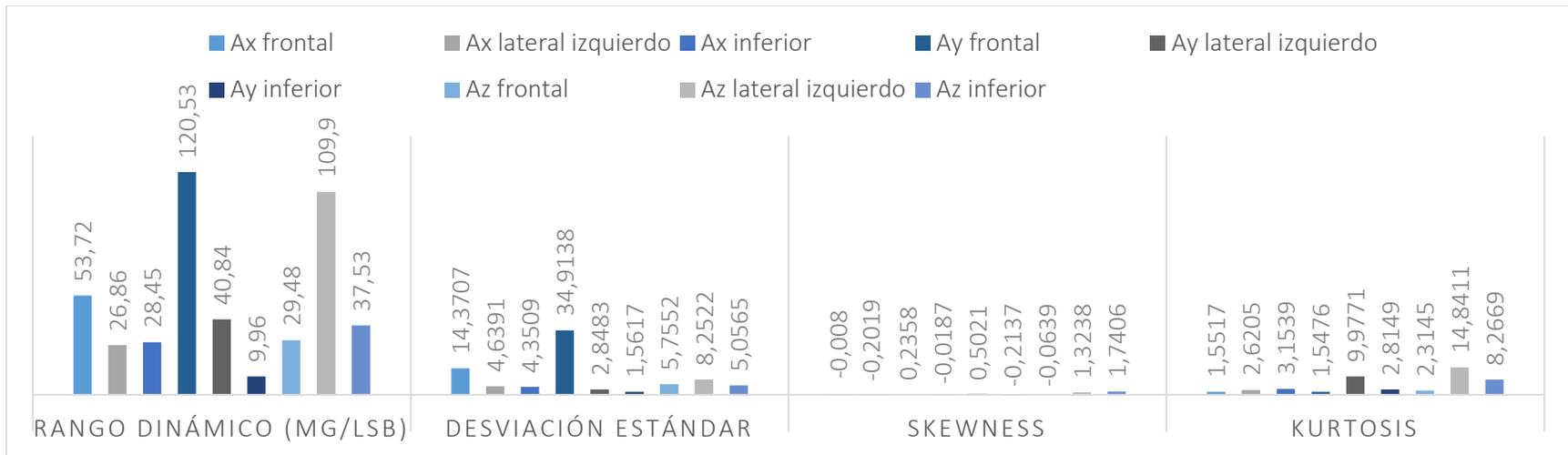


Figura 5.7. Comparativa de parámetros (X)

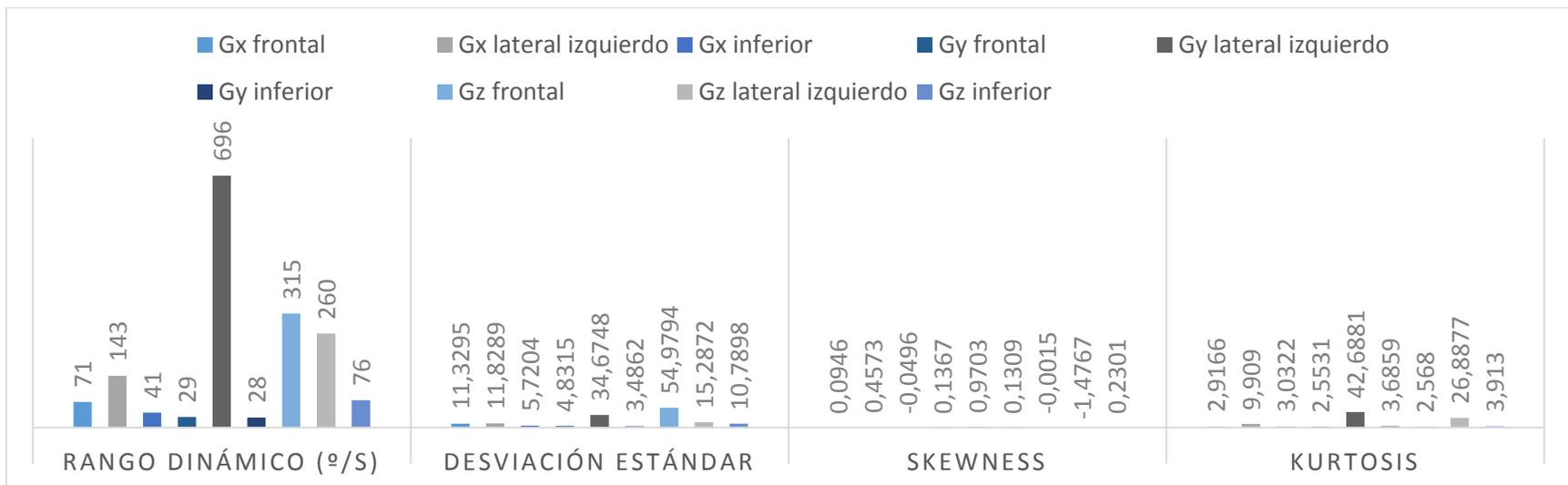


Figura 5.8. Comparativa de parámetros (XI)

En conclusión, alejar la IMU del foco de interferencias ayuda a reducir en más del 75% el rango dinámico de la señal magnética en la mayoría de casos, que se traduce en una disminución de aproximadamente un 62% del rango dinámico de la señal de orientación, así como del desvío espacial. No obstante, distorsiona su fdp, siendo ésta más próxima a una distribución normal cuando se encuentra cerca del foco. Además, es necesario incluir técnicas de amortiguamiento o aislamiento mecánico, ya que los sensores inerciales juegan un papel muy importante en el cálculo de la orientación, pudiendo hacer que el rango dinámico de la señal de orientación sea máximo, cuando el campo magnético medido es mínimo.

5.2. Reducción del error mediante generación de interferencia dominante

En la sección anterior, se concluyó que alejar la IMU del foco de interferencias ayudaba a reducir en aproximadamente un 75% su efecto sobre el magnetómetro, y un 62% sobre el cálculo de la orientación. A continuación, en vez de alejar la IMU del foco, se usará la generación de una interferencia dominante: generar una interferencia dominante es insertar un elemento al sistema que genere una interferencia de mayor potencia y cuasi constante, que la introducida por otros elementos o dispositivos presentes en el sistema, de manera que pueda enmascarar a éstos y eliminar la interferencia de mayor potencia a través de su filtrado (Figura 5.9).

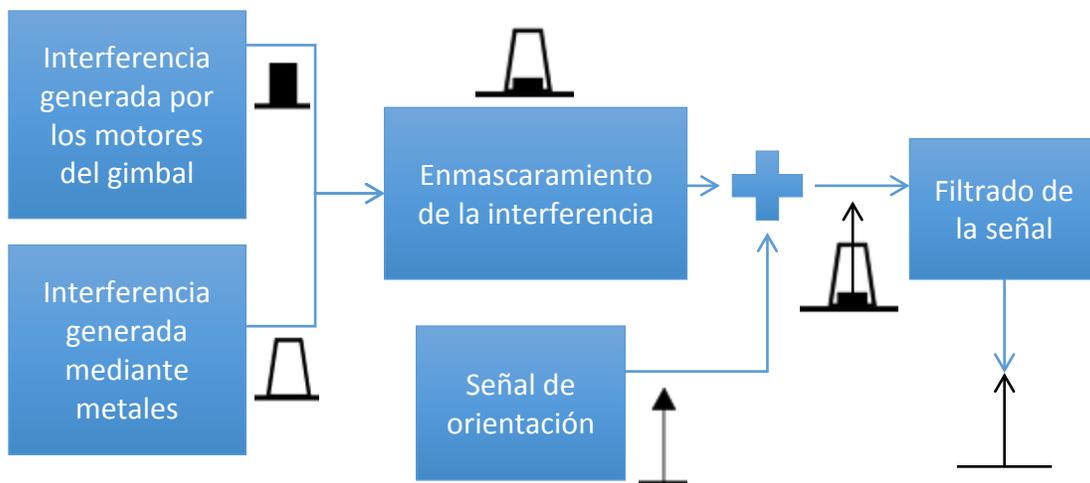


Figura 5.9. Procedimiento de enmascaramiento

Según esto, si se genera una interferencia magnética mayor que la que puedan producir los motores del gimbal, se podría reducir la dispersión de la señal magnética y también su efecto sobre el cálculo de la orientación. Una forma sencilla de generar una interferencia magnética es seguir el principio descrito en el apartado 2.1.2, en el que se describe que un elemento ferromagnético genera un campo magnético cuando se ve influenciado por otro y es capaz de deformar el existente. Entonces, según este principio, colocar un material ferromagnético cerca de la IMU sería otra manera de reducir el efecto de los motores. Y es lo que se comprobará en la presente sección.

El material ferromagnético usado en este caso es una chapa de aluminio de dimensiones 40x1x31 mm (Figura 5.10).

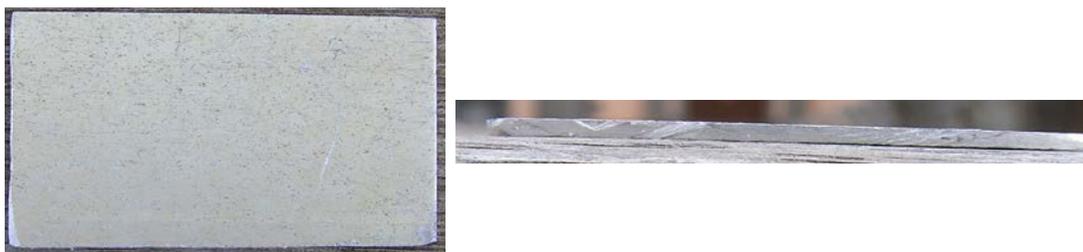


Figura 5.10. Chapa metálica empleada

Para llevar a cabo este experimento, se decidió colocar la IMU en el lateral izquierdo de la cámara, aislada del viento (Figura 4.11) y separada de ésta al igual que en el apartado 4.5 (Figura 4.12), buscando anular, o disminuir parcialmente, el efecto del viento y de la vibración del gimbal sobre los sistemas inerciales. El experimento se realizará con y sin metal, de manera que se generen datos en dos marcos de referencia claramente diferenciados: se obtendrán datos que permitan comparar el campo magnético medido y la orientación calculada, cuando no hay generación de interferencia dominante frente a cuando sí existe, lo que permitirá cuantificar si la generación de una interferencia dominante es favorable, o por el contrario, perjudicial, en el cálculo de la orientación.

Antes de realizar valoración alguna, lo primero es verificar que los sistemas inerciales se encuentran en un estado de rango dinámico iguales, o muy próximos entre sí (para ver las señales inerciales ver Anexo C, Figura C.73 – Figura C.96). No obstante, para llevar a cabo el análisis de éstos, se hará uso del EDR pues en algunos casos existen picos puntuales en las señales que

alteran de manera drástica el rango dinámico de la señal. Los EDR de las distintas señales se encuentran recogidos en la Figura 5.11. En ella se observa que prácticamente no existe diferencia entre las diferentes medidas.

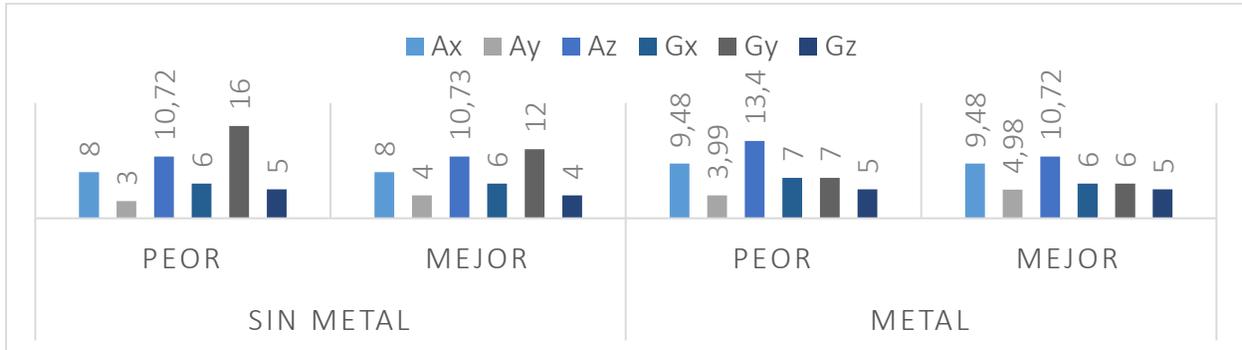


Figura 5.11. Comparativa de rangos dinámicos eficaces

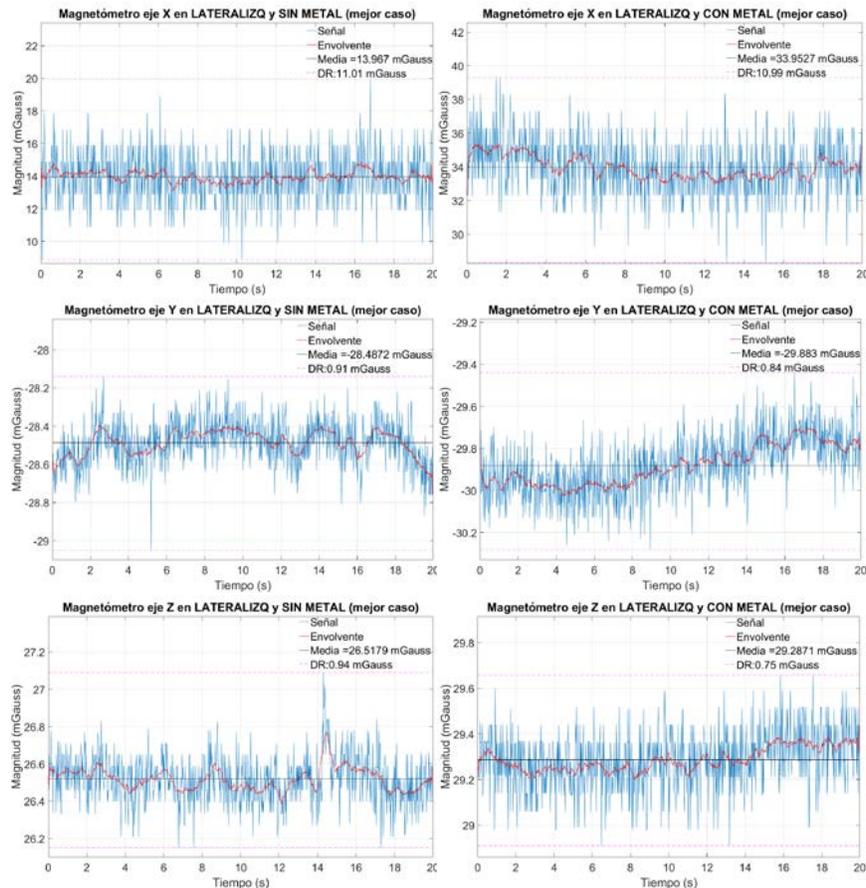


Figura 5.12. Campo magnético medido en cada uno de los casos

Lo siguiente es llevar a cabo el análisis del campo magnético medido, así como de la orientación en cada uno de los casos. Para llevar a cabo esta evaluación, se ha usado aquellas medidas en las que el rango dinámico de la señal de orientación era mínimo (mejor caso) con y sin metal.

Empezando por el campo magnético (Figura 5.12, ampliado en Anexo C, Figura C.97-Figura C.108), el rango dinámico de la señal cuando no hay generación de interferencia dominante es de 11.01 mGauss en el eje X, 0.91 mGauss en el eje Y y 0.94 mGauss en el eje Z, siendo el EDR correspondiente a cada uno de ellos de 6 mGauss, 0.5 mGauss y 0.5 mGauss. En términos estadísticos, la fdp de la señal es simétrica en el eje X, sesgada a la izquierda en el eje Y y hacia la derecha en el eje Z, además de tener un apuntamiento de mayor pendiente que una fdp normal en todos los ejes (Figura 5.13).

En cuanto a las señales magnéticas obtenidas cuando existe generación de interferencia dominante, el rango dinámico de éstas es de 10.99 mGauss en el eje X, 0.84 mGauss en el eje Y y 0.75 mGauss en el eje Z. En términos de EDR, éstos son 6.13 mGauss, 0.5 mGauss y 0.5 mGauss en cada uno de los ejes. En cuanto a los términos estadísticos, el fdp del eje X e Y son simétricos, así como el eje Z es sesgado hacia la izquierda. Además, los ejes X y Z tienen un apuntamiento muy cercano al de una fdp normal, y el eje Y tiene una fdp con un apuntamiento más estrecho (Figura 5.13).

En definitiva, el análisis de los datos anteriores determina que existe una disminución de un 0.18% en el eje X, 7.7% en el eje Y y 20.21% en el eje Z cuando hay generación de interferencia dominante. No obstante, en las señales se observan picos esporádicos que alteran el rango dinámico natural del campo medido, por lo que es necesario recurrir a los EDR para realizar la comparativa. De manera que la comparación resultante concluye que la dispersión de las señales es la misma en todos los ejes, por lo que, en términos de efectividad, no existe ningún tipo de mejora. En cuanto a los términos estadísticos, se mejora levemente la simetría de la señal, así como se mejora la pendiente de la fdp, muy próximo al de una distribución normal, cuando hay generación de interferencia dominante.

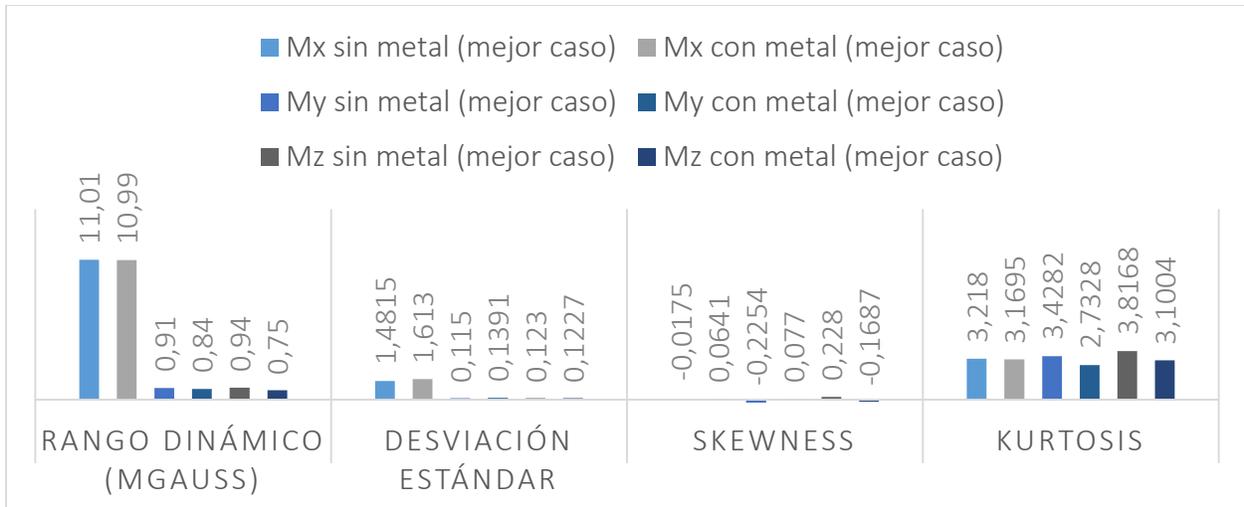


Figura 5.13. Comparativa de parámetros (XII)

En cuanto a la orientación calculada (Figura 5.14, resto en Anexo C, Figura C.109), en el caso de no existir generación de interferencia dominante, el rango dinámico de ésta, en el mejor de los casos es de 2.04° , y en el peor de los casos de 2.24° . En el caso de existir generación de interferencia dominante, en el mejor de los casos es de 1.27° y en el peor es de 1.93° . En términos de EDR, éstos son 1.13° , 0.9° , 1.01° y 0.83° respectivamente (Figura 5.15).

En cuanto a los términos estadísticos, la fdp de las señales sin generación de interferencia dominante es asimétrica, mientras que en el caso contrario existe una tendencia hacia una fdp de distribución normal (Figura 5.15).

Por lo tanto, se observa que, tanto en el peor como en el mejor caso, el rango dinámico de la señal de orientación está por debajo del mejor caso sin generación de interferencia dominante; Además, el rango dinámico disminuye entre un 13.84% y un 43.30%, que en términos eficaces, oscila entre un 10.62% y un 26.55%, siendo la máxima mejora en 0.3° . En cuanto a los términos estadísticos, la desviación estándar disminuye como consecuencia de la disminución del rango dinámico, así como existe una tendencia hacia una distribución normal cuando existe generación de interferencia dominante debido a la existencia de la misma tendencia en las señales magnéticas. En el caso peor con metal no se da esto último debido a que existen picos esporádicos que alteran su fdp.

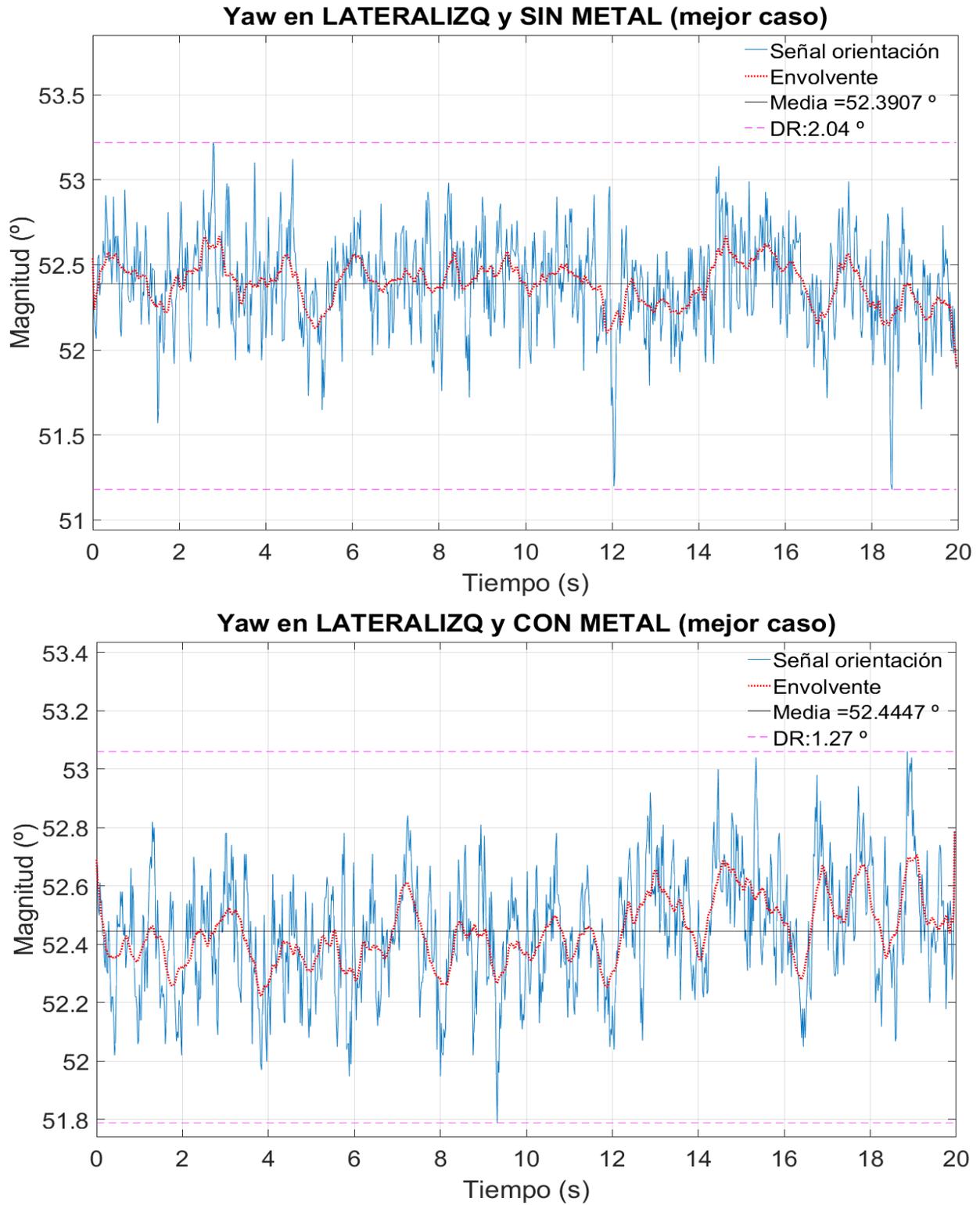


Figura 5.14. Yaw calculado

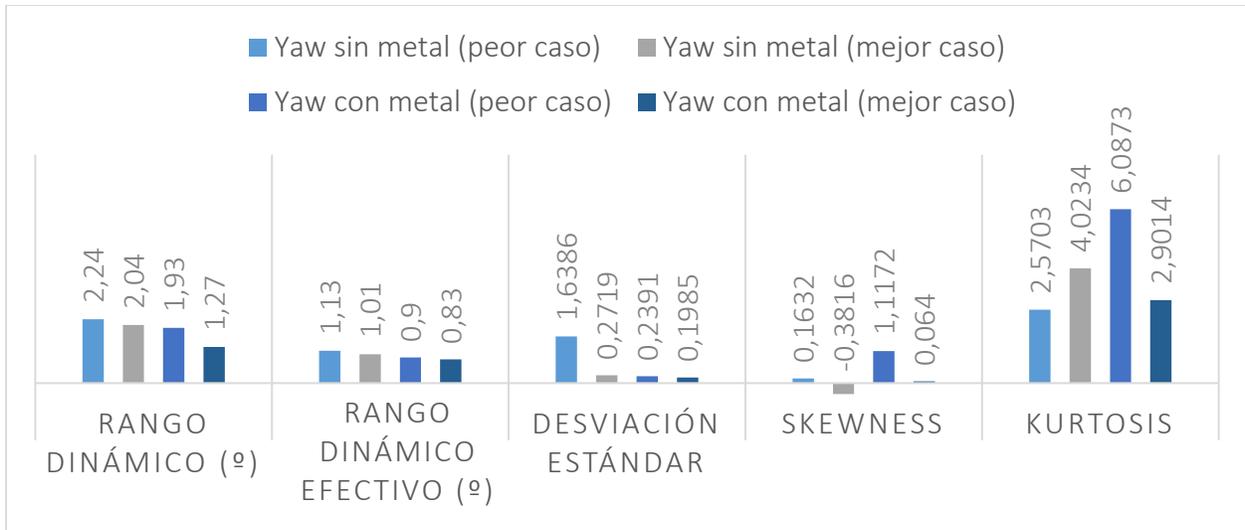


Figura 5.15. Comparativa de parámetros (XIII)

En conclusión, generar una interferencia dominante usando elementos ferromagnéticos permite reducir el rango dinámico de la señal magnética, y en consecuencia, de la orientación entre un 14% y un 43%. Además, altera la fdp de las señales de manera que estas se aproximan a una distribución normal, un efecto muy importante ya que permitiría realizar un estudio estadístico de las señales y obtener un algoritmo que reduzca su rango dinámico. No obstante, comparando este método con el distanciamiento de la IMU del foco de interferencias, claramente éste último es más ventajoso en cuanto a reducción de rango dinámico (aproximadamente un 80%), aunque deforma la fdp de la señal.

5.3. Reducción del error mediante técnicas software

Hasta ahora se han aplicado técnicas *hardware* para reducir el efecto que tiene el funcionamiento del gimbal sobre la medida de la orientación, atendiendo al efecto de éste sobre los sensores que integran el sistema de orientación. En esta sección se atacará el problema a través de técnicas *software*; es decir, se implementará un algoritmo que permita reducir el rango dinámico de la señal de orientación. En este Trabajo Fin de Grado se ha optado por realizar un algoritmo que permita integrar la señal en diferentes trozos de señal mediante ventanas de integración, para después calcular la media de cada uno de esos trozos y calcular la diferencia de ésta respecto de la media de la señal completa. Esto se hace así ya que la hipótesis de partida para este TFG, es la

suposición de que con un gran número de muestras (en este TFG se trabaja con 1000) la media se aproxima prácticamente al valor real de la medida, que en el caso de este Trabajo Fin de Grado sería el valor real de la orientación del sistema. Después de esto, se realiza el análisis estadístico de estar por debajo de un valor de dispersión dada una ventana de integración, y finalmente se elige aquel tamaño de ventana de integración que cumpla con los requisitos establecidos (Figura 5.16).

Para la realización de lo descrito anteriormente, es necesario tener en cuenta algunos parámetros, descritos en el apartado 4.1, que permitan caracterizar la señal y saber si se puede o no implementar un algoritmo. Éstos son el *skewness*, que aporta información sobre la simetría del histograma de la señal, y la *kurtosis*, que aporta información sobre la pendiente de la fdp de la señal. También el histograma propiamente dicho, que aporta información gráfica sobre la distribución de los valores de la señal y la media de ésta. De esta manera, definiendo un error máximo, podemos escoger un tamaño de ventana de integración acorde a esta restricción. No obstante, hay que tener en cuenta que cada muestra se obtiene cada 20 ms, por lo que en términos temporales, el tamaño de ventana elegido será un factor importante en esta aplicación ya que el dron estará en estática y no puede pasar mucho tiempo tomando datos pues pueden corromperse debido a rachas de viento, movimientos esporádicos del dron, etc. Para esta aplicación, se usará la señal de orientación obtenida en el mejor caso cuando hay presente una interferencia dominante en el sistema (Figura 5.14), de manera que se observará la mejoría obtenida usando la algoritmia aquí planteada.

Lo primero que hay que hacer es obtener el histograma de la señal. Esto se debe a que los fenómenos naturales tienden a tener una distribución de probabilidad gaussiana, en la que la distribución de los valores de estas señales es simétrica (*skewness* ≈ 0) y tienen un coeficiente de apuntamiento muy próximo a 3 (*kurtosis* ≈ 3). En caso de que esto no fuese así, significaría que existe algún fenómeno externo que está alterando al sistema. En el caso de la señal usada para esta aplicación, se observa que los parámetros que definen su fdp son muy próximos a los definidos para una distribución normal. Es decir, tiene *skewness* muy próximo a 0 (0.06) y *kurtosis* muy próxima a 3 (2.9). Para corroborar lo anteriormente dicho, el histograma de la señal se muestra en la Figura 5.17, donde se observa que es prácticamente una distribución normal.

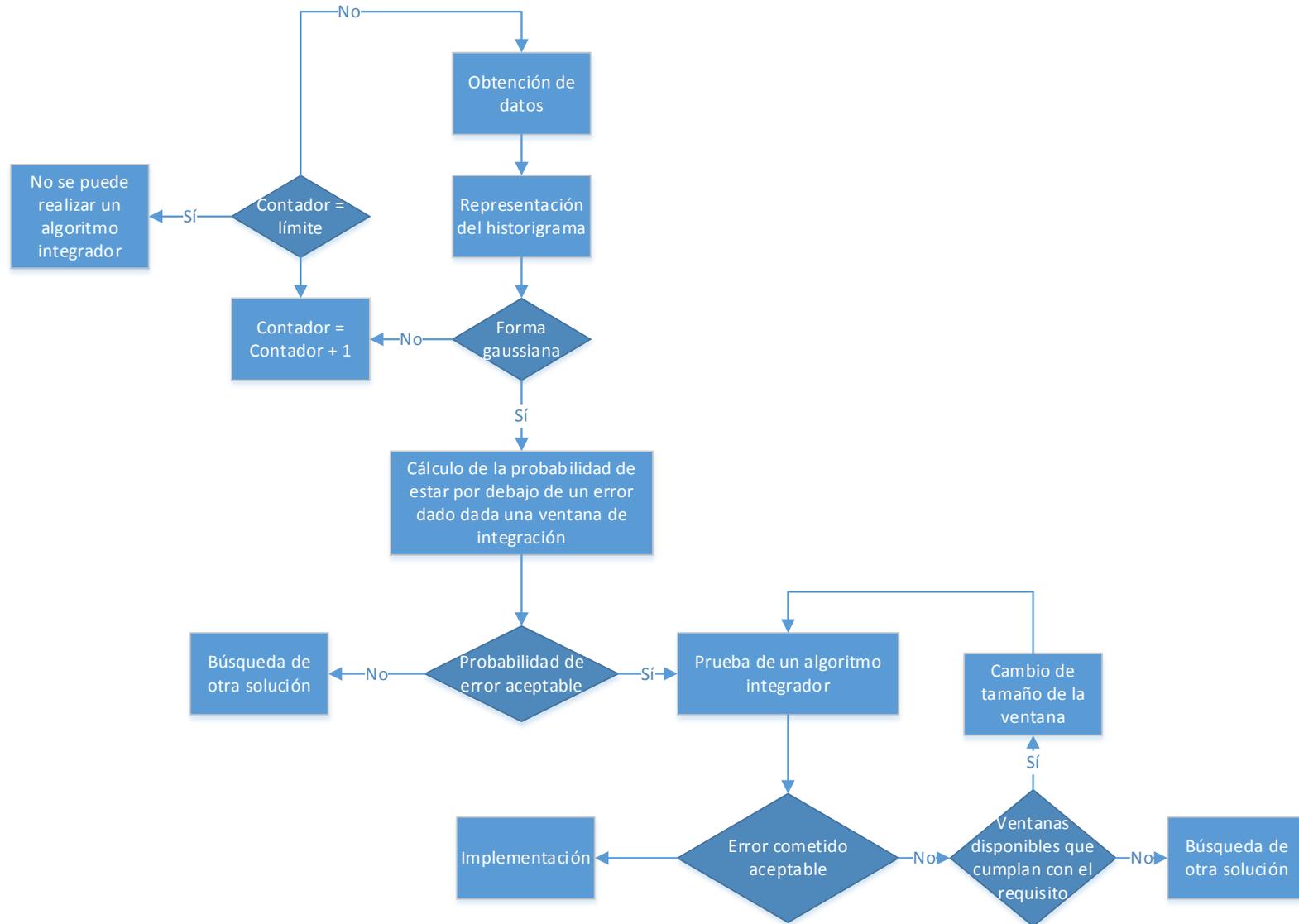


Figura 5.16. Metodología seguida en el desarrollo software

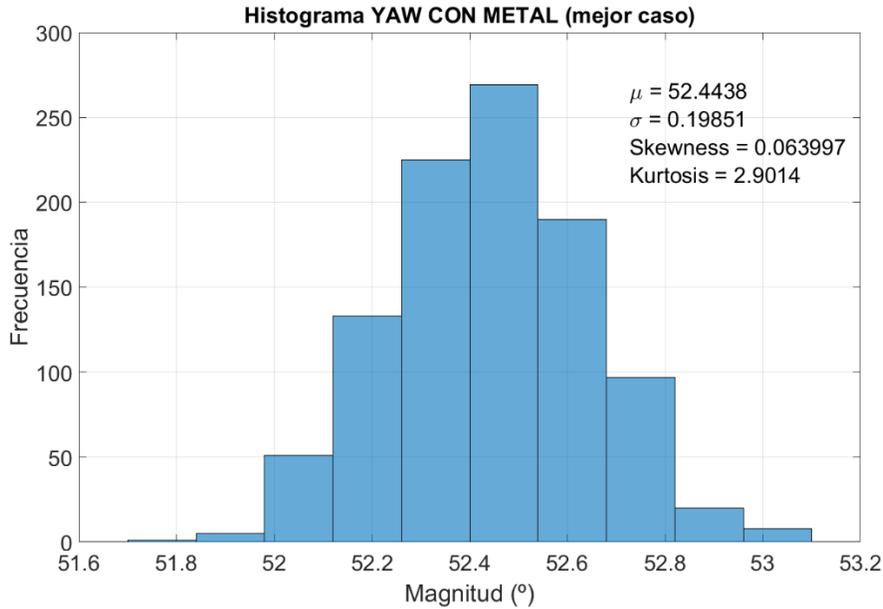


Figura 5.17. Señal e histograma

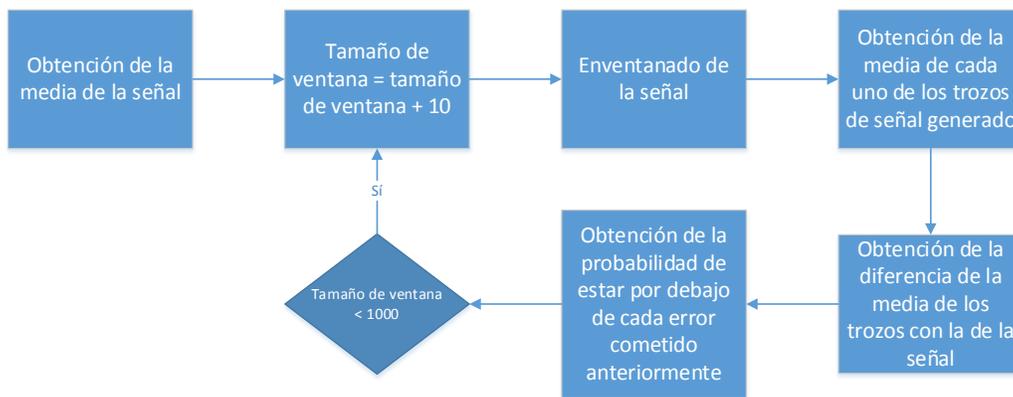


Figura 5.18. Metodología para obtención de la probabilidad

Una vez visto que sigue una distribución de probabilidad gaussiana, lo siguiente es obtener la probabilidad de estar por debajo de un error dada una ventana de integración. Siguiendo la metodología de la Figura 5.18, se obtiene la curva de la Figura 5.19, en la que se observa que para conseguir aumentar el porcentaje de estar por debajo de un error dado hay que aumentar el tamaño de la ventana de integración. Así mismo, también se observa que para ventanas de integración pequeñas es más probable cometer errores grandes, y que cuando el tamaño de la ventana es igual a la longitud de la señal la probabilidad de cometer 0º de error es del 100%. Esto se debe a que en tal caso la medida de ambas coincide.

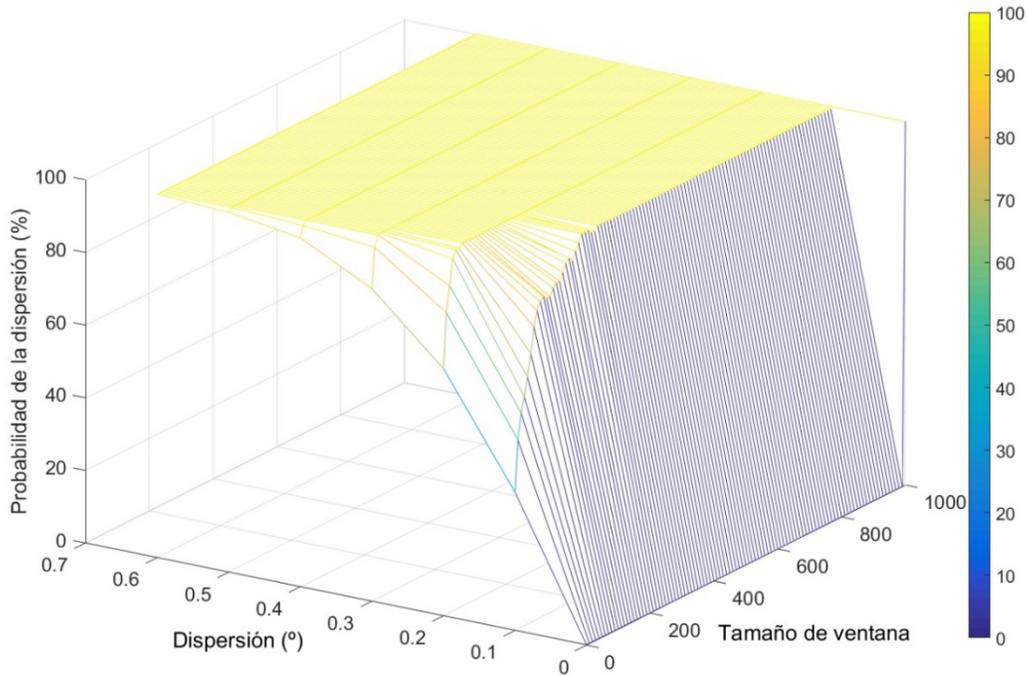


Figura 5.19. Curva de probabilidades en función del tamaño de la ventana y del error deseado

Una vez se ve que se puede conseguir reducir la dispersión de la señal, se debe determinar las curvas de probabilidad que definen a aquellos errores admitidos para esta aplicación (Figura 5.20), que no es más que realizar un corte transversal a la curva de la Figura 5.19.

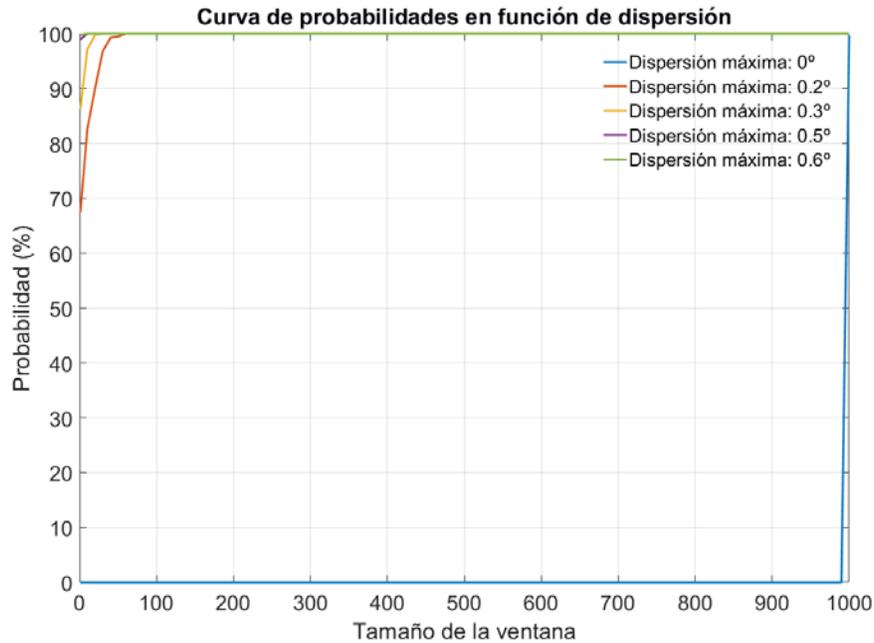


Figura 5.20. Curvas de probabilidad de distintos errores en función del tamaño de la ventana

Siguiendo el principio de que mayor longitud de ventana mayor tiempo de toma de datos, en esta aplicación es prioritario elegir tamaños de ventana pequeños pero que cumplan con un error máximo dado y aceptable. Una vez elegido el tamaño de ventana deseado usando las curvas de la Figura 5.20, el siguiente paso es integrar la señal con ese tamaño de ventana y verificar que la dispersión obtenida es menor. Un ejemplo de aplicación sería que la restricción temporal fuese de 300 ms. En tal caso, y sabiendo que $t_{\text{ventana}} = \text{longitud} * 20\text{ms}$, no se podría elegir un tamaño de ventana de 1000 muestras pues excedería la restricción temporal. Entonces, la única opción que queda es escoger tamaños de ventana por debajo de las 150 muestras. Analizando las curvas, se observa que eligiendo un tamaño de ventana de entre aproximadamente 70 y 100 muestras (140-200 ms), se obtendría una dispersión máxima de 0.2° (Figura 5.21), por lo que pasaría de 1.27° a 0.2361° , que en términos espaciales significa pasar de un desvío máximo de 22.17m a 4.12m, un 81.41% menor.

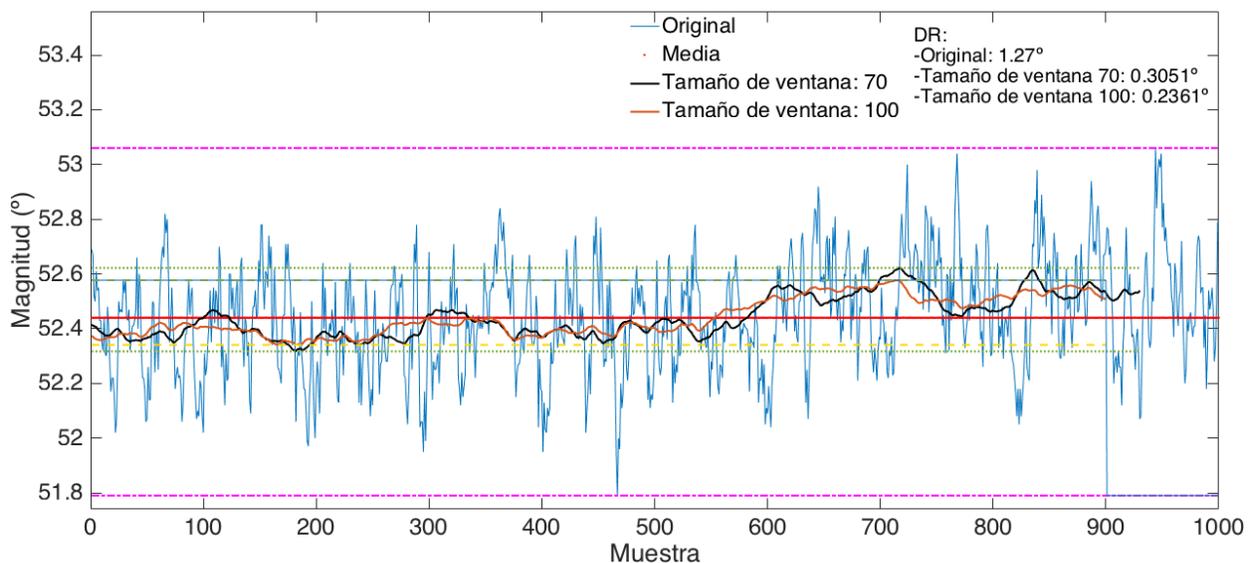


Figura 5.21. Yaw enventanadado

En términos estadísticos, se tiene que la desviación estándar disminuye (como consecuencia de la disminución del rango dinámico) y que a medida que la señal es integrada con un mayor número de muestras, ésta ve modificada su fdp de manera que aumenta su asimetría y su pendiente, pasando a ser una fdp con colas anchas.

En conclusión, las técnicas software son una gran herramienta para la reducción de la dispersión de la señal de orientación, pues permiten reducirla en más de un 80%, colocándose a la misma altura que la técnica de alejamiento del foco emisor. En ambos casos, la fdp de la señal se deforma, perdiendo asimetría y variando su pendiente. Además, en este método, hay que tener en cuenta las restricciones temporales, que pueden llegar a ser un gran escollo para su aplicación.

5.4. Realización de pruebas en vuelo

Como parte final de este TFG se encuentra la realización de pruebas en vuelo, con la finalidad de aplicar los métodos de reducción de error anteriormente descritos y determinar si son eficaces tanto en tierra como en aire. Para la realización de estas pruebas, son necesarios los siguientes elementos, disponibles porque ya se habían usado en trabajos previos desarrollados en el IDeTIC.

- Placa Arduino UNO.
- Placa SparkFun 9DOF-Sensor Stick.
- Placa Raspberry Pi 2 modelo B con tarjeta SD.
- Gimbal Tarot T-2D Brushless.
- Dron Quadrator 3DR.

La placa SparkFun 9DOF – Sensor Strick es una placa que integra los mismos sensores que la 9DOF Razor IMU, pero no un procesador. Es por esto, que en este caso es necesario tener una placa Arduino UNO que reciba y procese los datos enviados por el Sensor Stick. Al igual que con la placa 9DOF Razor IMU, ésta ha de ser calibrada siempre que la estructura que la rodea sea modificada y se calibra siguiendo el mismo método (ver apartado 2.4.1).

La Raspberry Pi 2 modelo B cumple la función de ordenador a bordo. Se encarga de recibir los datos procesados y de los sensores a través de un puerto serie I2C conectado con el Arduino, y almacenarlos en su memoria en formato '.txt'. Gracias a esto, una vez se terminan las pruebas en vuelo se puede acceder a los datos obtenidos y analizarlos.



Figura 5.22. Sistema montado en dron



Figura 5.23. Gimbal en dron

Finalmente, el dron para la realización de pruebas quedaría como en la Figura 5.22 y Figura 5.23, siendo el sistema de procesado el compuesto por el Arduino y la Raspberry Pi. En cuanto a la metodología llevada a cabo para la realización de las pruebas, es el presente en la la Figura 5.24. Lo primero es la calibración del sistema. Una vez esta calibrado, la placa Arduino comienza a

recibir los datos procedentes del Sensor-Stic. Una vez la placa Arduino los procesa y calcula los ángulos de navegación, ésta manda los datos a través de puerto serie hacia la Raspberry Pi, siendo ésta la encargada de almacenar los datos recibidos en memoria mediante archivos con formato '.txt'.

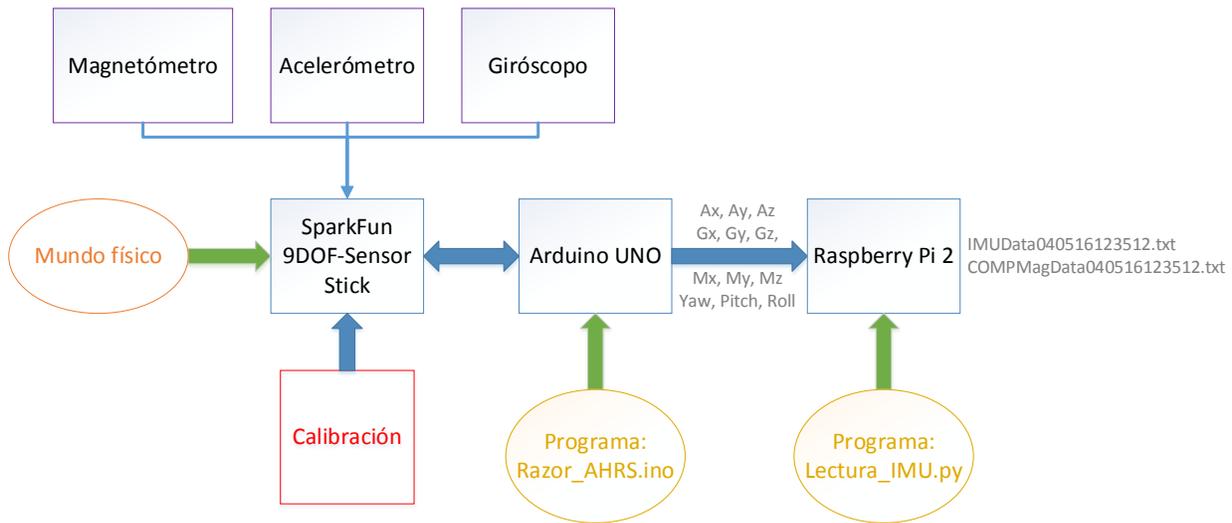


Figura 5.24. Proceso de pruebas en vuelo

Una vez se ha montado el gimbal, la IMU y el sistema de procesado de datos en el dron lo siguiente es realizar el *checklist* de este último, a fin de poder realizar el vuelo en condiciones seguras.

1. Asegurar la existencia de comunicación entre la base terrena (una *Tablet*) y el dron, de manera que se puedan recibir sus parámetros principales: nivel de batería, estado del dron (armado o desarmado), posicionamiento...
2. Comprobar el estado de la batería del dron y si fuera necesario por las condiciones del vuelo, realizar modificaciones en el modo de vuelo.
3. Armar el dron. Esto es indicar al sistema interno de éste que el vuelo va a comenzar, siendo obligatorio comprobar el estado del dron en la pantalla de la *Tablet*, ya que de no recibir la confirmación de que el dron está armado puede darse la situación de que, pensando que no está armado, se use el mando RC y se enciendan los motores cuando hay personas cerca de las hélices.
4. Se realiza el despegue y se realizan las operaciones necesarias para llevar a cabo las pruebas, que en el caso que nos concierne, sería postrar al dron a una altura determinada y obtener los datos inerciales, magnéticos y de los ángulos de navegación del dron, para posteriormente realizar los mismos análisis que los realizados a lo largo del presente documento.

Aunque las pruebas en vuelo estaban planificadas en el Anteproyecto del presente TFG, éstas no se han podido realizar debido a las inclemencias meteorológicas que han azotado a la isla de Gran Canaria durante el último mes, dándose situaciones de poca seguridad para salir a realizarlas.

5.5. Conclusiones

A lo largo del presente capítulo se han desarrollado, aplicado y evaluado tres técnicas diferentes de reducción de error. En la presente sección se presentará resumen comparativo en el que el lector pueda visualizar de manera rápida y concreta las mejoras del yaw que introduce cada uno de los métodos.

El primer método aplicado fue el alejamiento de la IMU del foco de interferencias magnéticas (los motores), de manera que el rango dinámico de partida era 9.5° . Cuando se alejó la IMU del foco, el rango dinámico descendió hasta 3.63° , siendo esta reducción de un 62%.

En el segundo método consistía en la generación de una interferencia dominante para reducir el rango dinámico de la señal magnética, y por ende, de la señal de orientación. Para llevar a cabo este análisis, se partieron del rango dinámico máximo y mínimo obtenido con y sin metal, siendo éstos de 2.24° , 2.04° en el caso sin metal, y de 1.93° y 1.27° en el caso con metal. De ésta manera, se consigue una reducción del rango dinámico de la señal de orientación de hasta un 43%.

Finalmente, el último método consistía en la elaboración de un algoritmo que permitiese integrar la señal de orientación y reducir su rango dinámico. En este caso, los datos de partida son los obtenidos en el mejor caso del método anterior. Es decir, la señal de orientación cuyo rango dinámico era de 1.27° . Tras aplicarle a esta señal el algoritmo desarrollado, el rango dinámico de la señal descendió hasta los 0.2361° , lo que significa una mejora de aproximadamente un 80%.

En cuanto al efecto de cada uno de los métodos sobre la fdp de la señal, destacar que solo el segundo método permite modificar la fdp de la señal y permitir que ésta se aproxime a una distribución normal.

Capítulo 6. Conclusiones

6.1. Resultados y revisión de objetivos

Este Trabajo Fin de Grado está orientado a la evaluación de interferencias que afectan a sistemas de orientación en drones ligeros. No obstante, debido a inclemencias climatológicas la evaluación no ha podido realizarle en vuelo, sino solamente en estática mediante el uso de un trípode, aunque sí se realizaron todas las tareas asociadas previas al vuelo. A través de esto, se extraen conclusiones sobre las interferencias con las que habrá de hacer frente una vez esté embarcado en el dron.

Primeramente, se obtuvieron los conocimientos necesarios para poder evaluar adecuadamente los datos ofrecidos por cada uno de los sensores, así como conocimientos sobre diseño e impresión 2D y 3D.

Posteriormente, se decidió evaluar el comportamiento del sistema bajo condiciones controladas, de manera que se pudiese observar la sensibilidad de los sensores que lo integran. De este punto, nacen la segunda y tercera fase del presente TFG, en el que se procede a realizar la evaluación de las interferencias que afectan al sistema. Del análisis de ambas fases se extrae:

1. La vibración provocada por el gimbal provoca que las medidas de los sensores inerciales tengan una fdp próxima a una distribución normal, de manera que el efecto que éstas tienen sobre el sistema es alterar el rango dinámico de la señal de orientación.

2. Las vibraciones provocadas por las corrientes de viento provocan que las medidas de los sensores inerciales posean una fdp asimétrica, lejana de una distribución normal, por lo que su efecto sobre el cálculo de la orientación es el de alterar tanto su rango dinámico como su fdp inicial.
3. De los puntos uno y dos se extrae la necesidad de buscar métodos de aislamiento o amortiguamiento mecánico, que permitan reducir o eliminar el efecto del viento y de la vibración del gimbal sobre el cálculo de la orientación.
4. El campo magnético generado por el gimbal es de distribución próxima a la normal, siendo su efecto el de alterar la fdp y el rango dinámico de la señal de orientación.

Finalmente, en la cuarta fase del presente TFG, se estudiaron técnicas de reducción de error: dos *hardware* y una *software*.

1. Alejamiento del foco emisor

Esta técnica se basa en la ley inversa del cuadrado, que describe que la intensidad de campo magnético disminuye proporcionalmente a la distancia al cuadrado. Esta técnica arroja muy buenos resultados, llegando a reducir en aproximadamente un 75% la señal magnética y en aproximadamente un 60% la señal de orientación.

2. Generación de interferencia dominante

Esta técnica no arroja los resultados esperados, ya que su influencia sobre el rango dinámico de la señal magnética es mínimo y la reducción del rango dinámico de la señal de orientación es de hasta un 43%.

3. Enventanamiento de la señal de orientación

Esta técnica *software* arroja resultados muy parecidos a los obtenidos mediante alejamiento del foco emisor, consiguiéndose reducir en aproximadamente un 80% el rango dinámico de la señal de orientación, concluyéndose que conllevaría un error aceptable y que este método podría ser implantado. El único inconveniente que tiene es el tiempo, que es su problema principal.

6.2. Líneas futuras

- Dado el impacto que tienen las interferencias mecánicas en el cálculo de la orientación (dos sensores inerciales frente a uno magnético), una posible línea futura es la implantación de técnicas de aislamiento mecánico para reducir el efecto de éstas sobre la medida.
- Tanto la IMU como el gimbal están controlados por un controlador proporcional, integral y derivador (PID), por lo que otra línea sería el cálculo de estos parámetros para conseguir que ambos sistemas funcionen a la perfección, de manera óptima. De esta manera, se elimina una de las principales fuentes de error, ya que si el gimbal está perfectamente calibrado, éste no vibra.
- Desarrollo e implantación de diferentes algoritmos de reducción, buscando minimizar el factor temporal.
- Implementación y prueba de los métodos de reducción de error propuestos en este Trabajo Fin de Grado con el sistema embarcado en el dron.
- Realizar la comparativa de los datos obtenidos mediante el uso de diferentes IMUs bajo las mismas condiciones.
- Realizar un estudio más exhaustivo entre las relaciones existentes de los parámetros físicos y los obtenidos para el *pitch*, *roll* y *yaw*.
- Finalizar las pruebas de vuelo de cara a poder evaluar la eficiencia de las técnicas de reducción de interferencia en el dron.

Bibliografía

[1] (27/01/2016). *Incendios y hectáreas por tipo de fuego*. Disponible en:

<http://espanaenllamas.es/incendios-y-hectareas-por-tipo-de-fuego/>.

[2] (27/01/2016). *Estadística de incendios forestales*. Disponible en:

http://www.magrama.gob.es/es/desarrollo-rural/estadisticas/Incendios_default.aspx#para0.

[3] Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, "Desarrollo de nuevas técnicas para detección y Seguimiento de Líneas de Fuego en incendios forestales basado en sensores térmicos móviles de despliegue rápido (SeLIF) (Ref. 686/2012)," 2015.

[4] Fundación Biodiversidad del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, "Sistema de visión de umbral térmico georreferenciado: aplicación a la detección y seguimiento de líneas de fuego en incendios forestales." 2015.

[5] (25/01/2016). *Tipos de drones*. Disponible en: <http://www.areatecnologia.com/aparatos-electronicos/drones.html>.

[6] J. Batista Darias, "Caracterización y evaluación de un UAV multirrotores para la obtención y georreferenciación de imágenes: estudio de viabilidad y demostrador." 2014.

[7] N. Cazorla Santana, "Sistema de radio dual para telecomando y telemetría en multicopteros,"

[8] P. Mena Rodríguez, "Guiado de UAV multirrotor asistido por imagen: aplicación a un sistema de recarga distribuido." .

[9] (27/01/2016). *¿Cómo funciona una cámara termográfica?* Disponible en:
<http://www.flir.es/corporate/display/?id=41523>.

[10] (25/01/2016). *What is a gimbal -- and what does it have to do with NASA?* Disponible en:
<http://science.howstuffworks.com/gimbal.htm>.

[11] (30/01/2016). *Localización absoluta y relativa*. Disponible en:
<https://prezi.com/bpxlyvpz60m6/localizacion-relativa-y-absoluta/>.

[12] F. Palomo, "Aviónica y sistemas de navegación," pp. 20, 2006.

[13] Universidad de Sevilla, "Sensor medidor de Aceleración. ACELERÓMETRO," .

[14] (14/04/2016). *Introducción al giroscopio*. Disponible en:
<http://5hertz.com/tutoriales/?p=431>.

[15] F. Escamilla. Giroscopio. 2013. Disponible en: <http://girosco.blogspot.com.es/>.

[16] H. Barcos, E. Rojas and E. Restrepo, *Física: Principios De Electricidad Y Magnetismo*. Colombia: 2012.

[17] (17/04/2016). *Attitude Heading Reference System*. Disponible en:
https://erlerobotics.gitbooks.io/erlerobot/content/es/beaglepilot/attitude_heading_reference_system.html.

[18] (17/04/2016). *IMU and INS*. Disponible en: <http://www.vectornav.com/support/library/imu-and-ins>.

[19] G. Castillo, "Navegación Integrada INS-GPS: Aplicación a un SAR aerotransportado," Noviembre de 2012, 2012.

-
- [20] (17/04/2016). *AHRS*. Disponible en: <http://www.vectornav.com/support/library/ahrs>.
- [21] (17/04/2016). *9 Degrees of Freedom - Razor IMU*. Disponible en: <https://www.sparkfun.com/products/10736>.
- [22] (15/04/2016). *Tutorial*. Disponible en: <https://github.com/ptrbrtz/razor-9dof-ahrs/wiki/Tutorial>.
- [23] (11/02/2016). *Corte por láser*. Disponible en: http://www.ecured.cu/Corte_por_l%C3%A1ser.
- [24] (13/04/2016). *MathWorks Website*. Disponible en: <http://es.mathworks.com/>.
- [25] MathWorks, "Máximo de una señal," .
- [26] MathWorks, "Mínimo de una señal," .
- [27] MathWorks, "Filtrado paso bajo mediante 'smooth'," .
- [28] H. Pabón, *Probabilidad Y Estadística Con Matlab Para Investigadores*. Universidad de Cundinamarca: 2010.
- [29] MathWorks, "Histograma de una señal," .
- [30] MathWorks, "Media de una señal," .
- [31] MathWorks, "Desviación estándar de una señal," .
- [32] MathWorks, "Coeficiente de simetría de una señal." .
- [33] MathWorks, "Coeficiente de apuntamiento de una señal." .
- [34] (25/05/2016). *¿Qué es un gimbal?*. Disponible en: <http://medya-audiovisual.com/que-es-un-gimbal/>.

[35] D. Bueno, "Motor eléctrico brushless: Funcionamiento y características," 2013.

[36] Anonymous "External Field of a Bar Magnet and Inverse Square Law," .

Parte II

Presupuesto

En este capítulo se recoge el presupuesto total del presente Trabajo Fin de Grado. Para la realización de éste, se han seguido las recomendaciones del Colegio oficial de Ingenieros de Telecomunicación (COIT) sobre los baremos orientativos mínimos para trabajos profesionales en 2009. El presupuesto se ha desglosado en varias secciones en las que se han separado los distintos costes asociados al desarrollo del TFG. Estos costes se dividen en:

1. Recursos materiales.
2. Recursos humanos.
3. Gastos en material fungible.
4. Derechos de visado del COIT.
5. Aplicación de impuestos.

P 1. Recursos materiales

Entre los recursos materiales utilizados para la realización de este trabajo se incluyen las herramientas *software* de control y calibración, los paquetes *software* usados para la redacción de la memoria, y el sistema operativo bajo el que se ejecutó el trabajo. Asimismo, se incluyen los equipos *hardware* usados para dar soporte a estas herramientas.

Se estipula el coste de amortización para un período de 3 años. Para ello, se utilizará un sistema de amortización lineal o constante, en el que se supone que el inmovilizado material se deprecia de forma constante a lo largo de su vida útil. La cuota de amortización anual se calcula usando la siguiente fórmula:

$$Cuota\ anual = \frac{Valor\ de\ adquisición - Valor\ residual}{Años\ vida\ útil} \quad (Ec.\ P.1)$$

El “valor residual” es el valor teórico que se supone que tendrá el elemento después de su vida útil.

P 1.1. Recursos Hardware

Para la ejecución de este trabajo se han utilizado las siguientes herramientas hardware:

- Un ordenador portátil MacBook Pro de 13”, Intel Core i5, con 4 GB de memoria RAM y 500 GB de disco duro.
- Un ordenador de sobremesa Acer Aspire Intel Core i5, con 4 GB de memoria RAM y 500 GB de disco duro.
- Una 9DOF Razor IMU.
- Gimbal Tarot 2D Brushless.
- Impresora 3D LeapFrog.
- Cortadora láser.

COSTES DE LAS HERRAMIENTAS HARDWARE

DESCRIPCIÓN	Valor de adquisición	Valor residual	Vida útil	Valor Amortización (4 meses)
ORDENADOR PORTÁTIL MACBOOK PRO DE 13” i5	1249 €	500 €	5 años	49.93 €
ORDENADOR DE SOBREMESA ACER ASPIRE i5	700 €	200 €	5 años	33.33 €
9DOF RAZOR IMU	65.72 €	20 €	3 años	5.08 €
GIMBAL TAROT 2D BRUSHLESS	106 €	40 €	3 años	7.33 €
IMPRESORA 3D LEAPFROG	2499€	1200 €	7 años	61.86 €
CORTADORA LÁSER	1000 €	400 €	7 años	18.57 €
TOTAL DE COSTES				176.10 €

Tabla P.1. Costes de las herramientas hardware

P 1.2. Recursos Software

Las herramientas *software* utilizadas en el presente trabajo fueron:

- Microsoft Office 2010 (Mac)
- Matlab R2015b (Mac)
- Plataforma de programación Arduino (Mac)

COSTES DE LAS HERRAMIENTAS SOFTWARE

DESCRIPCIÓN	Valor de adquisición	Valor residual	Vida útil	Valor Amortización (4 meses)
MICROSOFT OFFICE 2010	0 €	0 €	5 años	0 €
MATLAB R2015B	99 €	0 €	5 años	6.60 €
PLATAFORMA ARDUINO	0 €	0 €	1 años	0 €
TOTAL DE COSTES				6.60 €

Tabla P.2. Costes de las herramientas software

P 2. Recursos Humanos

En este Trabajo Fin de Grado se han invertido 300 horas en las tareas de especificación, desarrollo y documentación necesarias para la elaboración del mismo. El importe de las horas de trabajo empleadas para la realización del trabajo se calcula siguiendo las recomendaciones del COIT:

$$H = C_t * 74.88 * H_n + C_t * 96.72 * H_e \quad (\text{Ec. P.2})$$

Donde:

- H son los honorarios totales por el tiempo dedicado.

- H_n son las horas normales trabajadas (dentro de la jornada laboral).
- H_e son las horas especiales.
- C_t es un factor de corrección función del número de horas trabajadas.

Las 300 horas invertidas, se han realizado todas ellas dentro del horario normal de trabajo. Según el COIT, el coeficiente C_t tiene un valor variable en función del número de horas empleadas de acuerdo con la siguiente tabla:

HORAS EMPLEADAS	FACTOR DE CORRECCIÓN C_t
HASTA 36 HORAS	1
DESDE 36 A 72 HORAS	0.90
DESDE 72 A 108 HORAS	0.80
DESDE 108 A 144 HORAS	0.70
DESDE 144 A 180 HORAS	0.65
DESDE 180 A 360 HORAS	0.60
DESDE 360 A 540 HORAS	0.55

Tabla P.3. Valores de la variable C_t en función de las horas trabajadas

Como se puede observar, el número de horas invertidas está en el rango de más de 180 y menos de 360, por lo que según la tabla anterior el factor de corrección es de $C_t = 0.60$. Con ello, la ecuación del importe de horas de trabajo resulta de la siguiente forma:

$$H = 0.60 * 74.88 * 300 + 0.60 * 96.72 * 0 = 13478.40 \text{ €}$$

Los honorarios totales por tiempo dedicado libres de impuestos ascienden a **TRECE MIL CUATROCIENTOS SETENTA Y OCHO EUROS CON CUARENTA CÉNTIMOS (13478.40 €)**.

Por otra parte, el importe de la redacción del trabajo fin de grado se calcula de acuerdo a la siguiente expresión:

$$R = 0,07 * P * C_n \quad (\text{Ec. P.3})$$

Donde:

- P es el presupuesto del trabajo.
- C_n es el coeficiente de ponderación en función del presupuesto.

En la siguiente tabla se muestra el presupuesto calculado hasta el momento:

DESCRIPCIÓN	COSTES
RECURSO HARDWARE	176.10 €
RECURSO SOFTWARE	6.60 €
TRABAJO TARIFADO POR TIEMPO EMPLEADO	13478.40 €
TOTAL DE COSTES	13661.10 €

Tabla P.4. Presupuesto de los costes materiales y tarifado por tiempo empleado

El presupuesto calculado hasta el momento asciende a 13661.10 €. Como el coeficiente de ponderación para presupuestos menores de 30050 € viene definido por el COIT con un valor de 1.00, el coste derivado de la redacción del Trabajo Fin de Grado es de:

$$R = 0.07 * 13661.10 * 1.00 = 956.27€$$

Por tanto, el coste libre de impuestos derivado de la redacción del TFG es de **NOVECIENTOS CINCUENTA Y SEIS EUROS CON VEINTISIETE CÉNTIMOS (956.27 €)**.

P 3. Gastos en Material Fungible

Además de los recursos *hardware* y *software*, en este trabajo se han empleado otros materiales, como son los folios y el tóner de la impresora o cinta de doble cara entre otros, que se especifican como material fungible. En la siguiente tabla se muestran los costes generados por estos recursos.

DESCRIPCIÓN	COSTES
FOLIOS	30 €
TÓNER DE LA IMPRESORA	100 €
CINTA DE DOBLE CARA	7.90 €
CINTA NEGRA AISLANTE	5.90 €
CARTUCHO PARA IMPRESIÓN 3D	35.99 €
TOTAL DE COSTES	179.79 €

Tabla P.5. Costes del material fungible

P 4. Derechos de Visado del COIT

Los gastos de visado del COIT se tarifican mediante la siguiente expresión:

$$V = 0,006 * P * C_v \quad (\text{Ec. P.4})$$

Donde:

- P es el presupuesto del trabajo.
- C_v es el coeficiente reductor en función del presupuesto del trabajo.

El presupuesto P, calculado hasta el momento asciende a la suma de los costes de ejecución material, de redacción y de material fungible.

$$P = 13661.10 + 956.27 + 179.79 = 14797,16 \text{ €}$$

Como el coeficiente de ponderación para presupuestos menores de 30050 € viene definido por el COIT con un valor de 1.00, el coste de los derechos de visado del trabajo asciende a la cantidad de:

$$V = 0,006 * 14797.16 * 1,00 = 88,78 \text{ €}$$

Por tanto el coste de los derechos de visado del trabajo asciende a **OCHENTA Y OCHO EUROS CON SETENTA Y OCHO CÉNTIMOS (88.78 €)**.

Por otro lado, los gastos de tramitación y envío están fijados en 6,01 €.

P 5. Aplicación de Impuestos

El coste total del trabajo fin de grado, antes de aplicarle los correspondientes impuestos, asciende a 14891.95 €, a lo que hay que sumarle el 7% de IGIC, con lo que el coste definitivo del Trabajo Fin de Grado es:

COSTES TOTALES DEL TRABAJO FIN DE GRADO

DESCRIPCIÓN	COSTE PARCIAL	COSTE TOTAL
RECURSOS MATERIALES		182.70 €
HARDWARE	176.10 €	
SOFTWARE	6.60 €	
COSTE DE INGENIERÍA		13478.40 €
COSTE DE REDACCIÓN		956.27 €
MATERIAL FUNGIBLE		179.79 €

DERECHOS DE VISADO	88.78 €
TRAMITACIÓN Y ENVÍO	6.01 €
SUBTOTAL:	14891.95 €
APLICACIÓN DE IMPUESTOS (7% I.G.I.C	1042.44 €
TOTAL DE COSTES	15934.39 €

Tabla P.6. Presupuesto total del Trabajo Fin de Grado

Daniel Hormigo Ruiz, autor del presente Trabajo de Fin de Grado, declara que:

El Trabajo Fin de Grado con título «Evaluación experimental de interferencias en sistemas de orientación embarcados en drones ligeros», desarrollado en la Escuela de Ingeniería de Telecomunicaciones y Electrónica, de la Universidad de las Palmas de Gran Canaria, tiene un coste de desarrollo total de **QUINCE MIL NOVECIENTOS TREINTA Y CUATRO EUROS CON TREINTA Y NUEVE CÉNTIMOS (15934.39 €)**, correspondiente a la suma de las cantidades consignadas a los apartados considerados previamente.

Las Palmas de Gran Canaria a 22 de Julio de 2016

Firma: Daniel Hormigo Ruiz

Parte III

Anexos

Anexo A. Características 9DOF Razor IMU

A continuación se describen las características físicas, de alimentación y consumo, las condiciones de operatividad y las interfaces de comunicaciones de la 9DOF Razor IMU usada en este Trabajo Fin de Grado.

Físico		Alimentación y consumo	
9DOF Razor IMU			
Tipo	AHRS	Tipo	AHRS
Dimensiones SIN carcaza	28x41 mm	Alimentación	3.3 V
Dimensiones CON carcaza	-	Corriente	-
Peso SIN	9 g	Consumo	-
Peso CON	-		
Temperatura de operación	-		

Tabla A.1. Dimensiones físicas y alimentación y consumo

Condiciones		Interfaz	
9DOF Razor IMU			
Yaw/Heading	1º - 2º ⁽¹⁾	I2C	Sí
Resolución	0.73 – 4.25 mGauss ⁽¹⁾	Baud rate (bps)	9600 - 57600
			50 ⁽⁴⁾
		Update rate (Hz)	0.75 – 150 ⁽⁵⁾
			< 160 ⁽⁶⁾
		Software	Sí ^{(2) (3)}

Tabla A.2. Condiciones de funcionamiento e interfaz de comunicaciones

⁽¹⁾ Datos extraídos del datasheet del magnetómetro. No hay disponibilidad de un datasheet general.

⁽²⁾ Podemos realizar un software propio ya que tenemos disponible el formato de las tramas en el manual. La calibración se realiza automáticamente en el software desde el PC.

⁽³⁾ Software abierto, disponible en la web.

⁽⁴⁾ Medida general

⁽⁵⁾ Medida continua

⁽⁶⁾ Medida solo del magnetómetro

Anexo B. Imágenes

En este anexo se encuentran otro conjunto de imágenes de los diseños que ayudarán al lector a comprender su diseño y su forma.

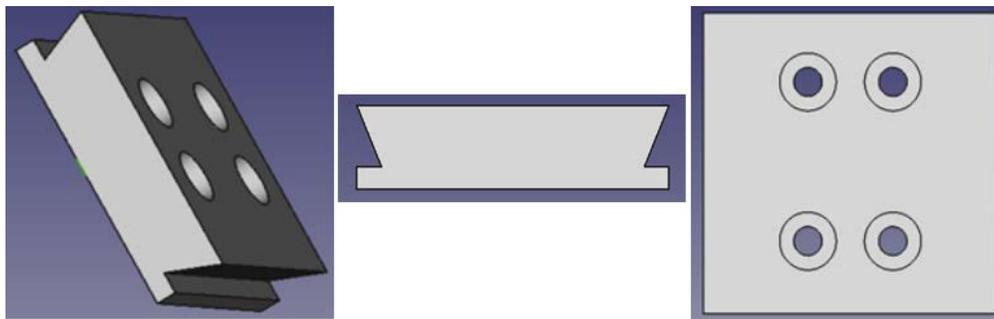


Figura B.1. Diseño 3D de la pieza de anclaje trípode-estructura

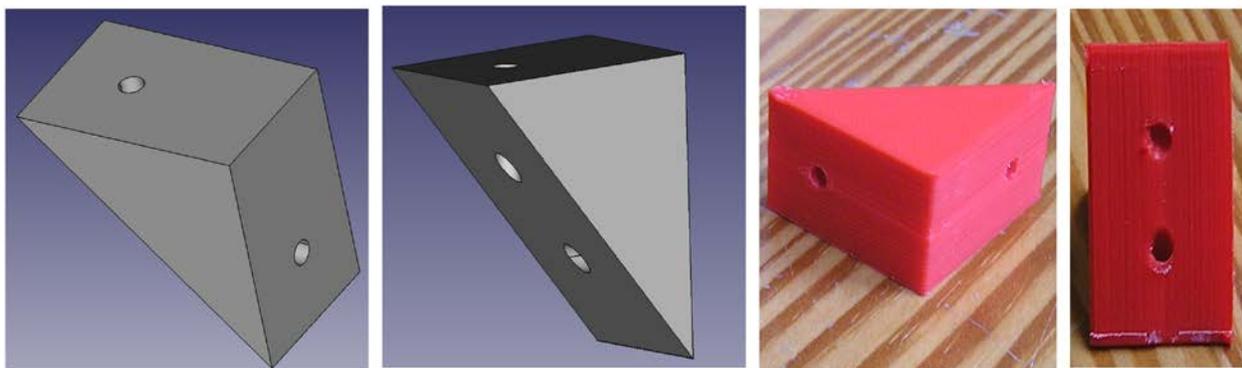


Figura B.2. Diseño 3D y real de la pieza de estabilización

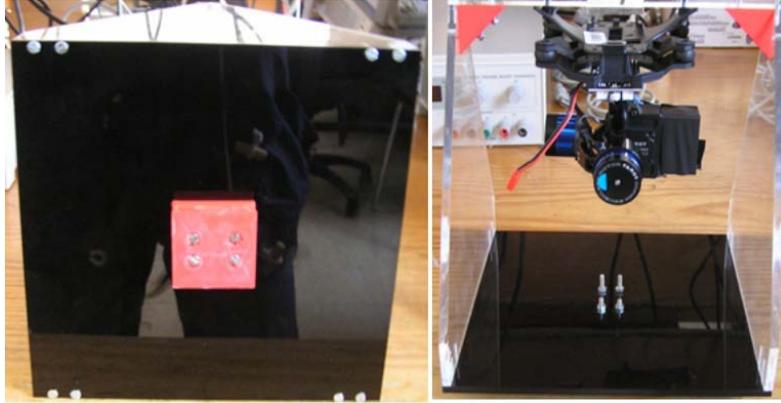


Figura B.3. Estructura montada

Anexo C. Señales

En este anexo se encuentran aquellas señales necesarias para la comprensión del presente Trabajo Fin de Grado, pero que, para no distraer al lector durante la parte de la memoria descriptiva, se ha decidido no plasmar en ella.

Comp Acelerómetro X en FRONTAL con motores OFF

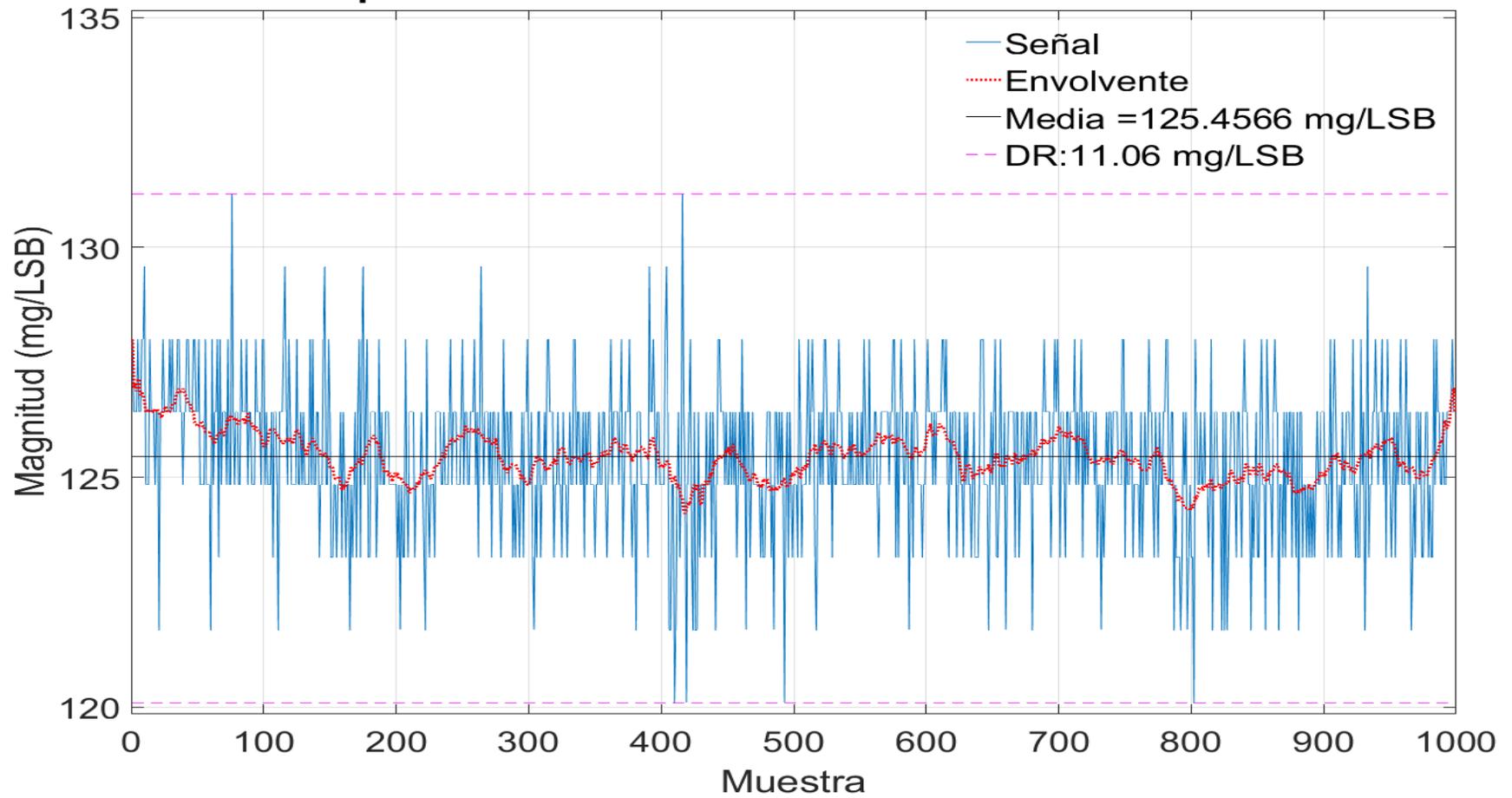


Figura C.1. Medida acelerométrica en eje X IMU en posición frontal, motores apagados y aislado del viento

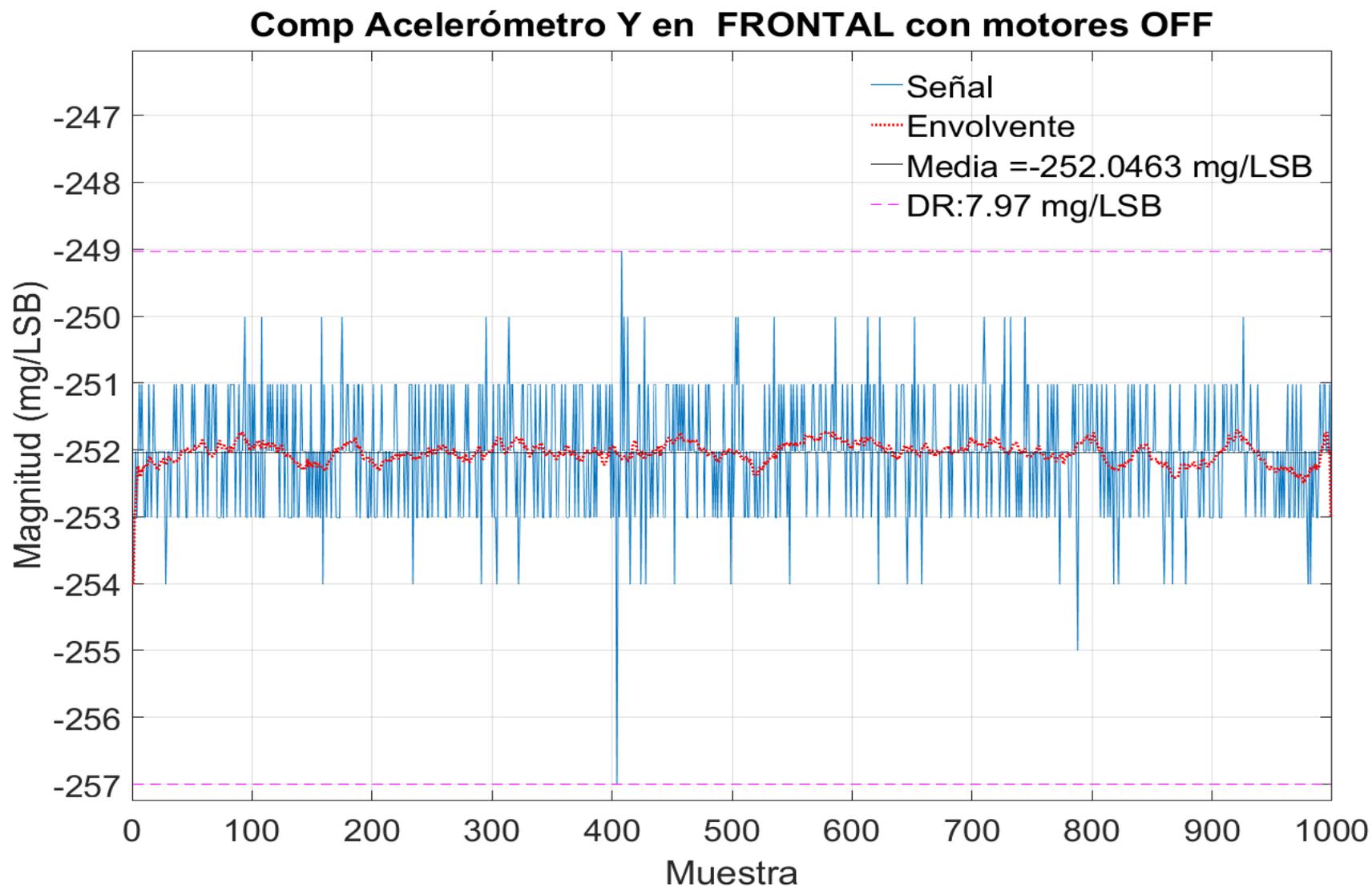


Figura C.2. Medida acelerométrica en eje Y IMU en posición frontal, motores apagados y aislado del viento

Comp Acelerómetro Z en FRONTAL con motores OFF

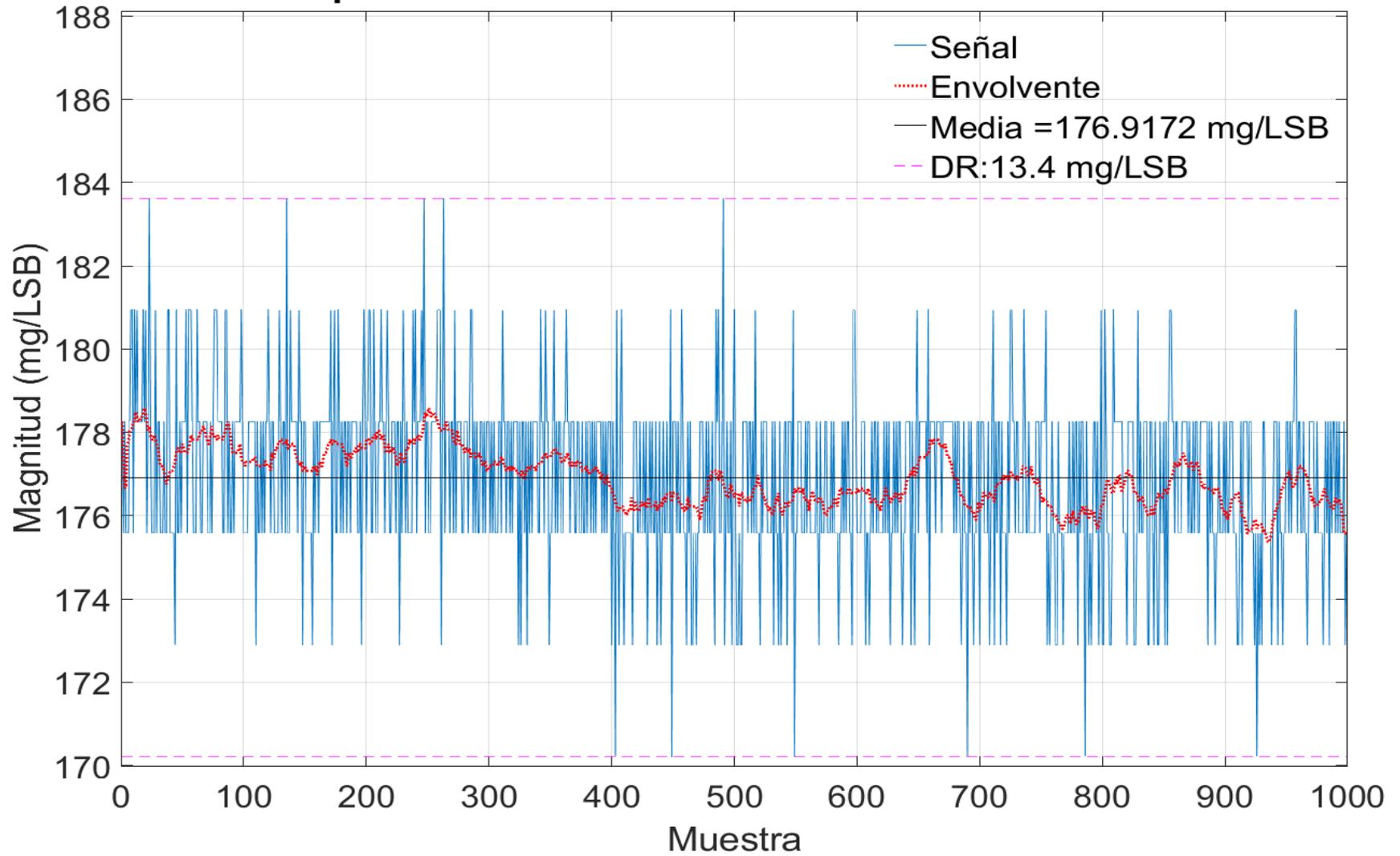


Figura C.3. Medida acelerométrica en eje Z IMU en posición frontal, motores apagados y aislado del viento

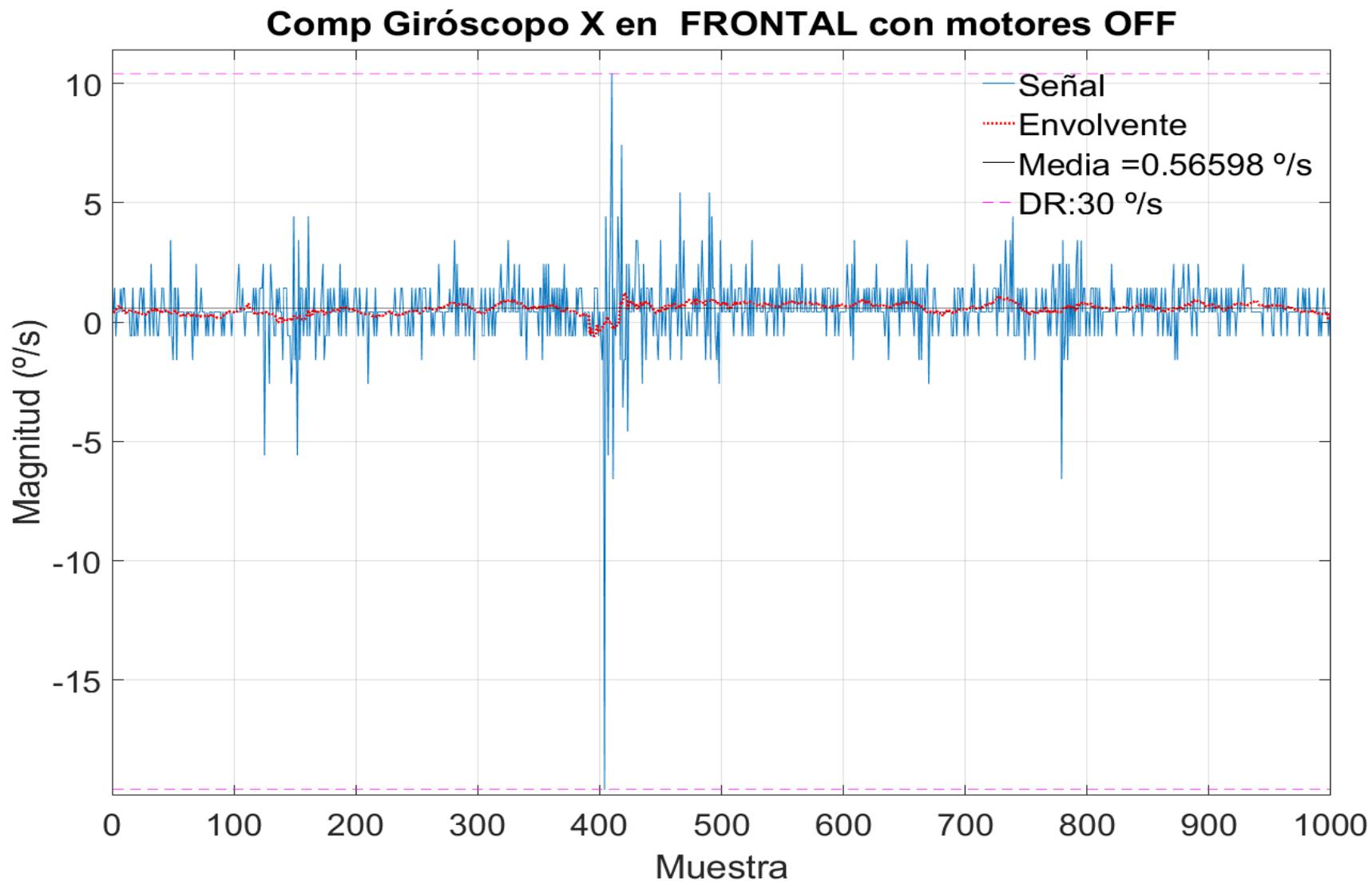


Figura C.4. Medida giroscópica en eje X IMU en posición frontal, motores apagados y aislado del viento

Comp Gir6scopo Y en FRONTAL con motores OFF

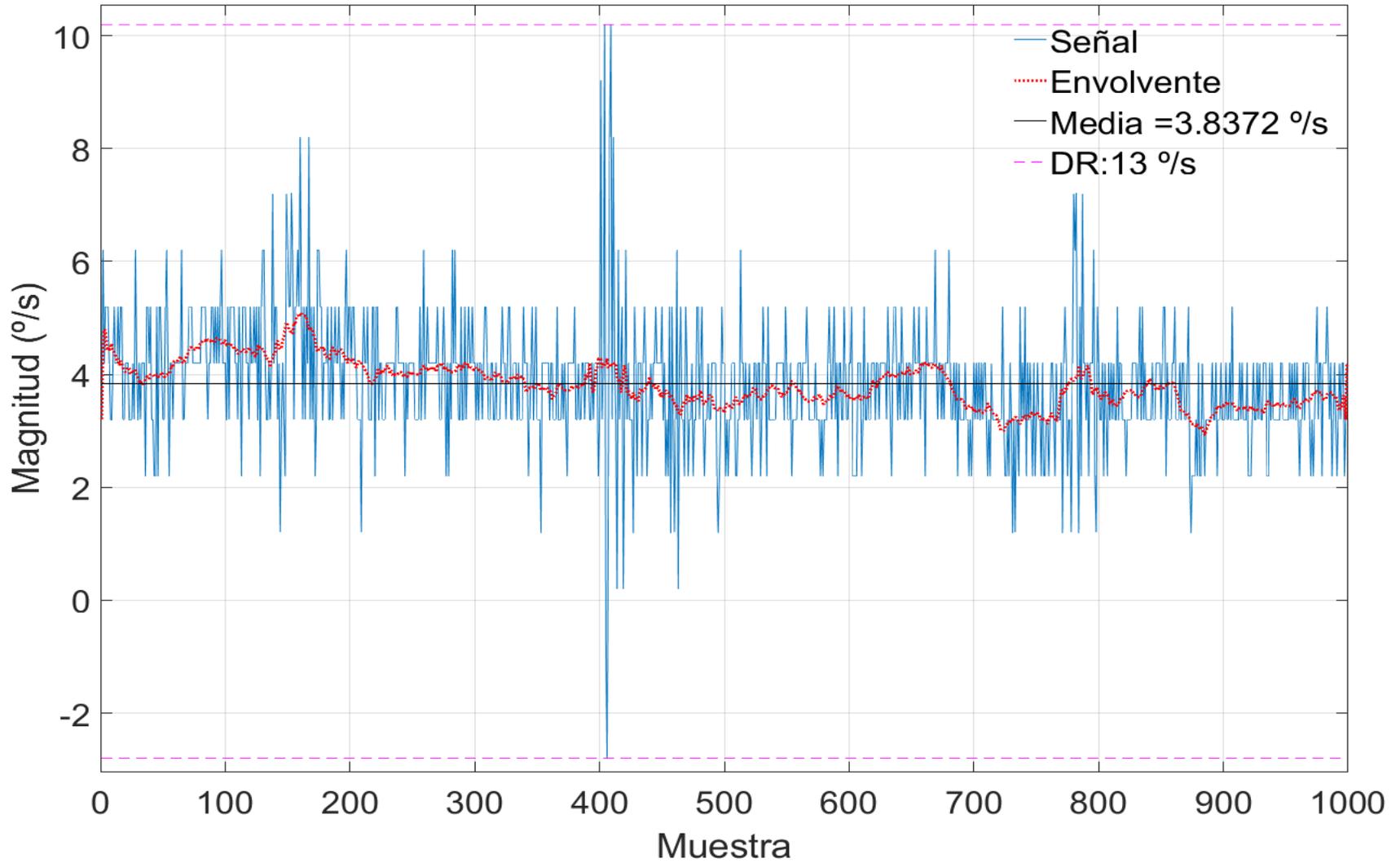


Figura C.5. Medida girosc6pica en eje Y IMU en posici6n frontal, motores apagados y aislado del viento

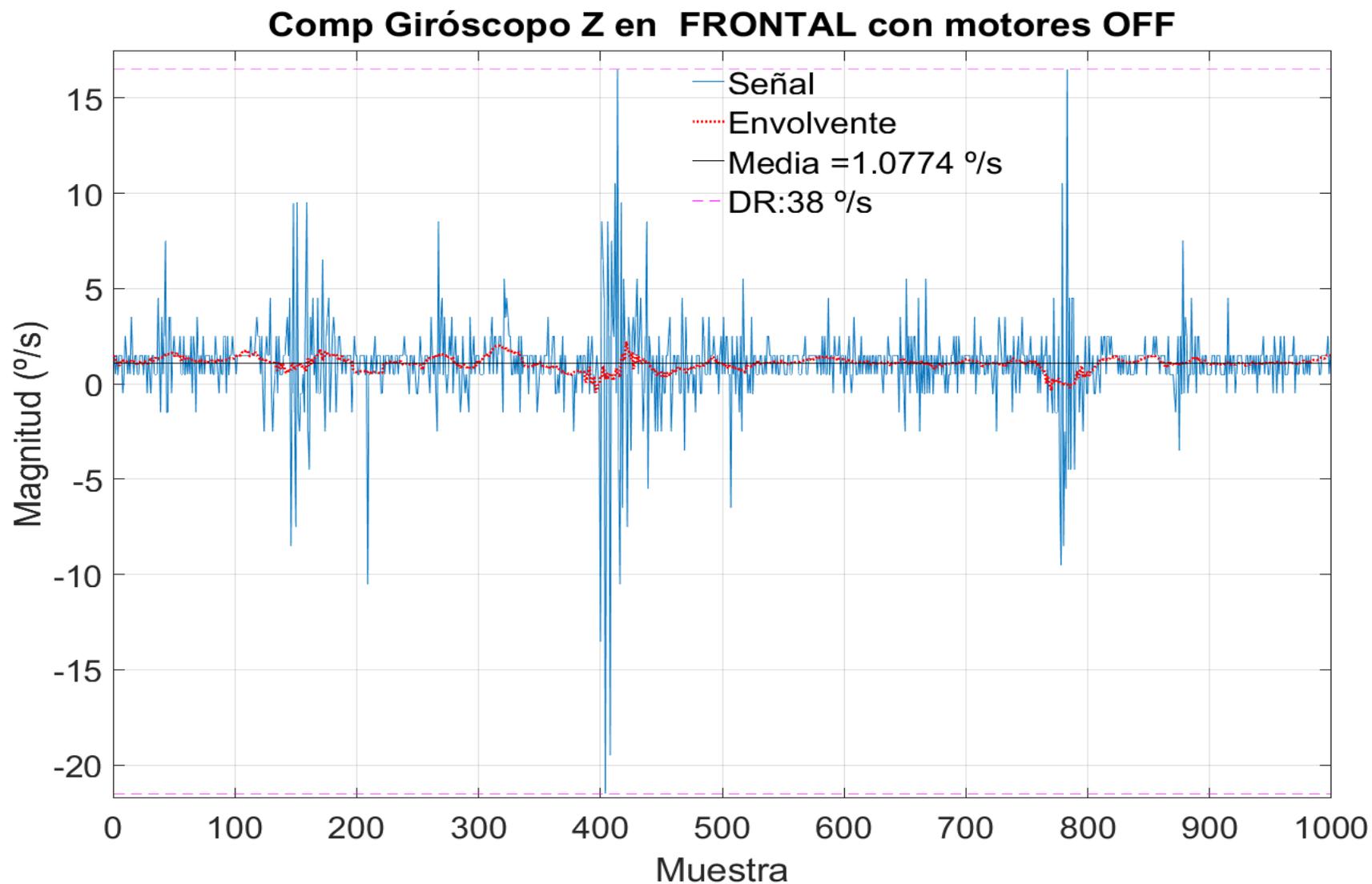


Figura C.6. Medida giroscópica en eje Z IMU en posición frontal, motores apagados y aislado del viento

Comp Mag X en FRONTAL con motores OFF

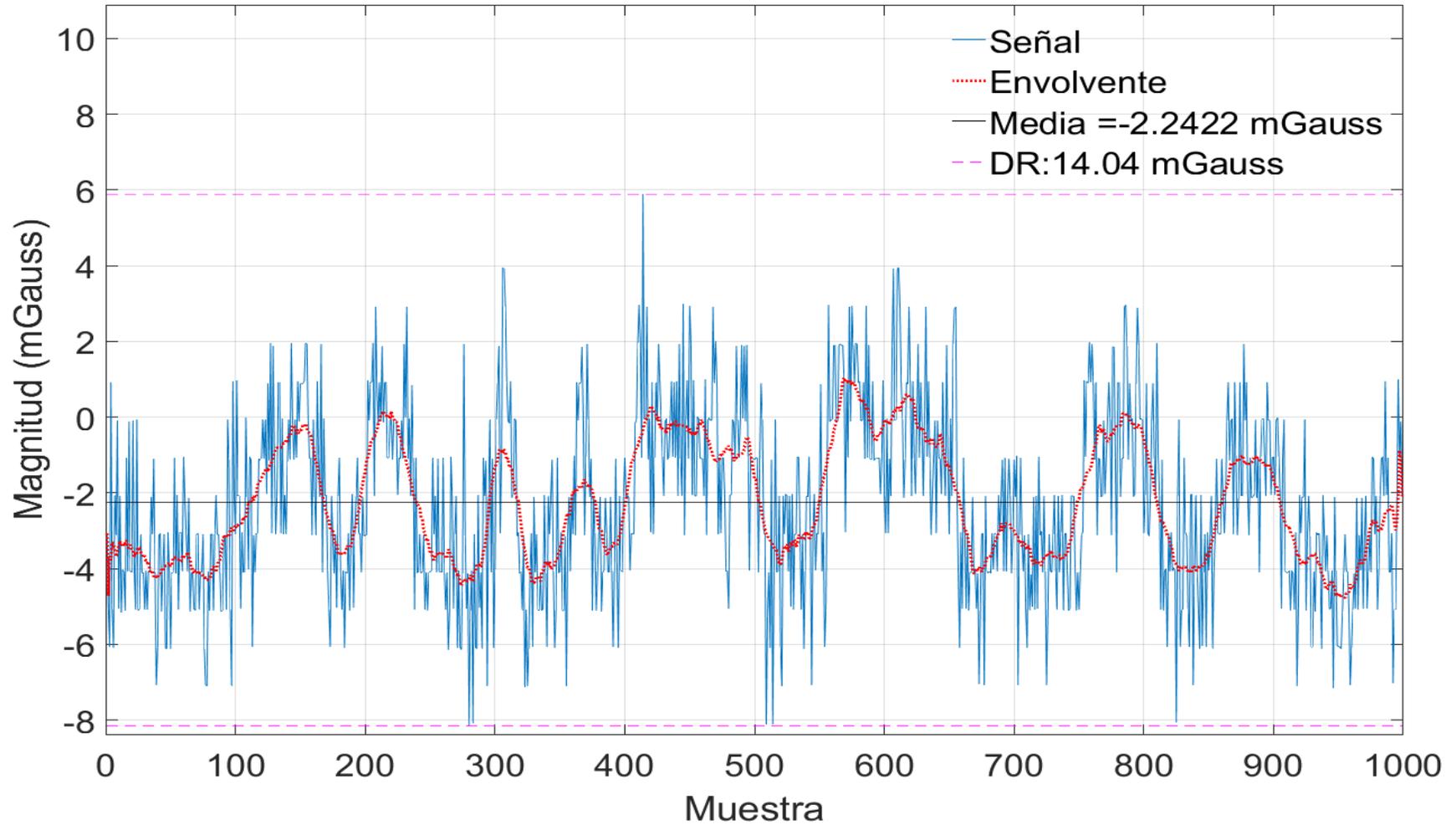


Figura C.7. Medida magnética en eje X IMU en posición frontal, motores apagados y aislado del viento

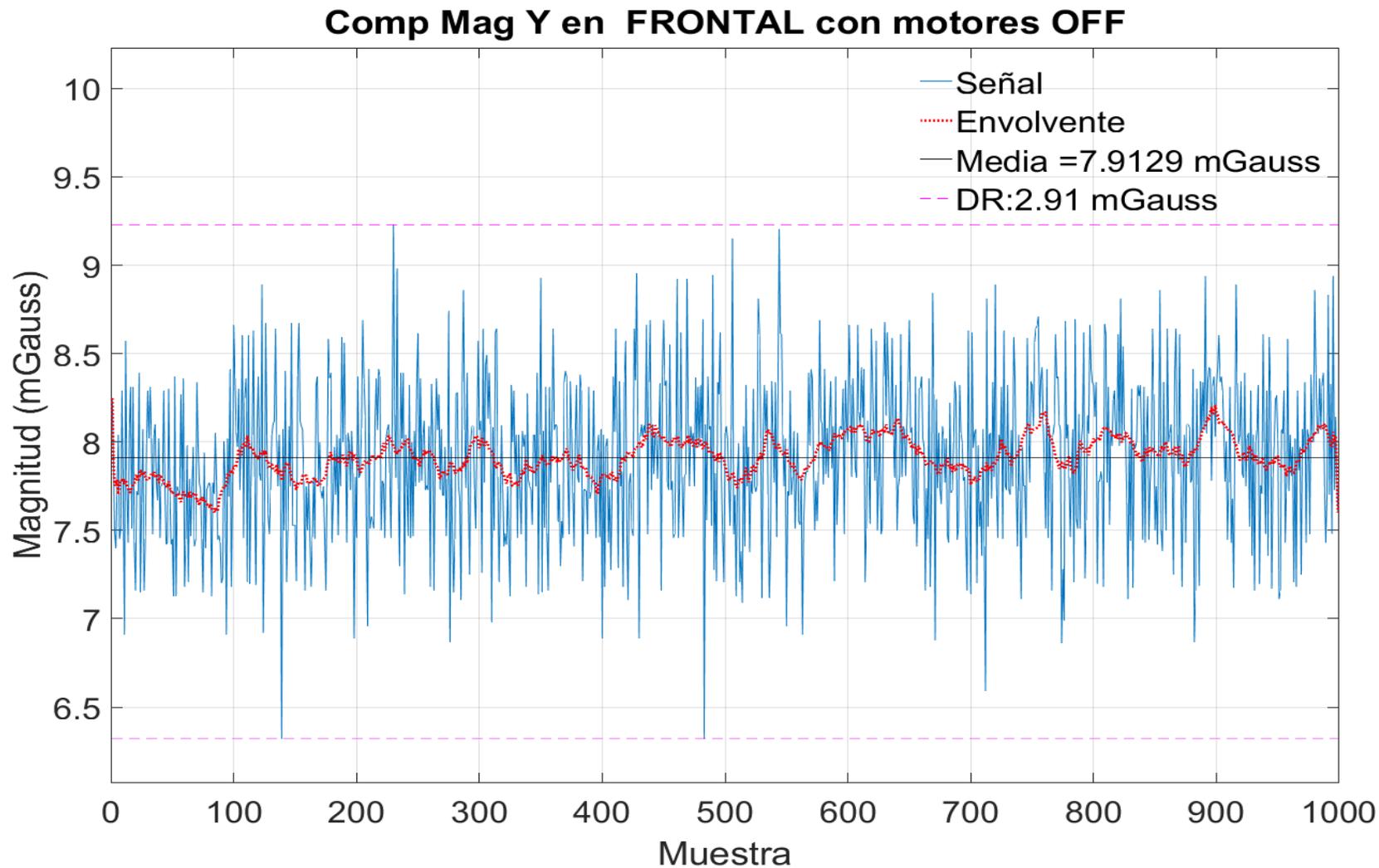


Figura C.8. Medida magnética en eje Y IMU en posición frontal, motores apagados y aislado del viento

Comp Mag Z en FRONTAL con motores OFF

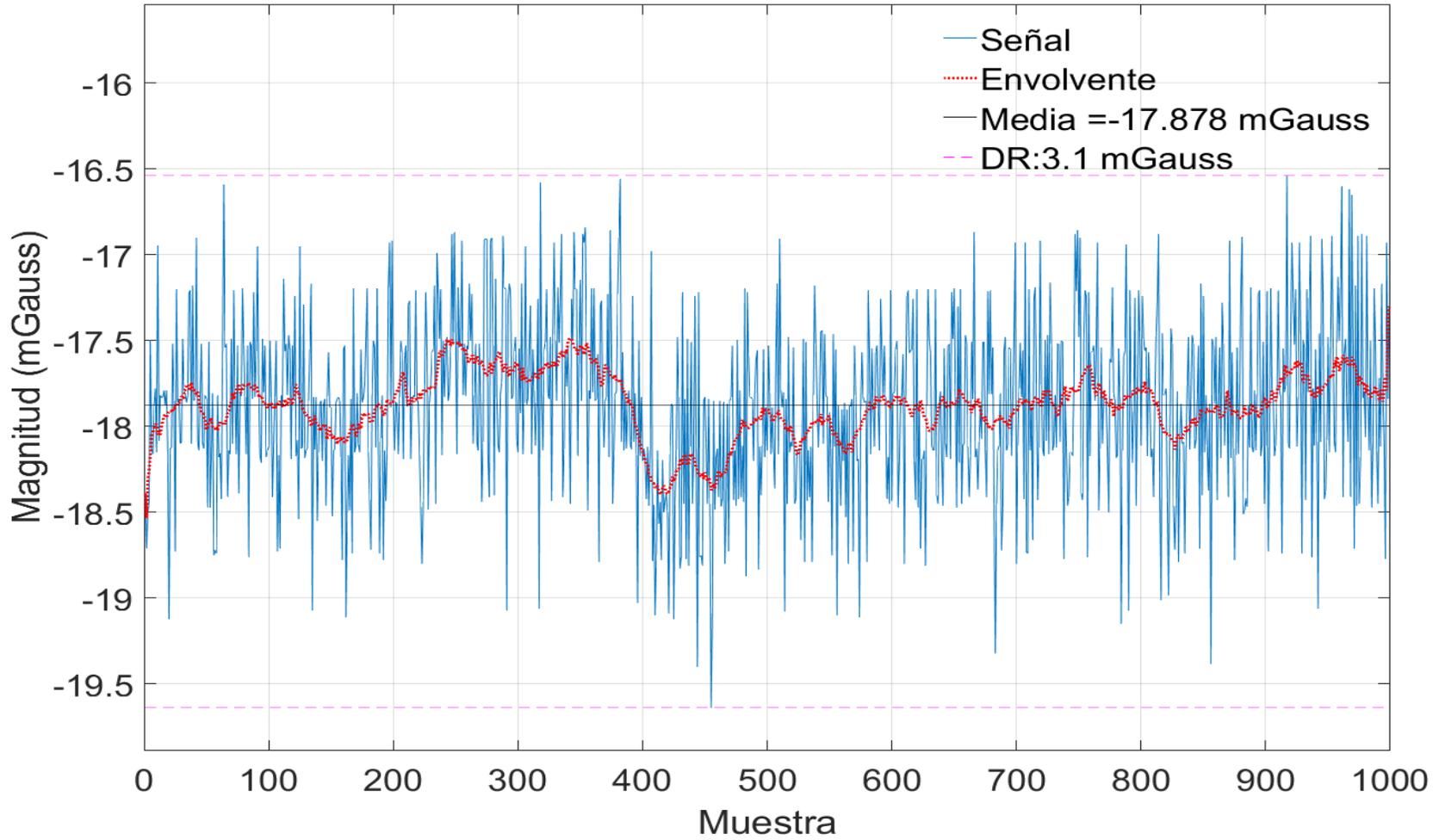


Figura C.9. Medida magnética en eje Z IMU en posición frontal, motores apagados y aislado del viento

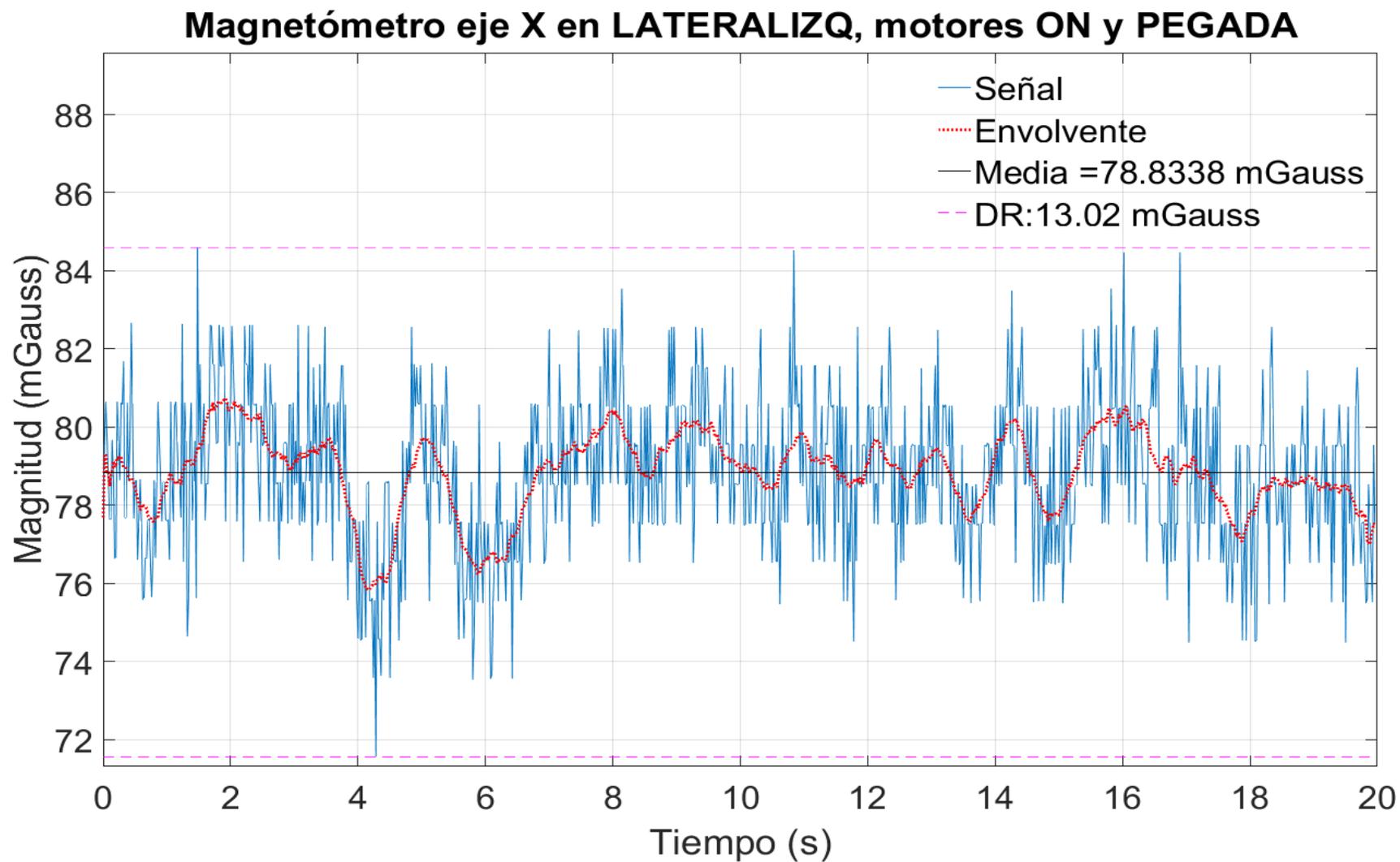


Figura C.10. Medida magnética en eje X IMU en posición lateral, pegada, aislada del viento y motores encendidos

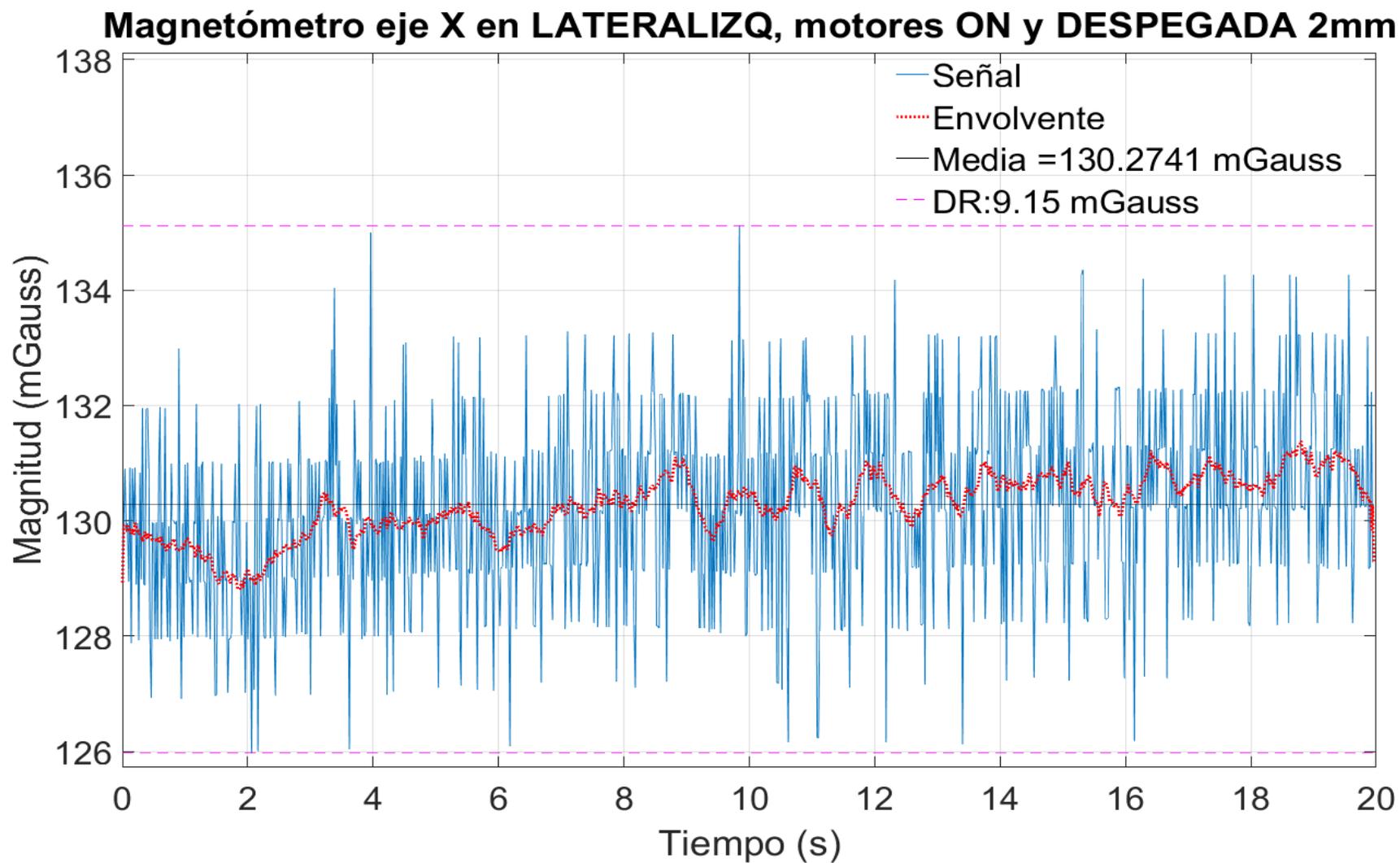


Figura C.11. Medida magnética en eje X IMU en posición lateral, separada, aislada del viento y motores encendidos

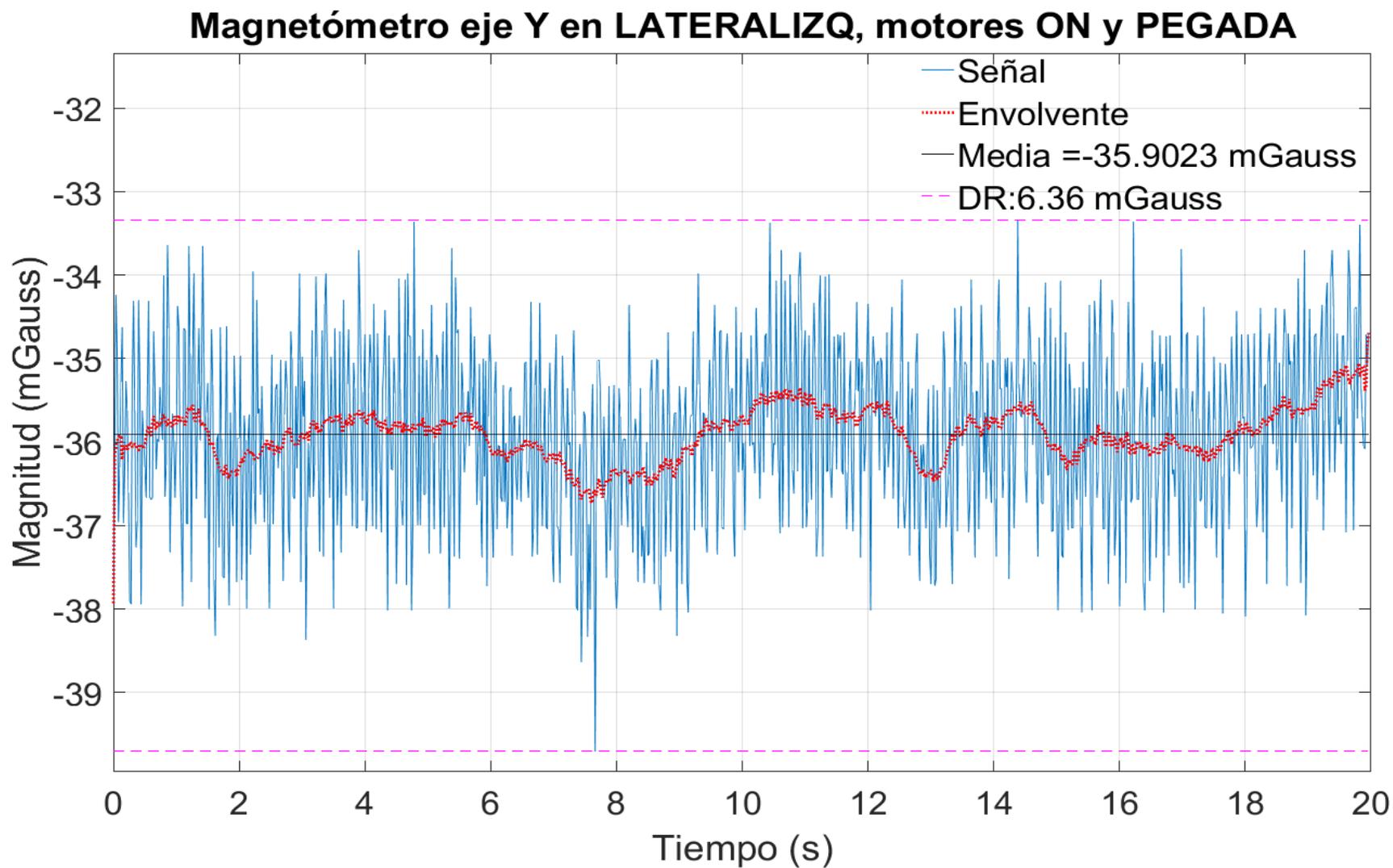


Figura C.12. Medida magnética en eje Y IMU en posición lateral, pegada, aislada del viento y motores encendidos

Magnetómetro eje Y en LATERALIZQ, motores ON y DESPEGADA 2mm

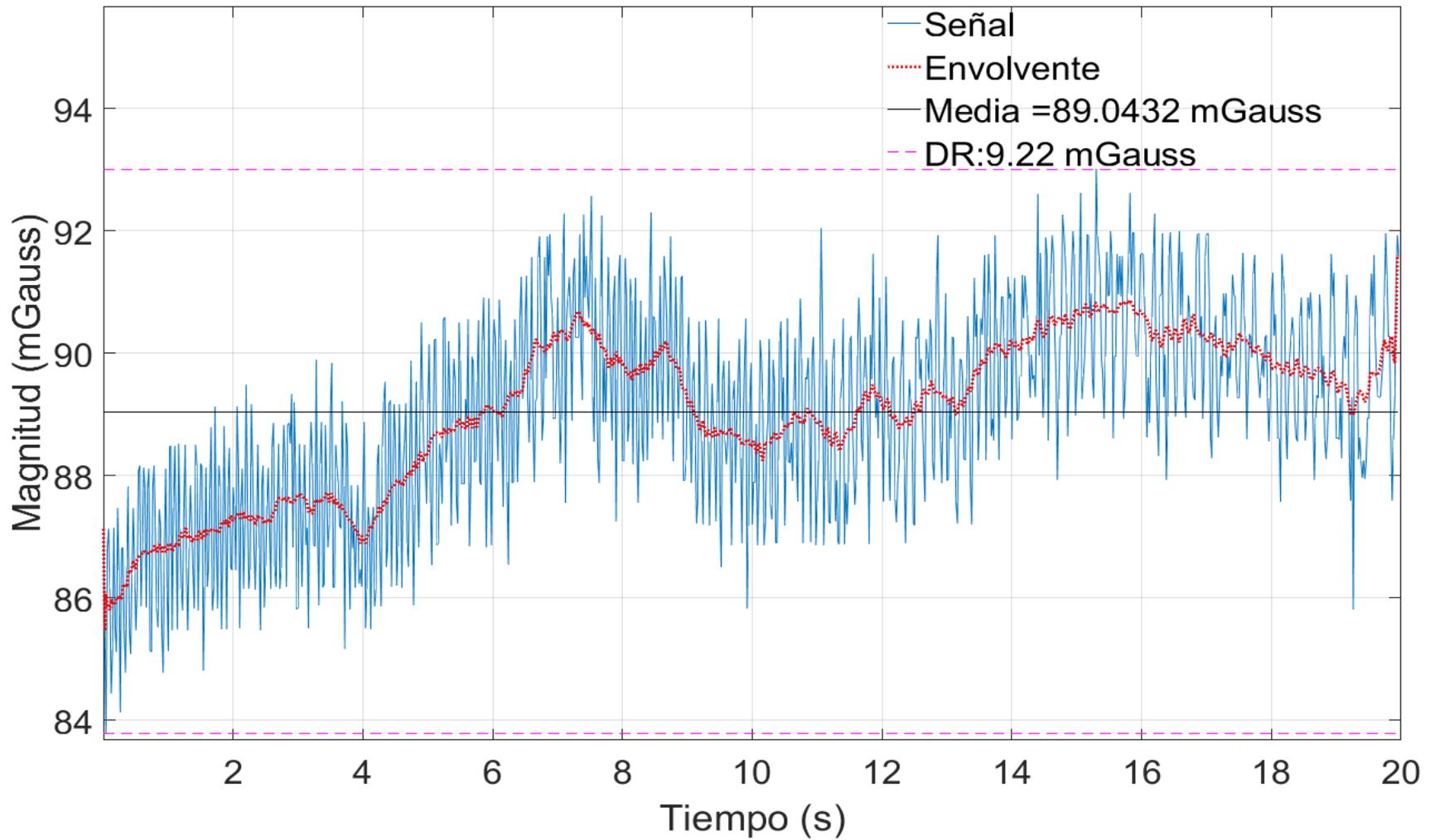


Figura C.13. Medida magnética en eje Y IMU en posición lateral, separada, aislada del viento y motores encendidos

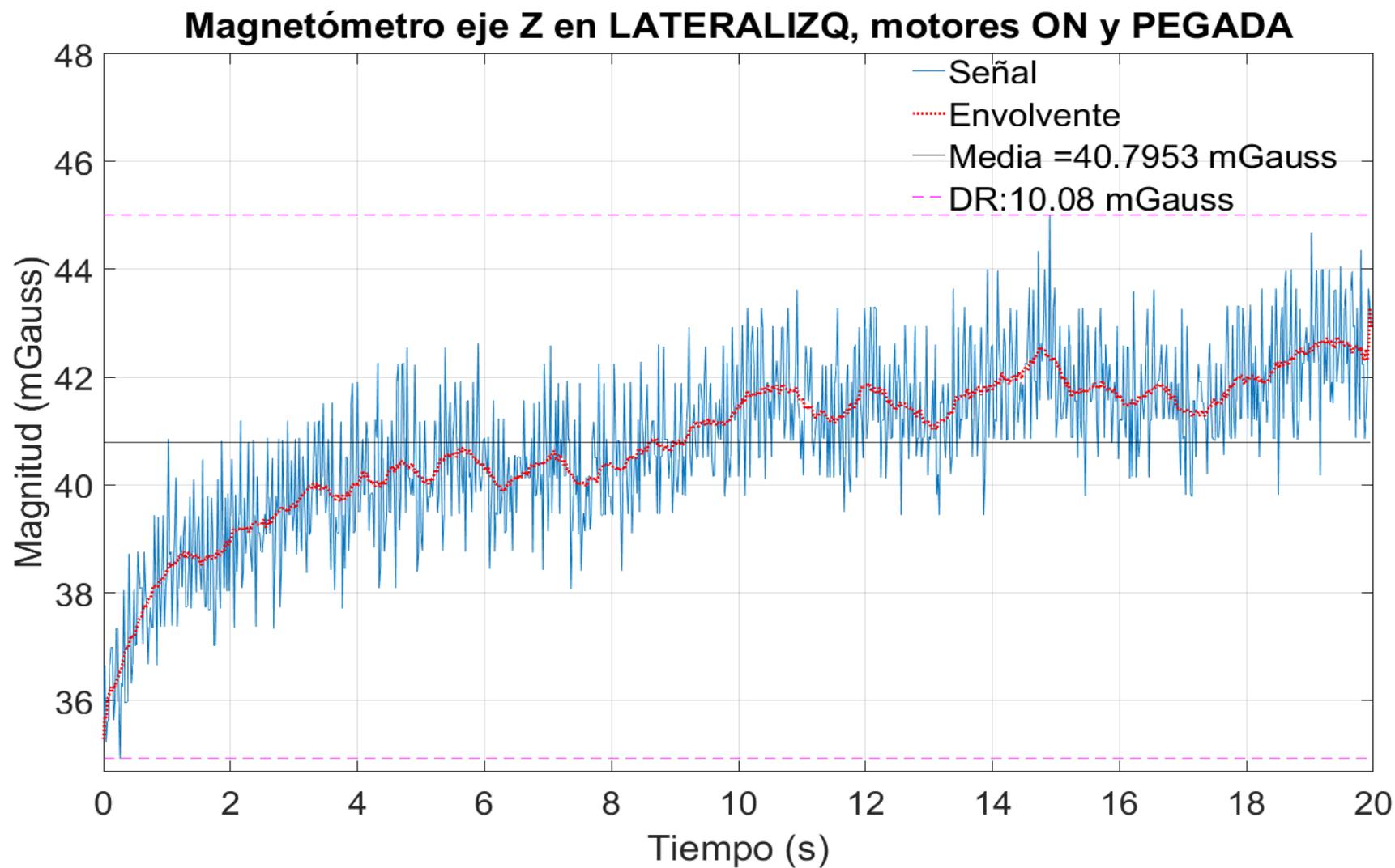


Figura C.14. Medida magnética en eje Z IMU en posición lateral, pegada, aislada del viento y motores encendidos

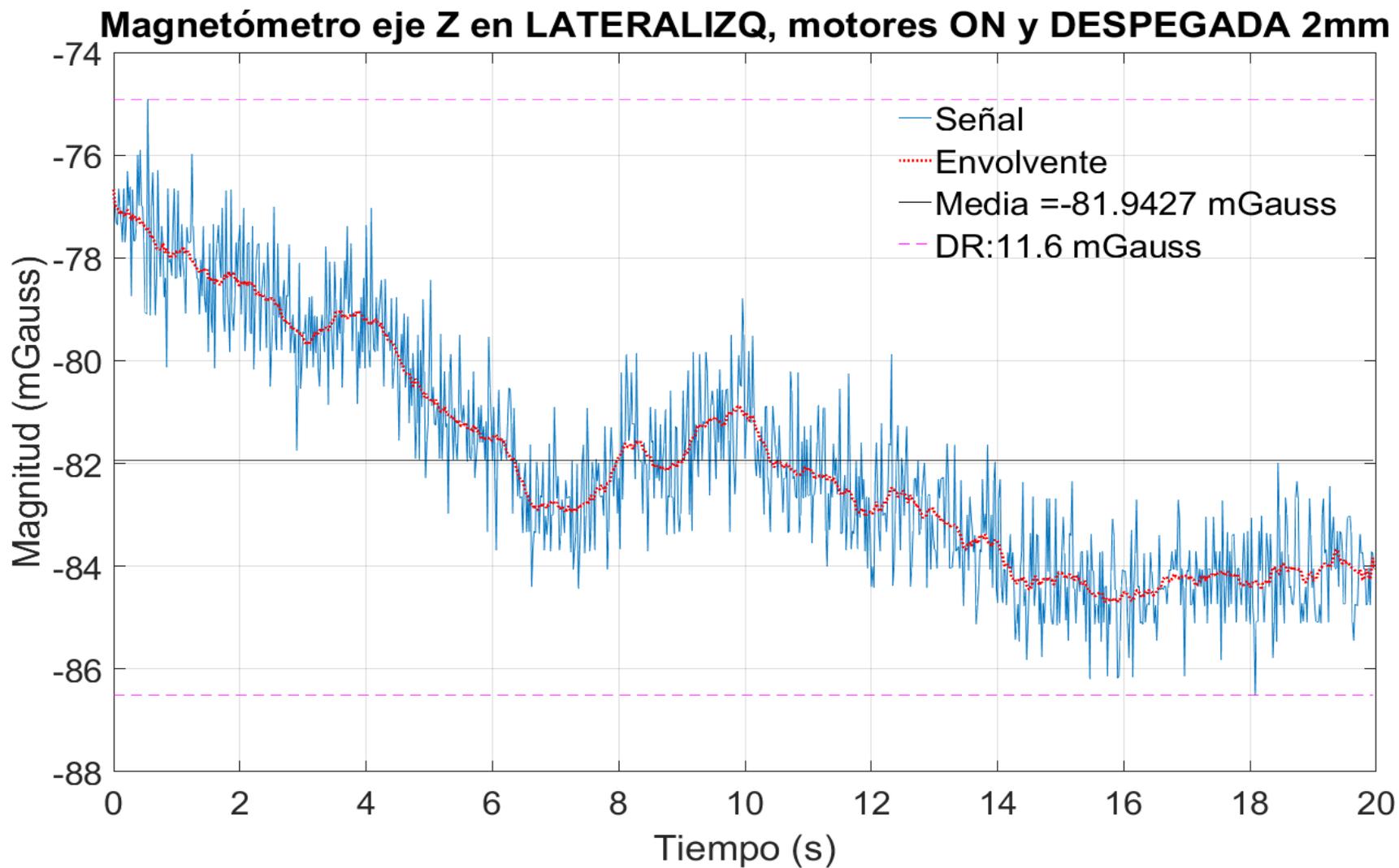


Figura C.15. Medida magnética en eje Z IMU en posición lateral, separada, aislada del viento y motores encendidos

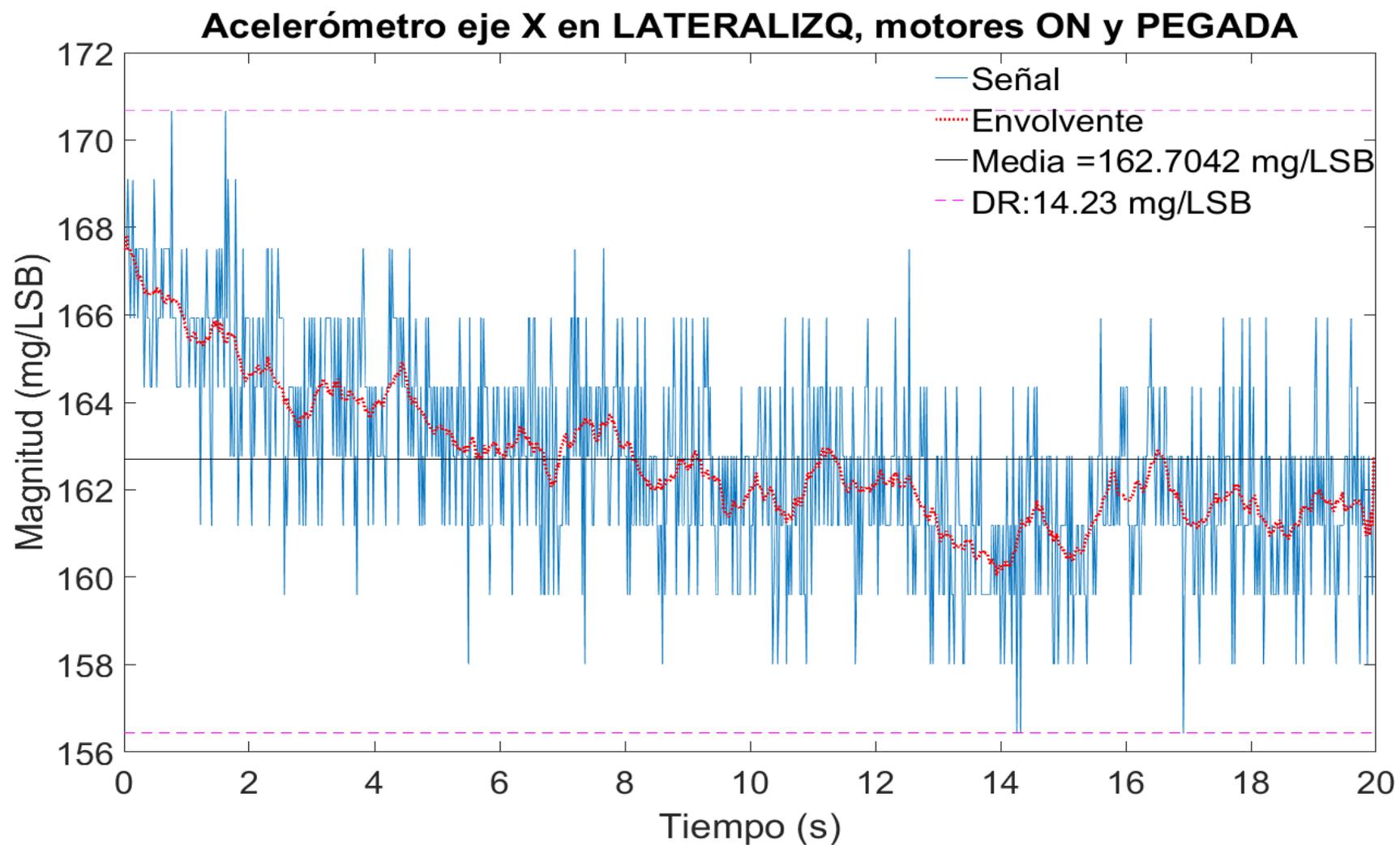


Figura C.16. Medida acelerométrica en eje X con IMU en posición lateral, pegada, aislada del viento y motores encendidos

Acelerómetro eje X en LATERALIZQ, motores ON y SEPARADA 2mm

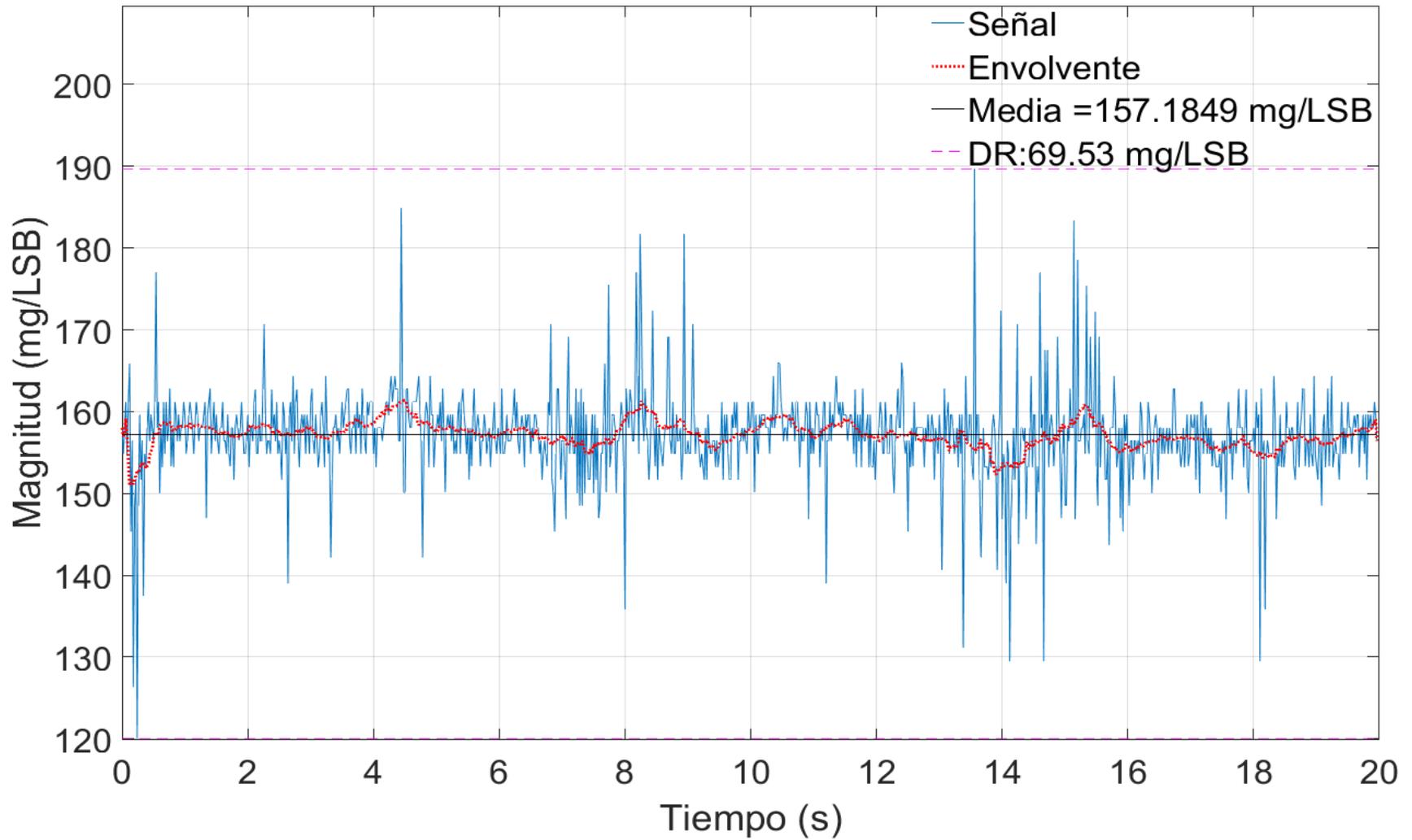


Figura C.17. Medida acelerométrica en eje X con IMU en posición lateral, separada, aislada del viento y motores encendidos

Acelerómetro eje Y en LATERALIZQ, motores ON y PEGADA

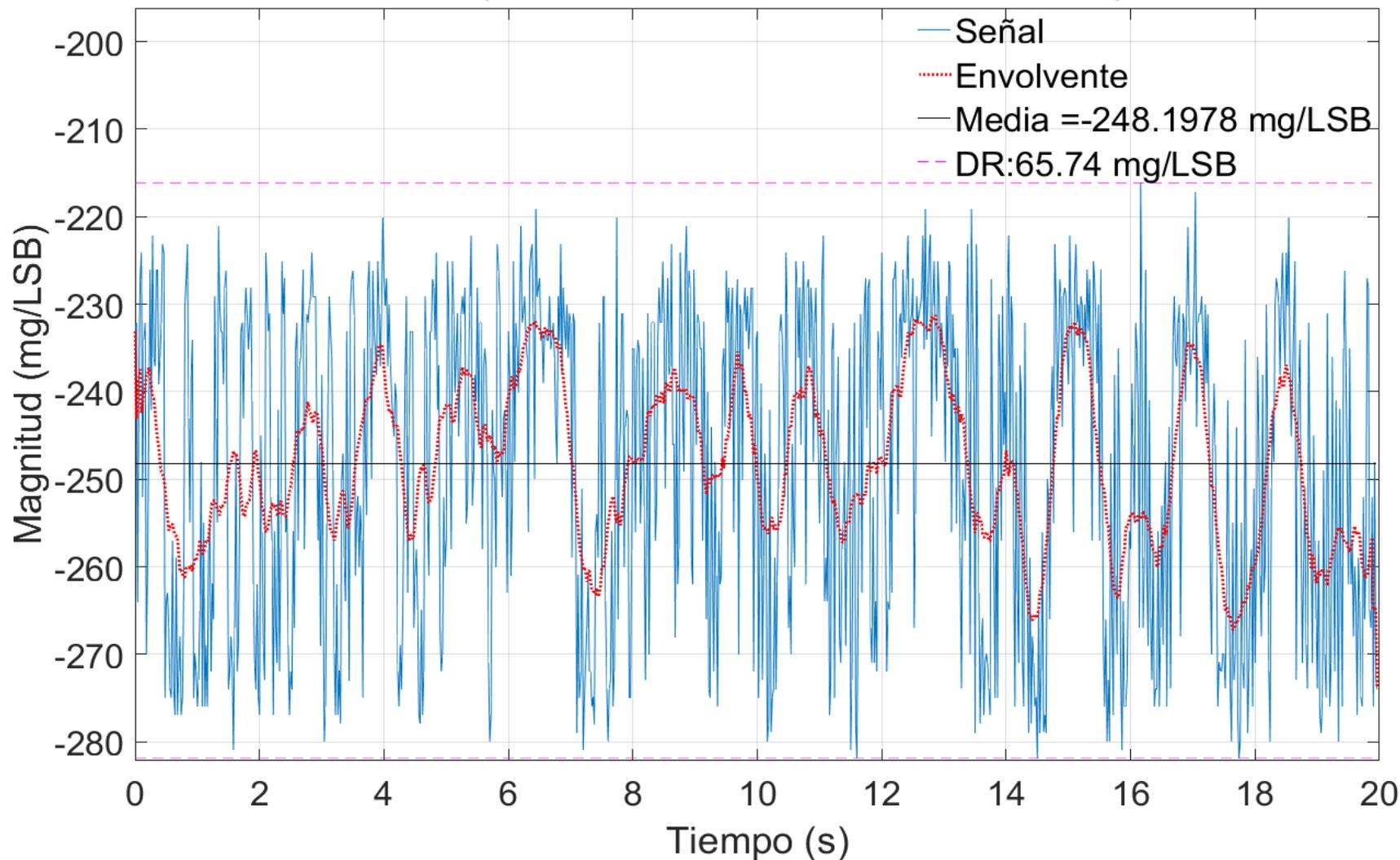


Figura C.18. Medida acelerométrica en eje Y con IMU en posición lateral, pegada, aislada del viento y motores encendidos

Acelerómetro eje Y en LATERALIZQ, motores ON y SEPARADA 2mm

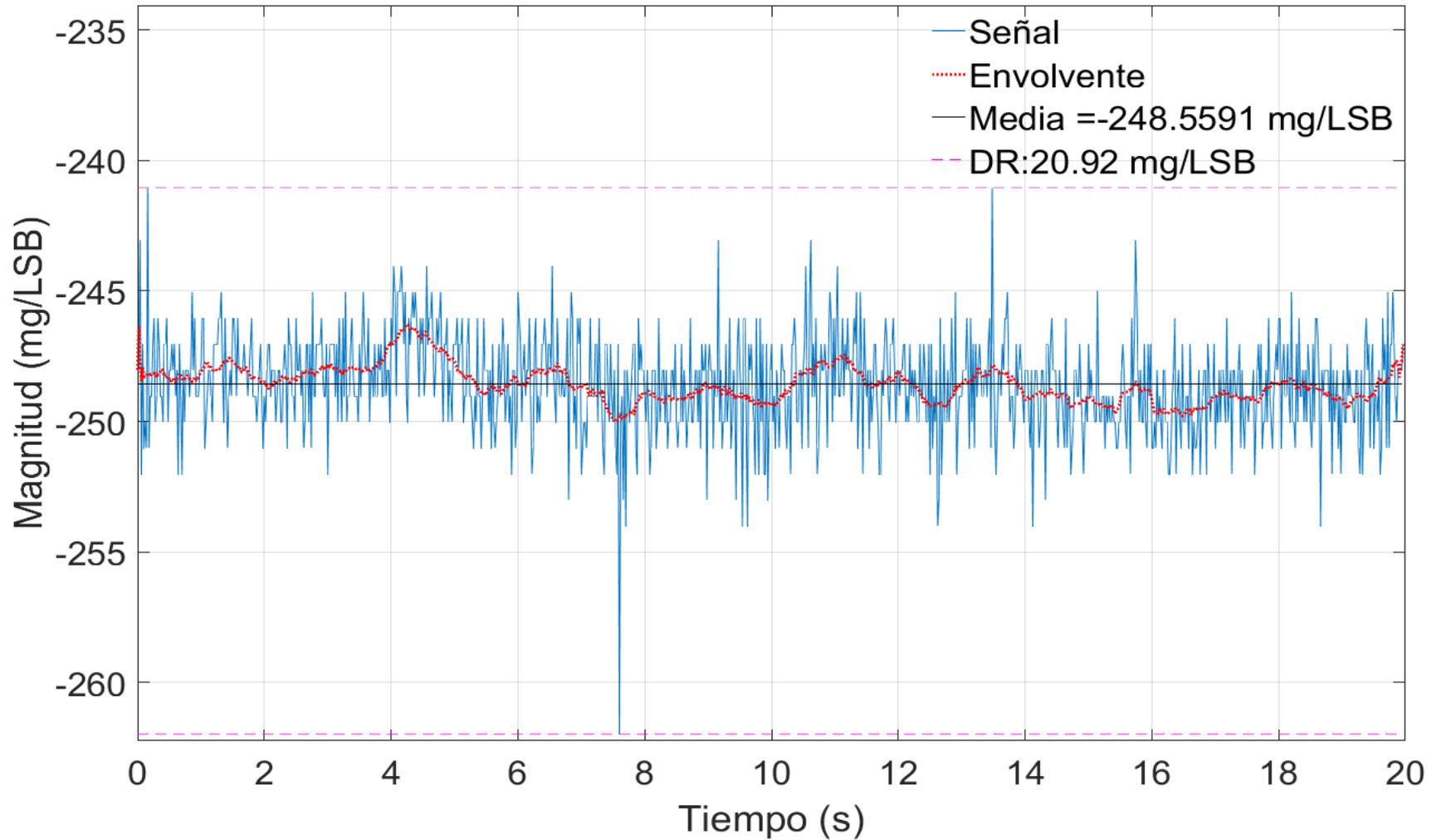


Figura C.19. Medida acelerométrica en eje Y con IMU en posición lateral, separada, aislada del viento y motores encendidos

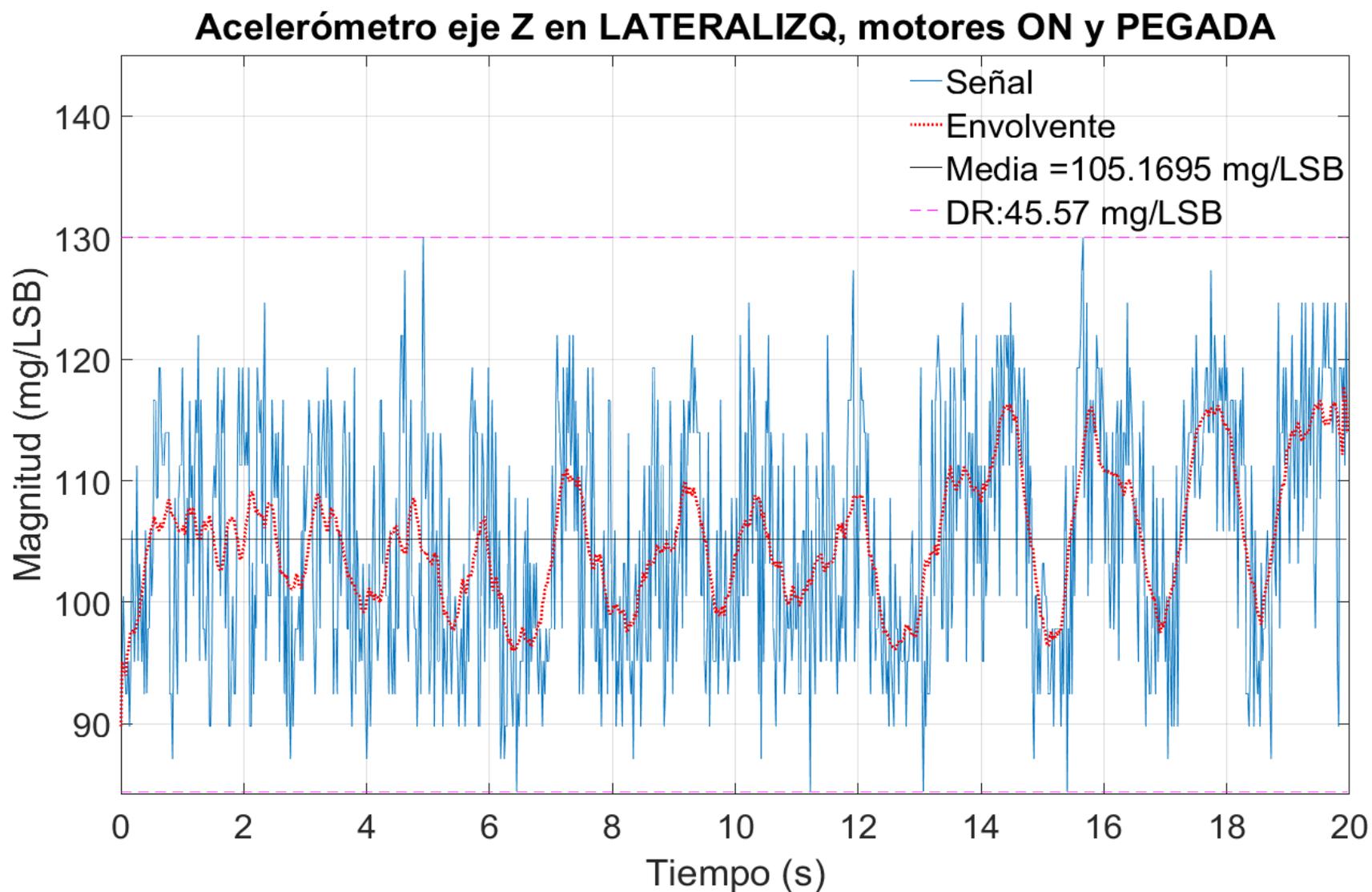


Figura C.20. Medida acelerométrica en eje Z con IMU en posición lateral, pegada, aislada del viento y motores encendidos

Acelerómetro eje Z, motores ON y SEPARADA 2mm

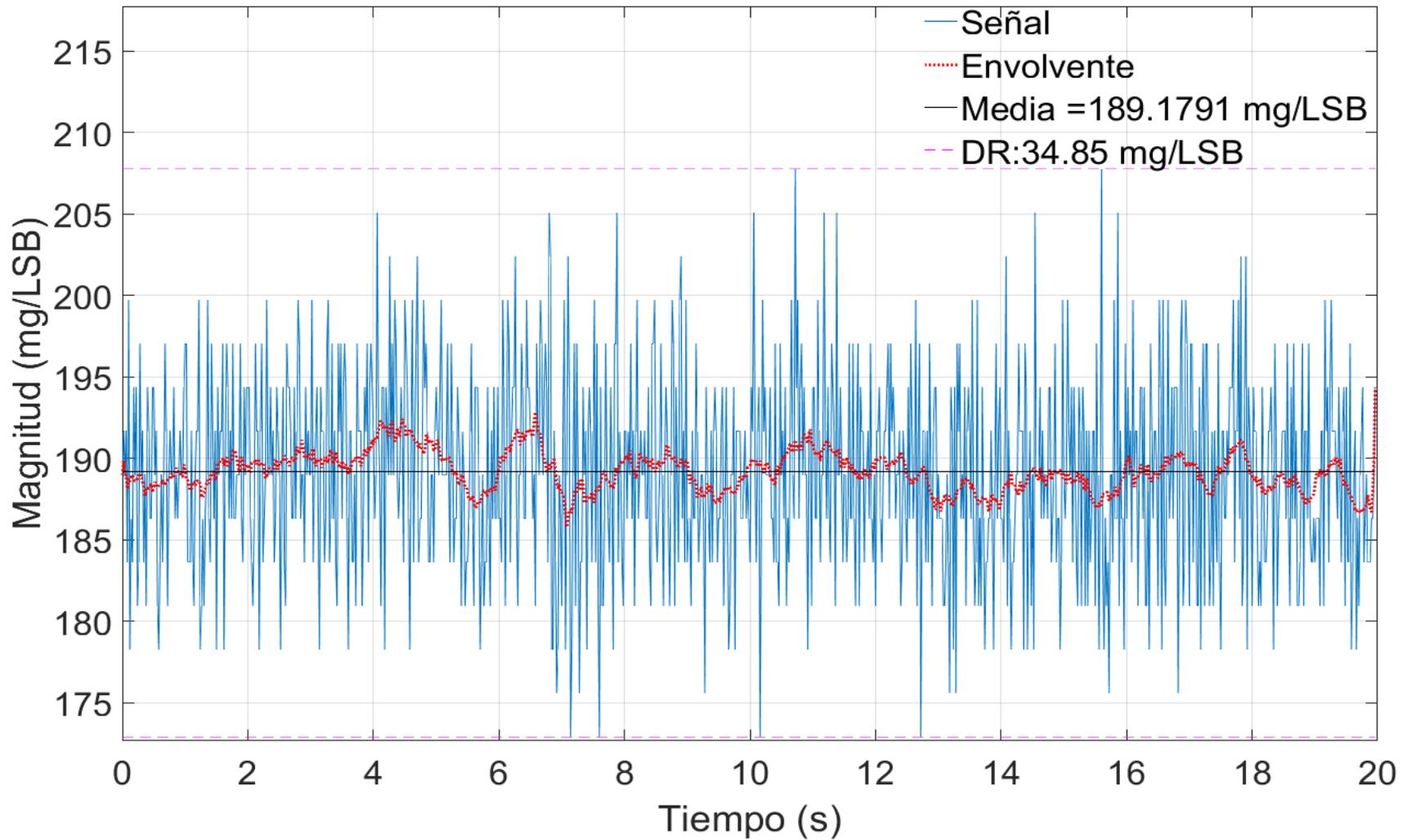


Figura C.21. Medida acelerométrica en eje Z con IMU en posición lateral, separada, aislada del viento y motores encendidos

Gyrómetro eje X en LATERALIZQ, motores ON y PEGADA

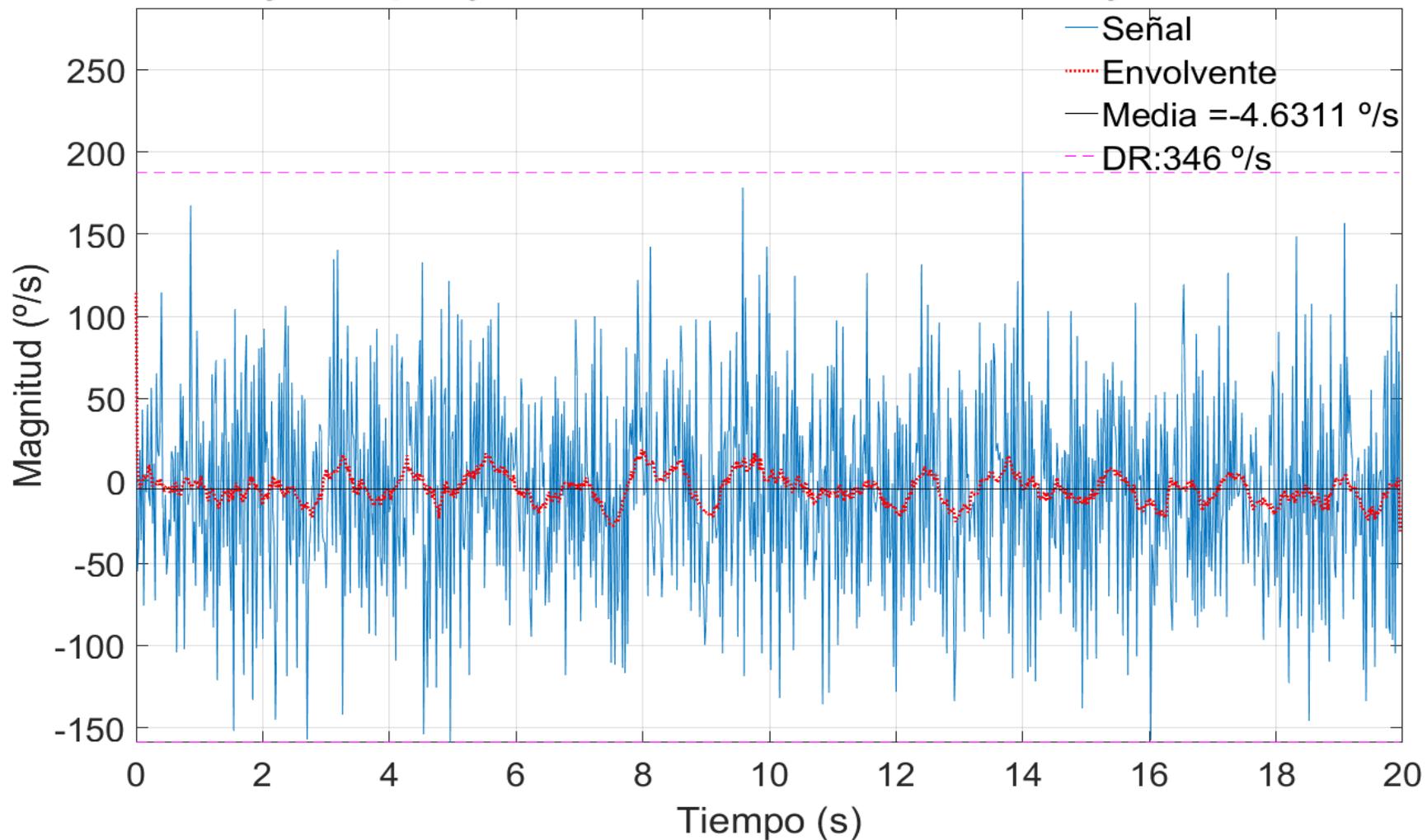


Figura C.22. Medida giroscópica en eje X con IMU en posición lateral, pegada, aislada del viento y motores encendidos

Gyrómetro eje X en LATERALIZQ, motores ON y SEPARADA 2mm

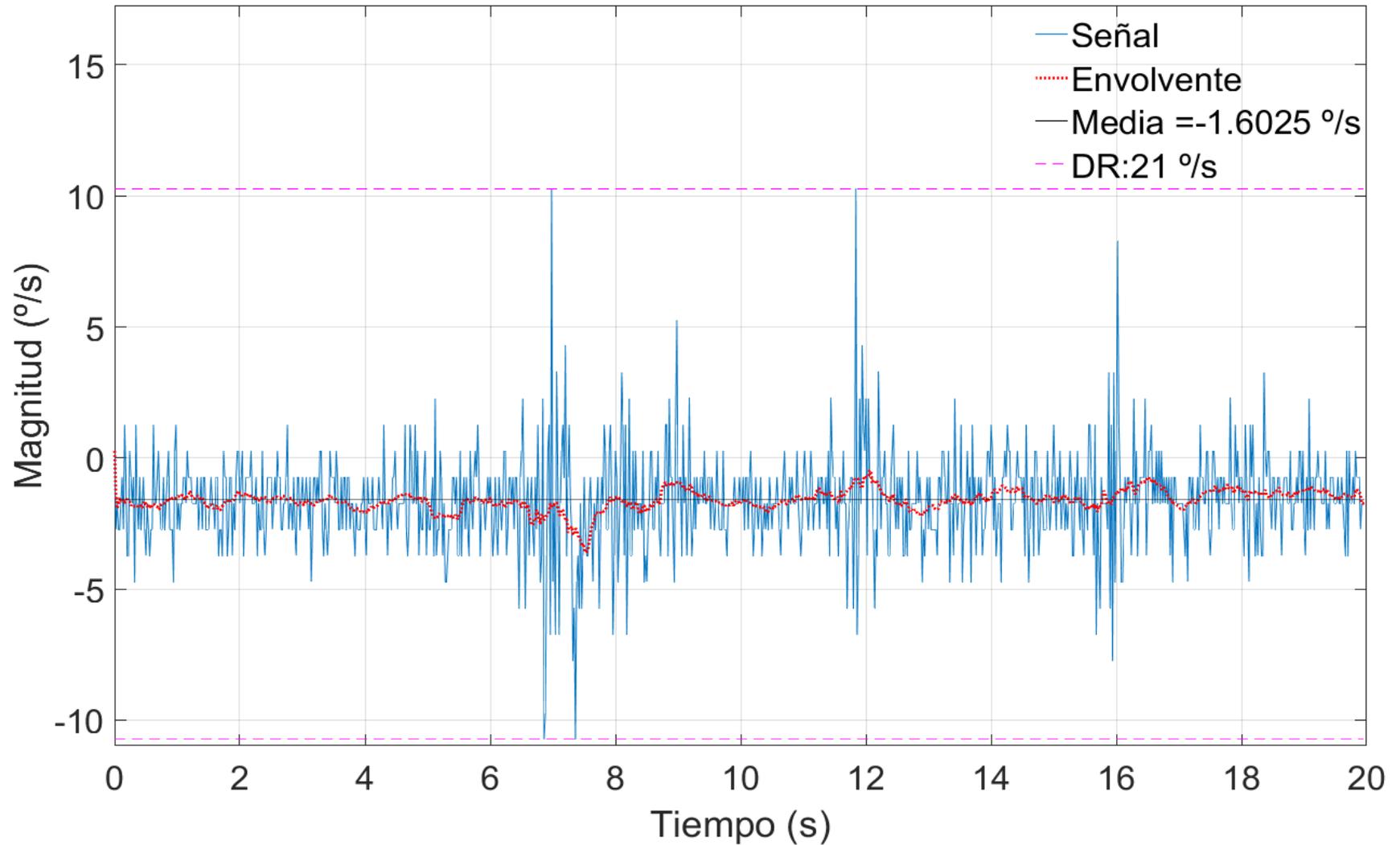


Figura C.23. Medida giroscópica en eje X con IMU en posición lateral, separada, aislada del viento y motores encendidos

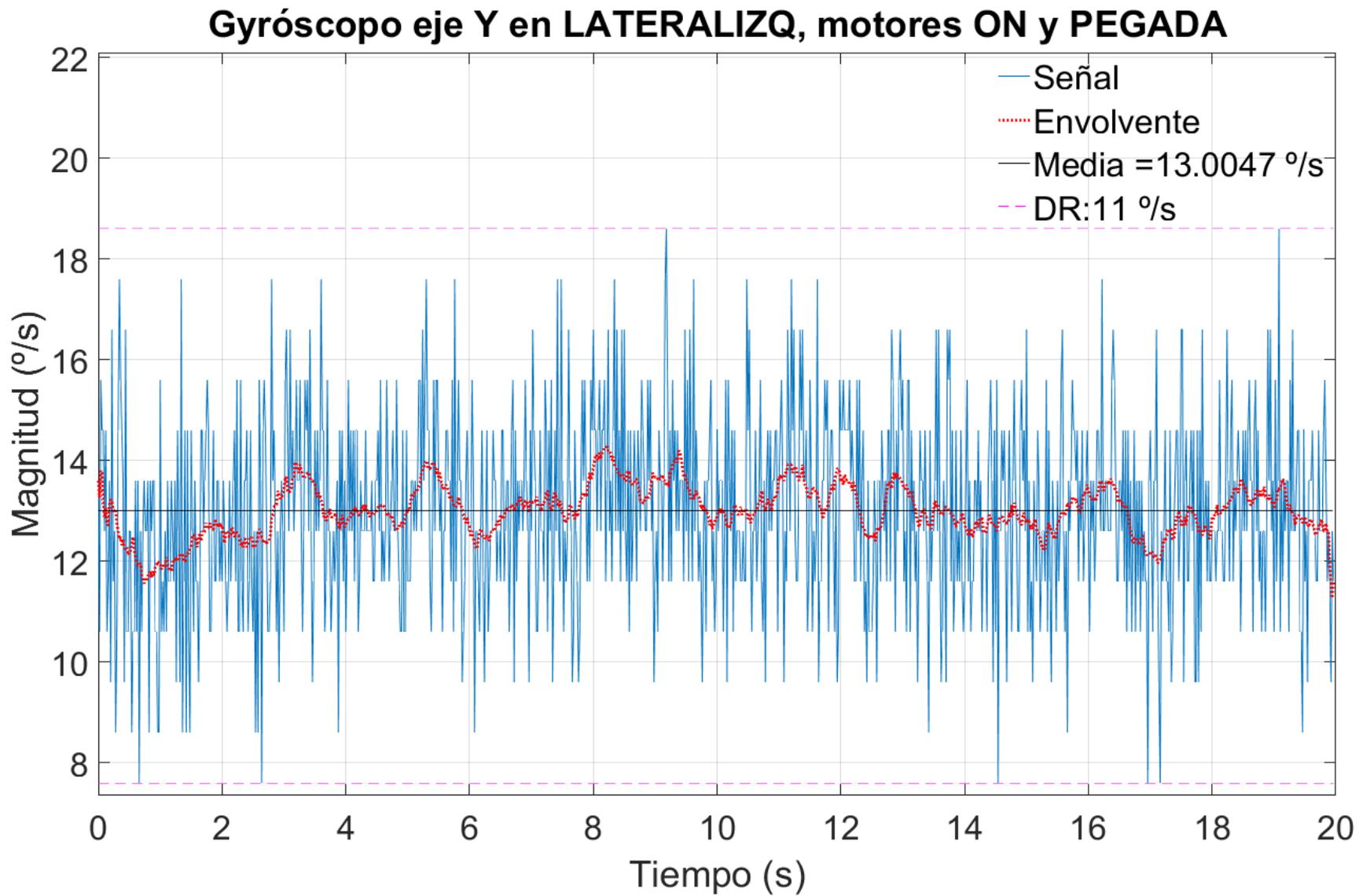


Figura C.24. Medida giroscópica en eje Y con IMU en posición lateral, pegada, aislada del viento y motores encendidos

Gyrómetro eje Y en LATERALIZQ, motores ON y SEPARADA 2mm

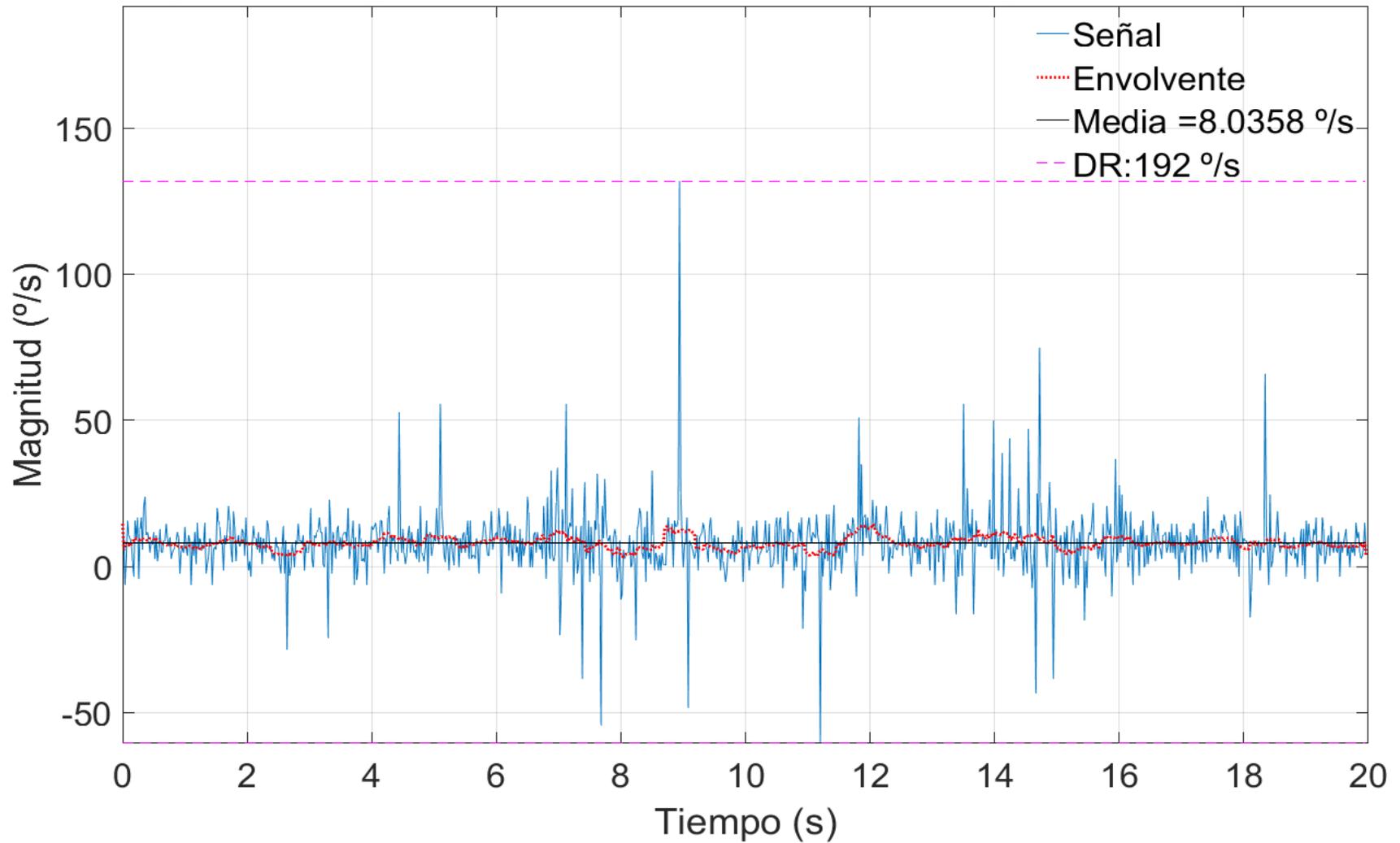


Figura C.25. Medida giroscópica en eje Y con IMU en posición lateral, separada, aislada del viento y motores encendidos

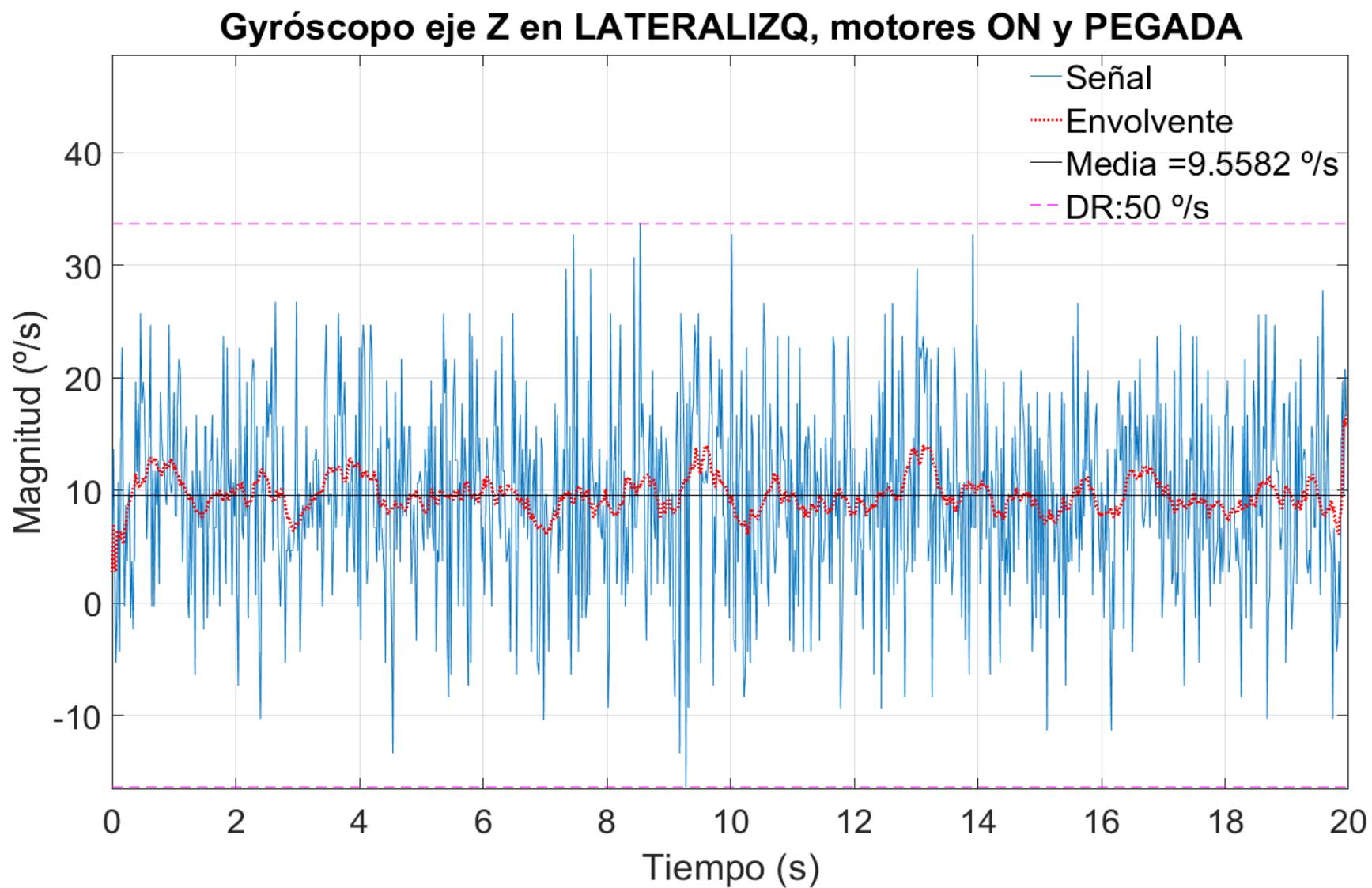


Figura C.26. Medida giroscópica en eje Z con IMU en posición lateral, pegada, aislada del viento y motores encendidos

Gyrómetro eje Z en LATERALIZQ, , motores ON y SEPARADA 2mm

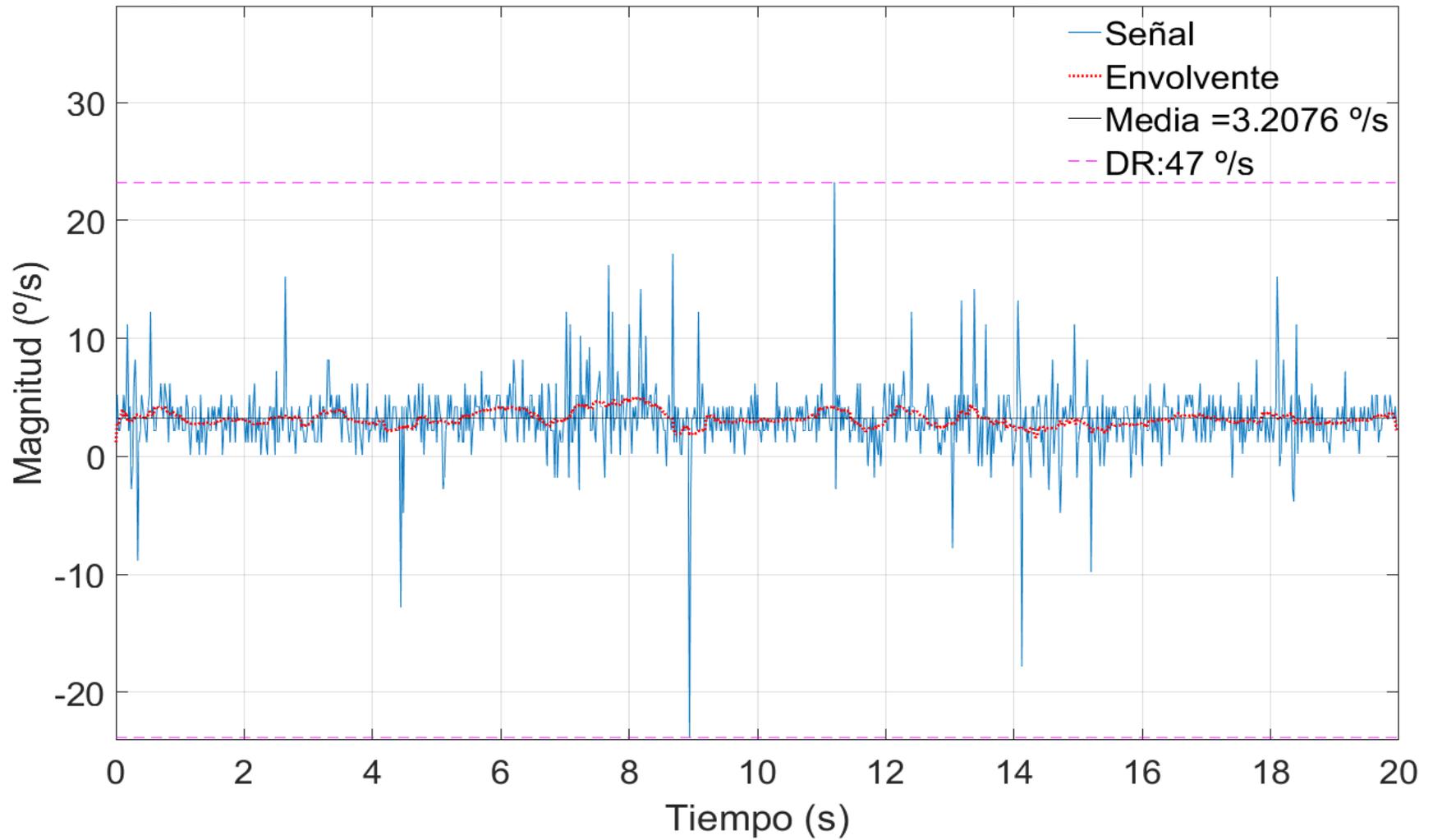


Figura C.27. Medida giroscópica en eje Z con IMU en posición lateral, separada, aislada del viento y motores encendidos

Acelerómetro eje X en FRONTAL, motores OFF

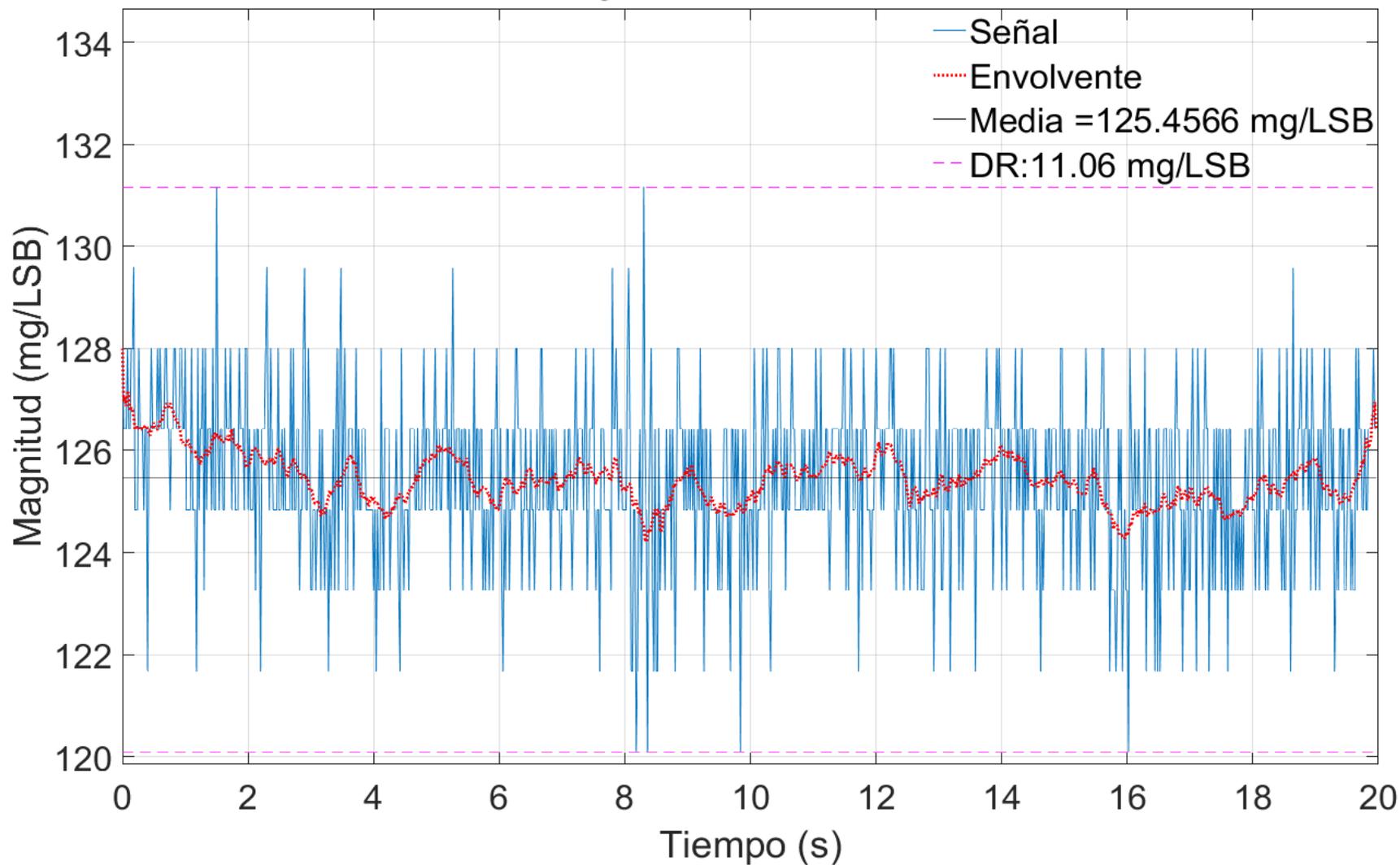


Figura C.28. Medida acelerométrica en eje X con IMU en posición frontal, aislada del viento y motores apagados

Acelerómetro eje X en FRONTAL, motores ON

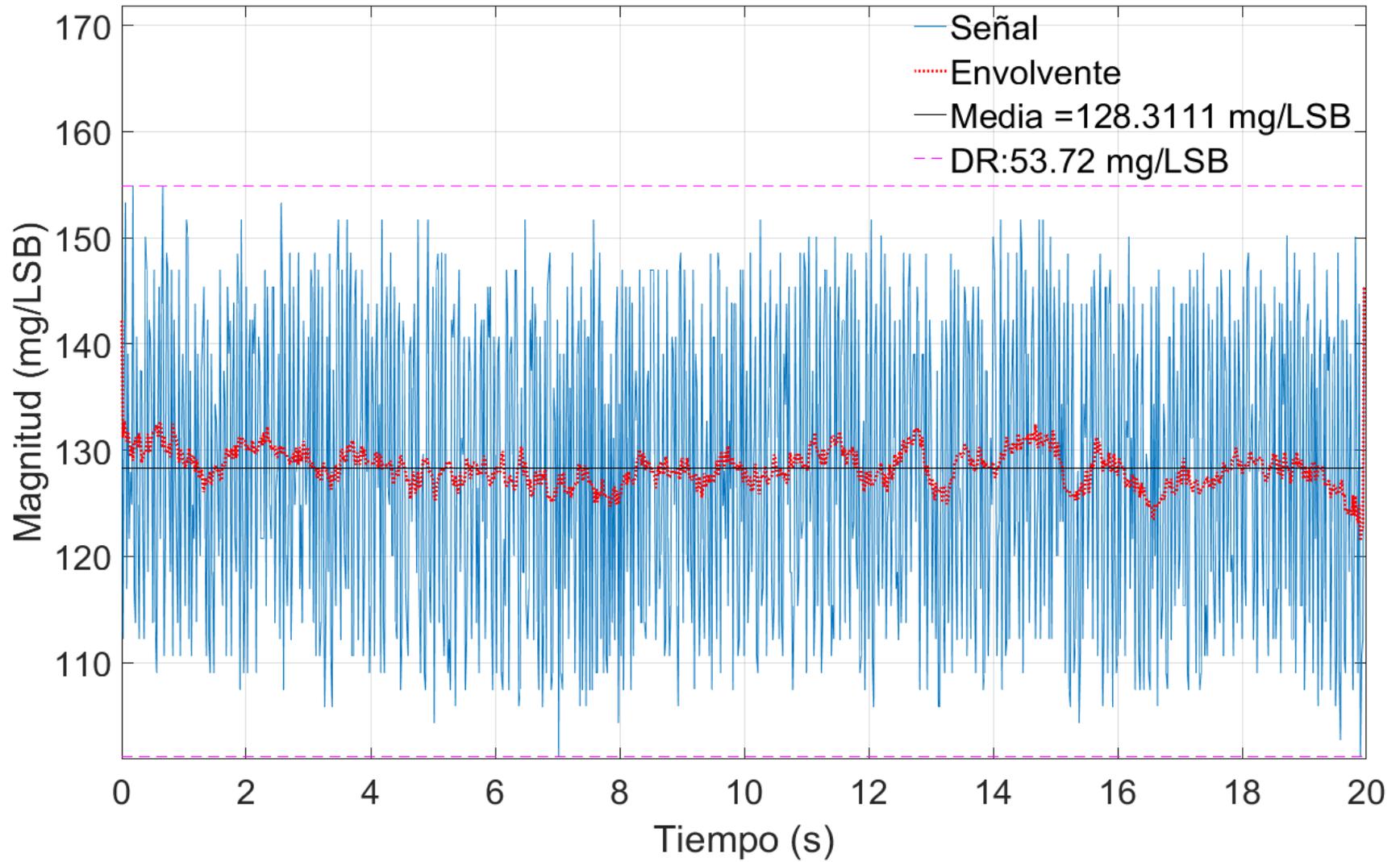


Figura C.29. Medida acelerométrica en eje X con IMU en posición frontal, aislada del viento y motores encendidos

Acelerómetro eje Y en FRONTAL, motores OFF

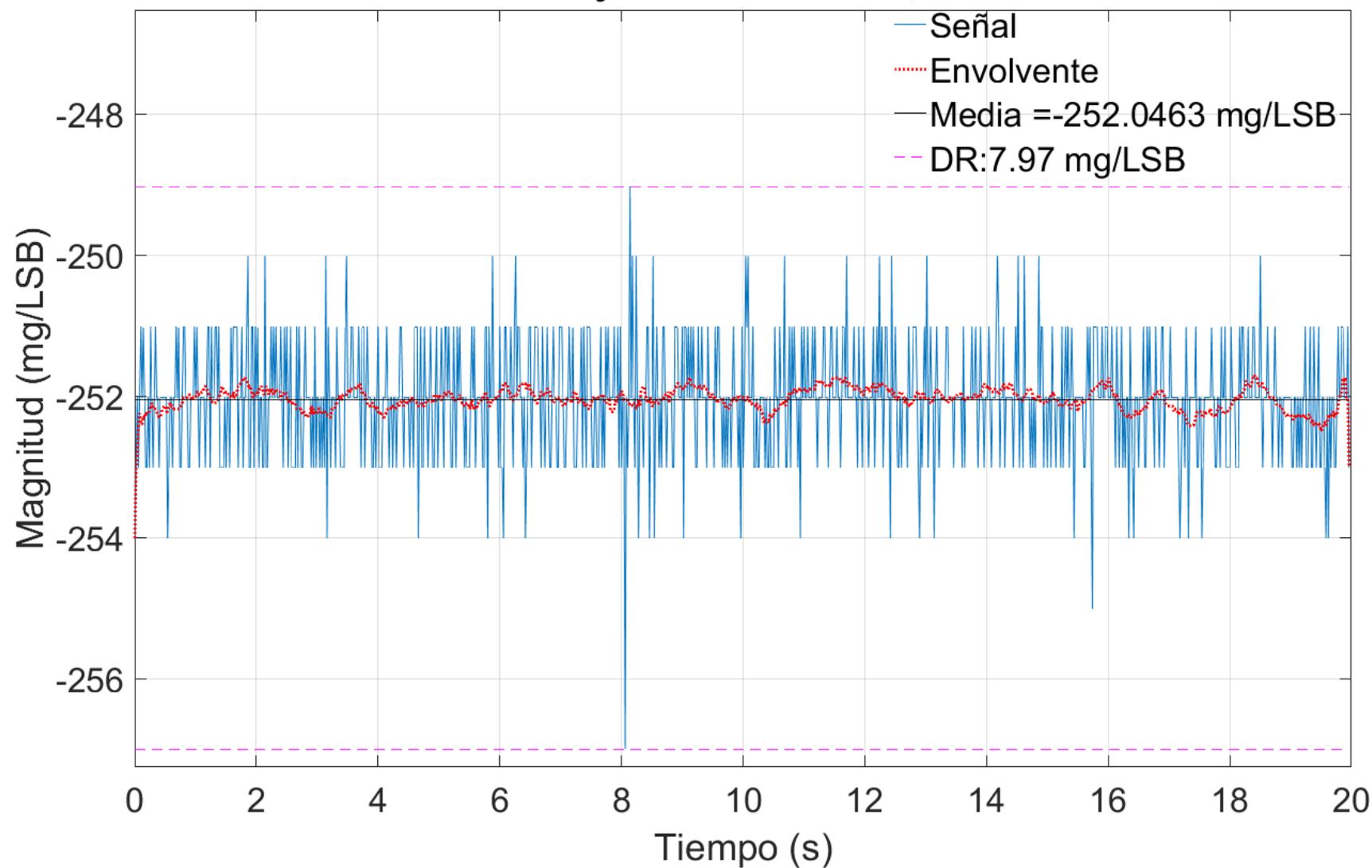


Figura C.30. Medida acelerométrica en eje Y con IMU en posición frontal, aislada del viento y motores apagados

Acelerómetro eje Y en FRONTAL, motores ON

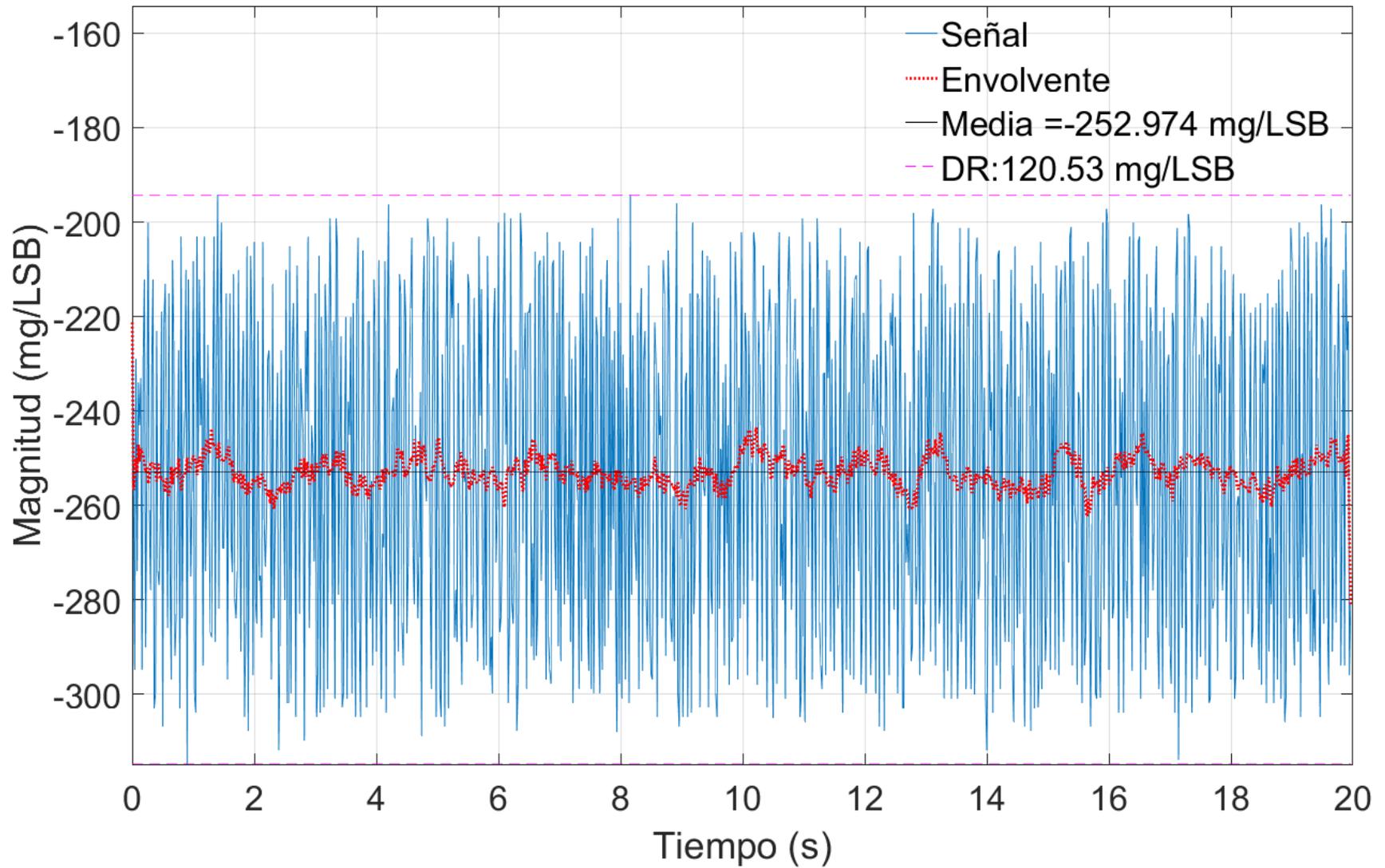


Figura C.31. Medida acelerométrica en eje Y con IMU en posición frontal, aislada del viento y motores encendidos

Acelerómetro eje Z en FRONTAL, motores OFF

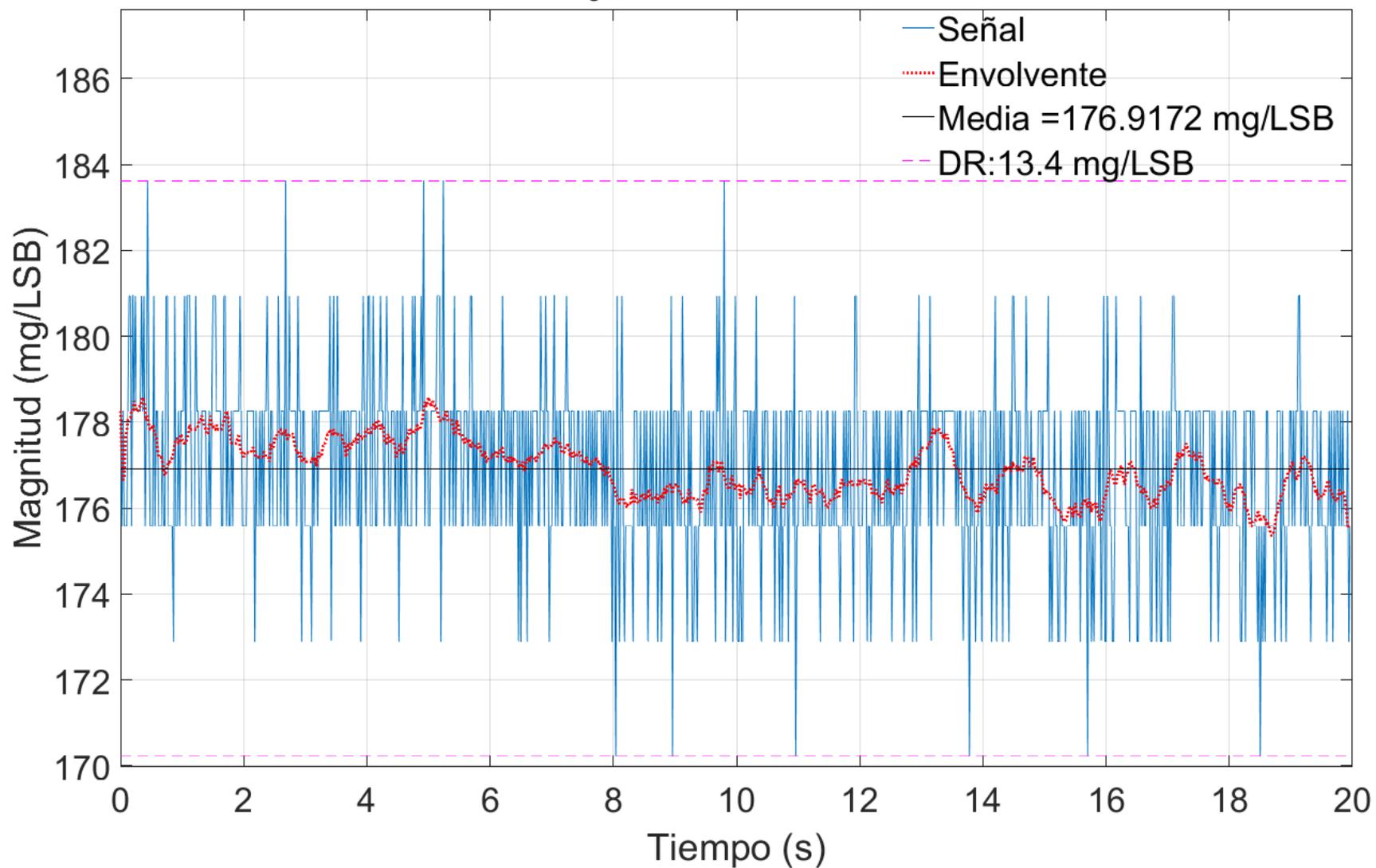


Figura C.32. Medida acelerométrica en eje Z con IMU en posición frontal, aislada del viento y motores apagados

Acelerómetro eje Z en FRONTAL, motores ON

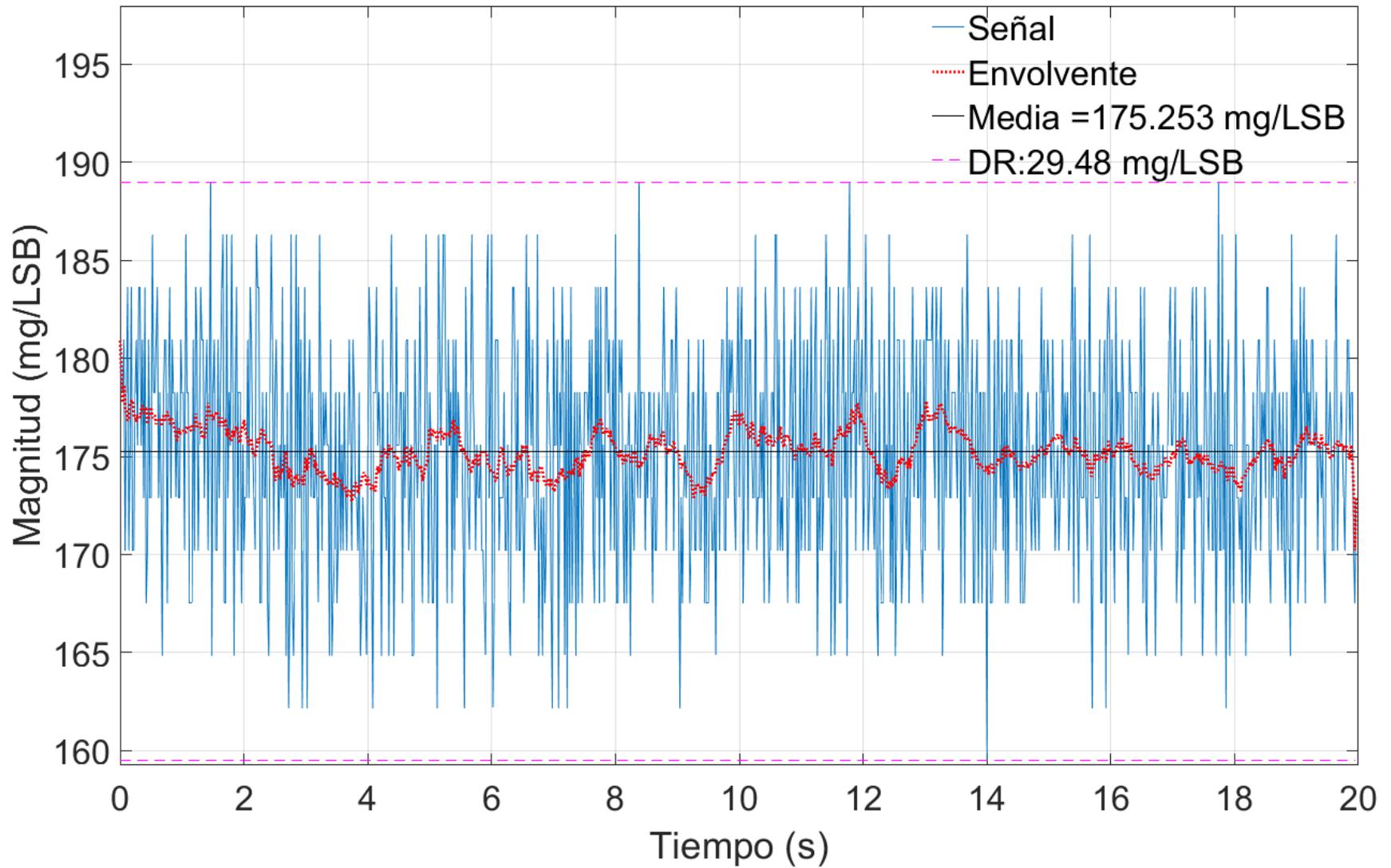


Figura C.33. Medida acelerométrica en eje Z con IMU en posición frontal, aislada del viento y motores encendidos

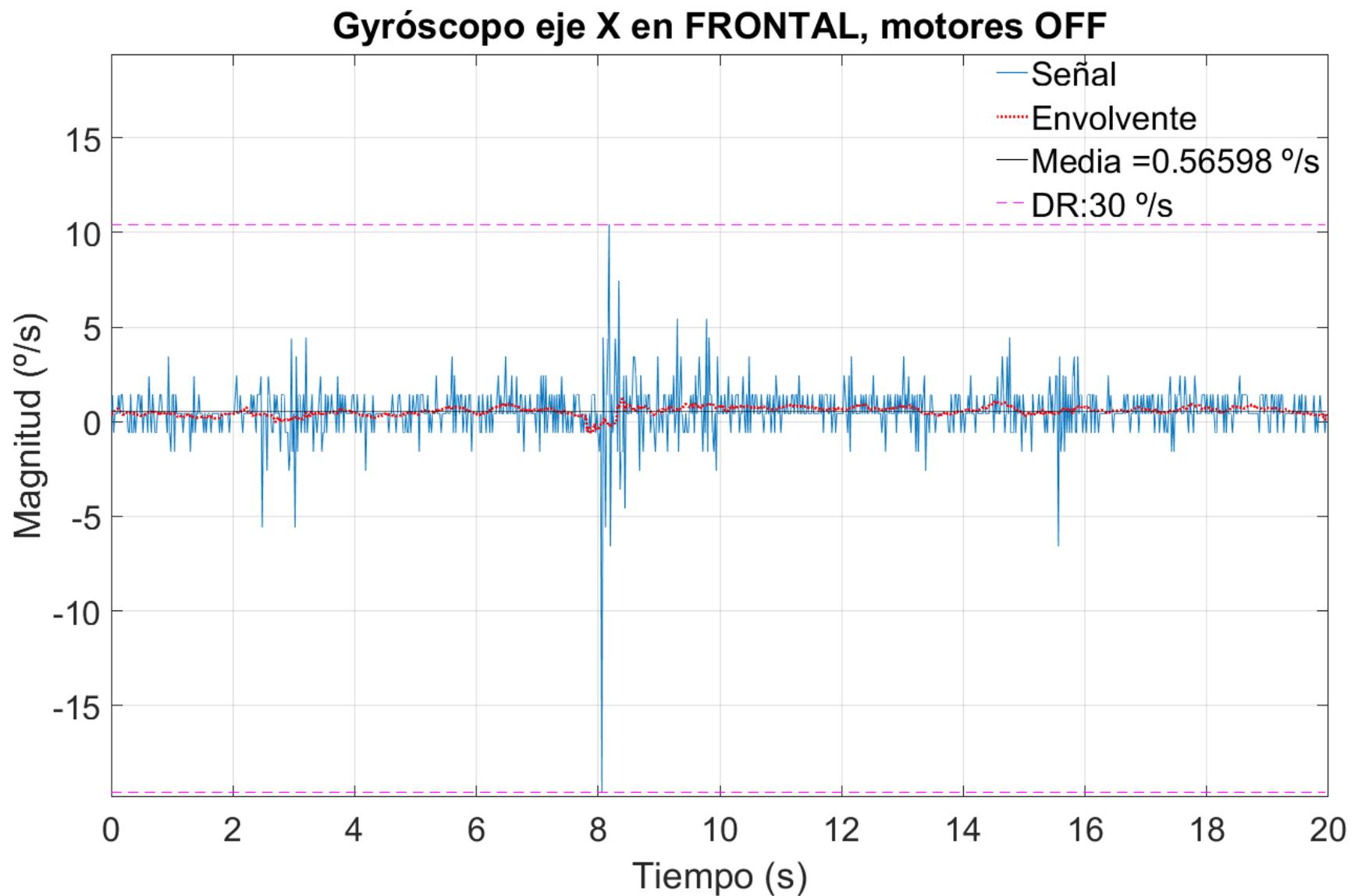


Figura C.34. Medida giroscópica en eje X con IMU en posición frontal, aislada del viento y motores apagados

Gyrómetro eje X en FRONTAL, motores ON

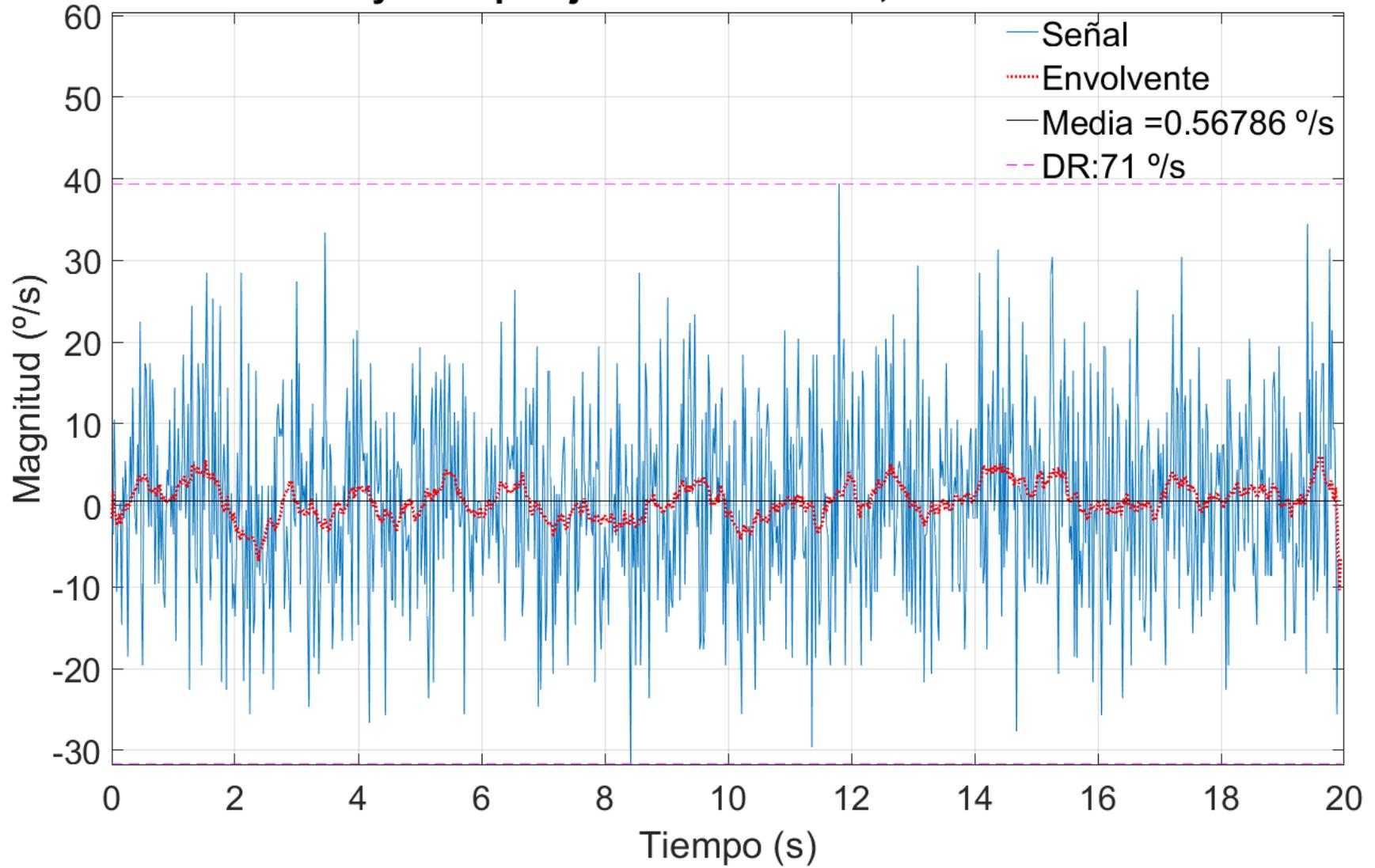


Figura C.35. Medida giroscópica en eje X con IMU en posición frontal, aislada del viento y motores encendidos

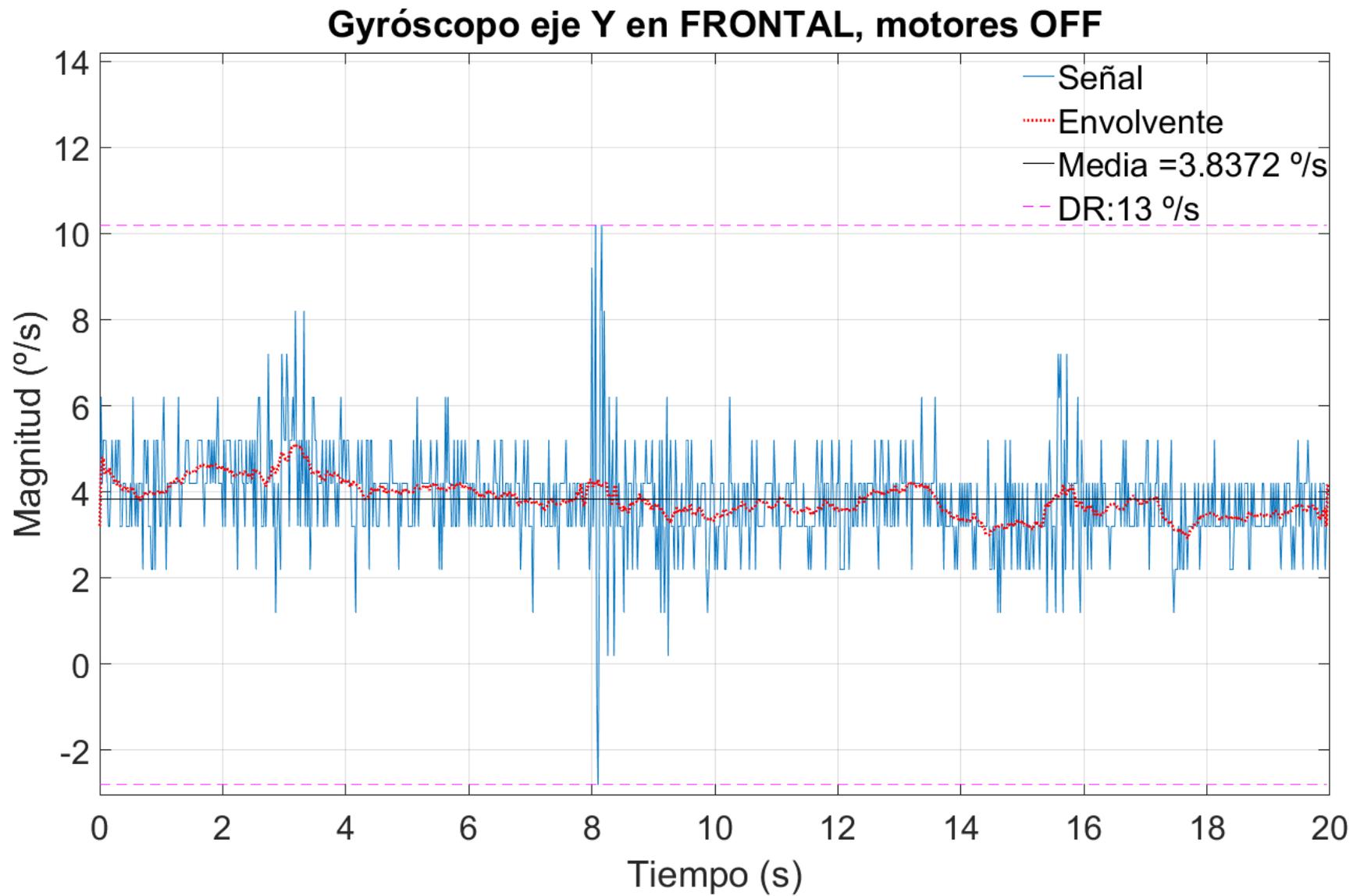


Figura C.36. Medida giroscópica en eje Y con IMU en posición frontal, aislada del viento y motores apagados

Gyrómetro eje Y en FRONTAL, motores ON

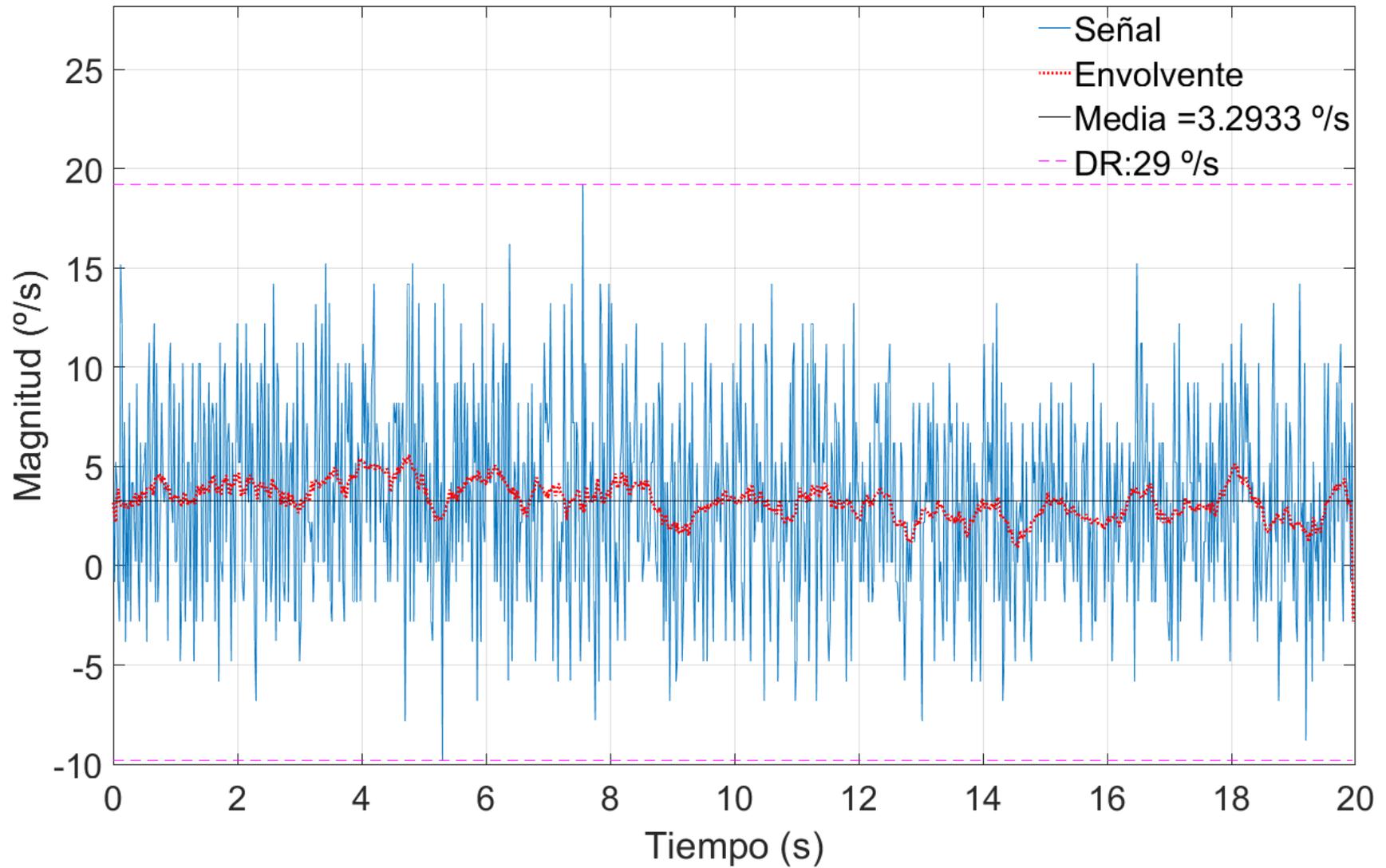


Figura C.37. Medida giroscópica en eje Y con IMU en posición frontal, aislada del viento y motores encendidos

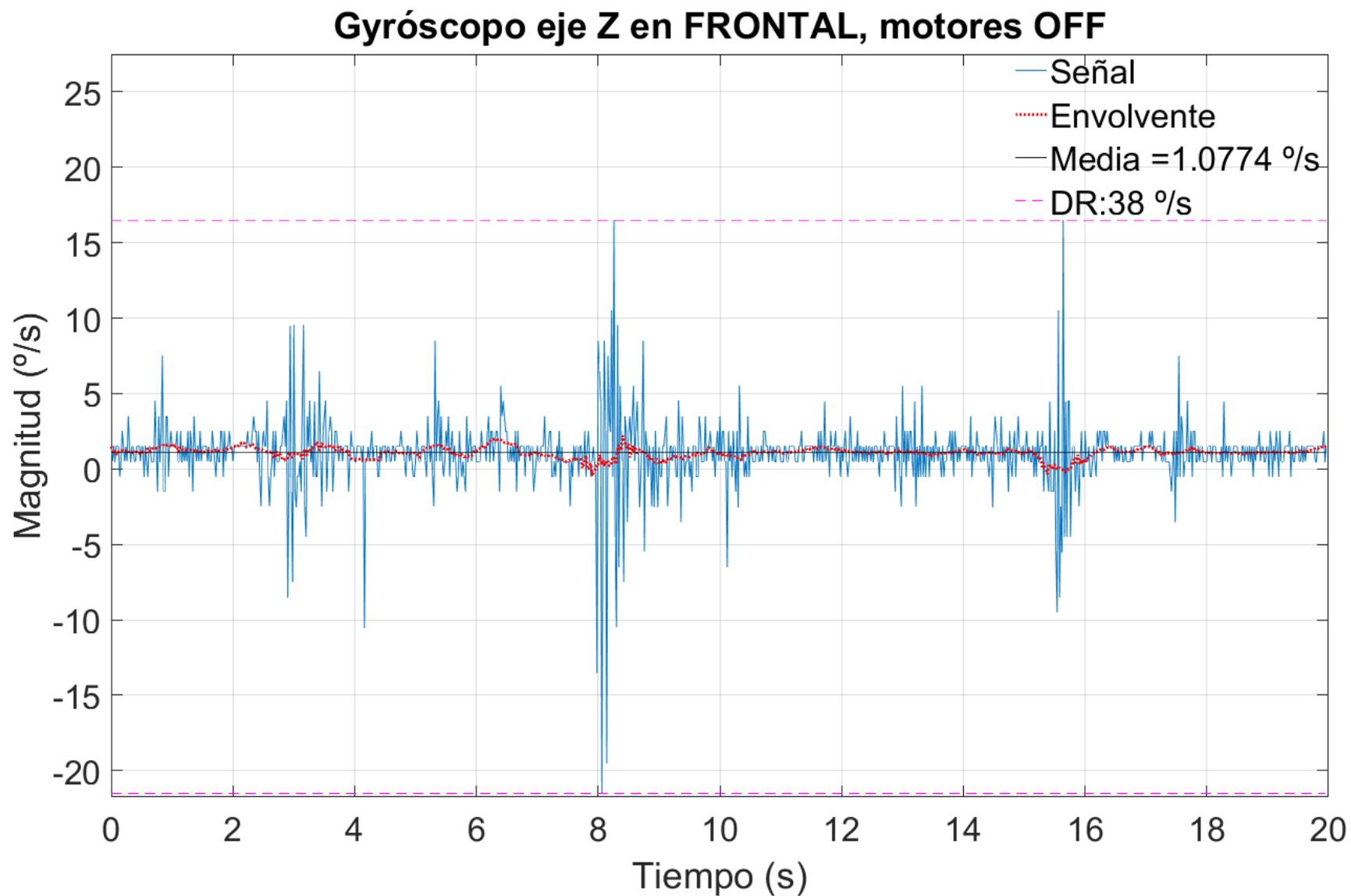


Figura C.38. Medida giroscópica en eje Z con IMU en posición frontal, aislada del viento y motores apagados

Gyrómetro eje Z en FRONTAL, motores ON

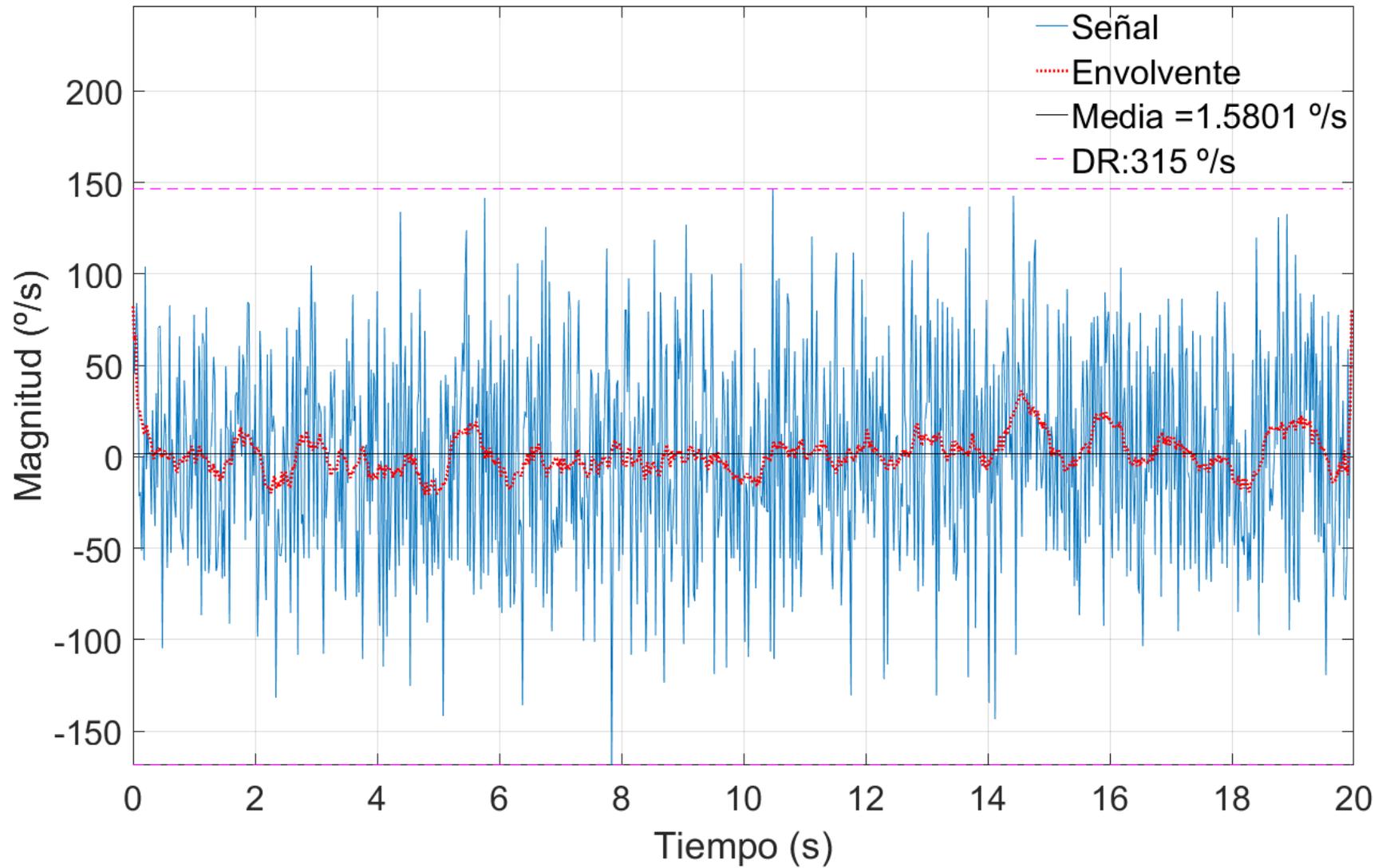


Figura C.39. Medida giroscópica en eje Z con IMU en posición frontal, aislada del viento y motores encendidos

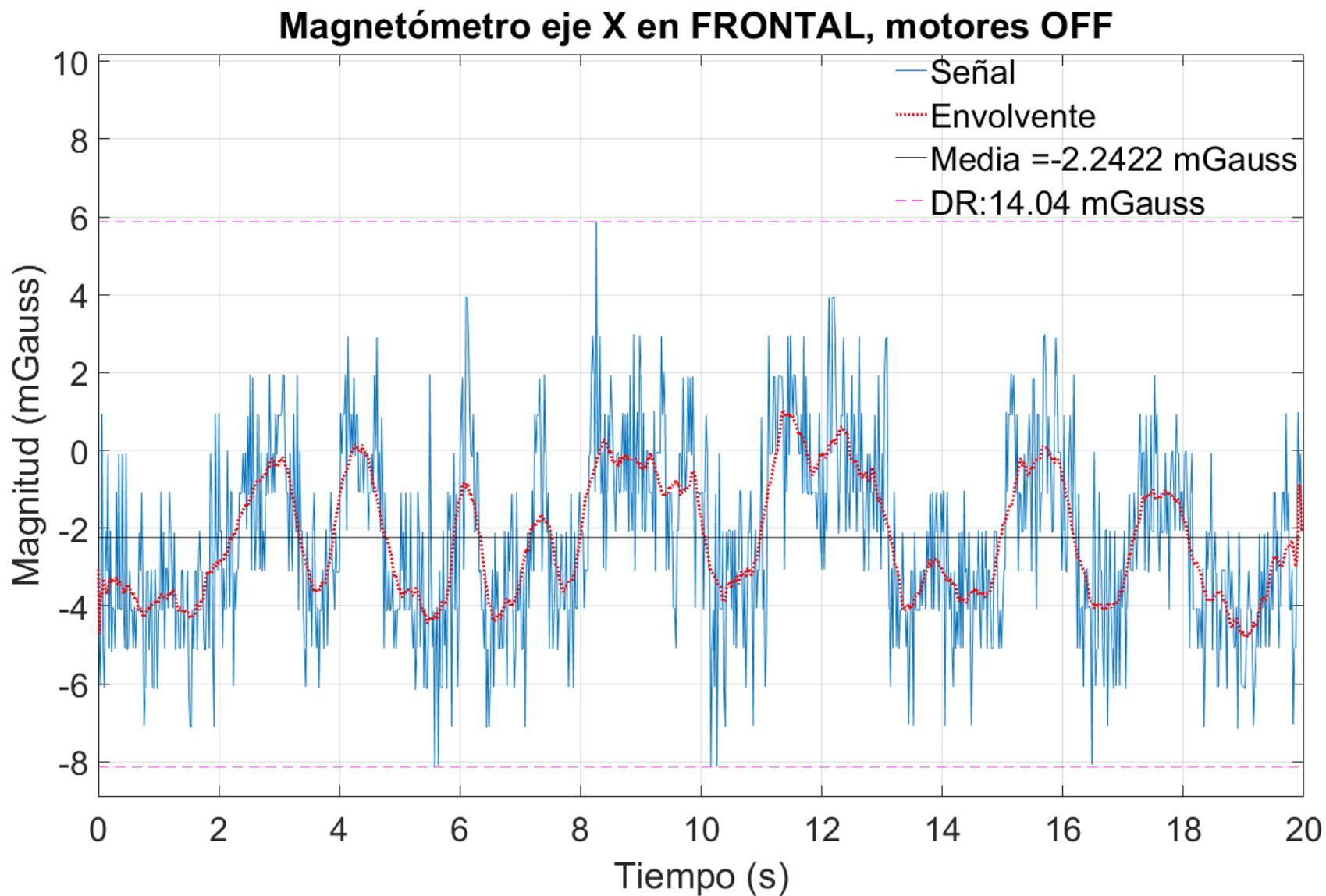


Figura C.40. Medida magnética en eje X con IMU en posición frontal, aislada del viento y motores apagados

Magnetómetro eje X en FRONTAL, motores ON

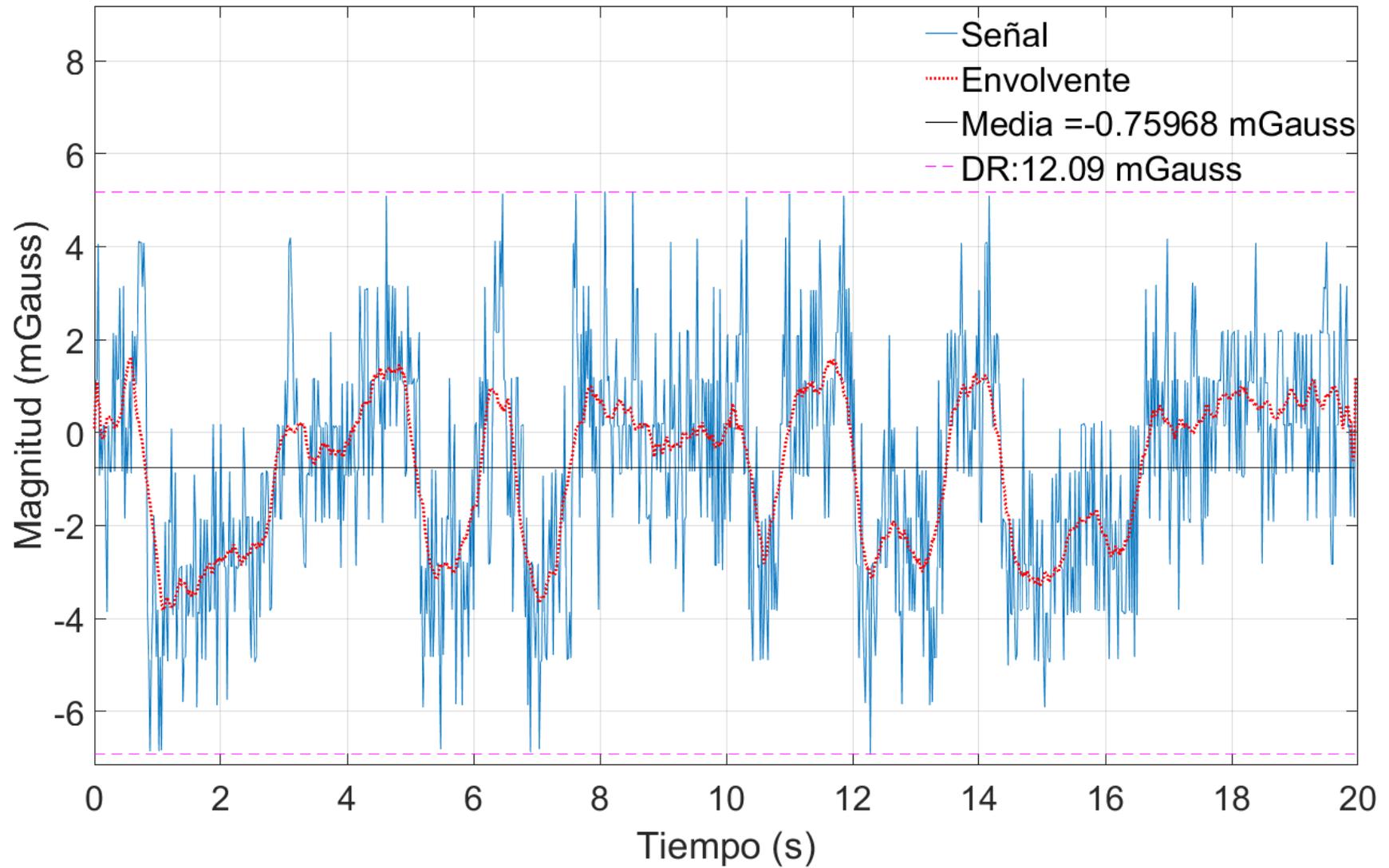


Figura C.41. Medida magnética en eje X con IMU en posición frontal, aislada del viento y motores encendidos

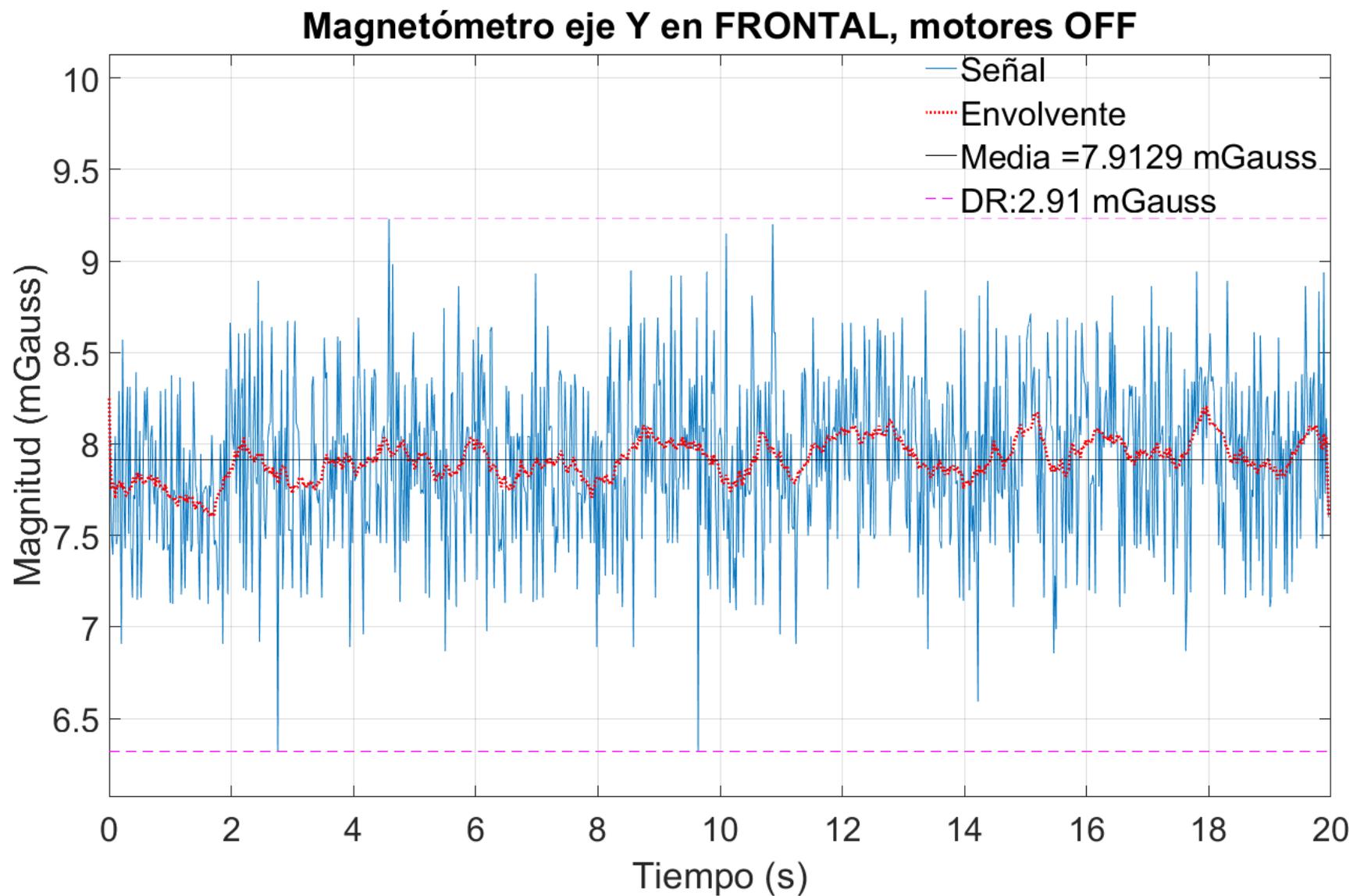


Figura C.42. Medida magnética en eje Y con IMU en posición frontal, aislada del viento y motores apagados

Magnetómetro eje Y en FRONTAL, motores ON

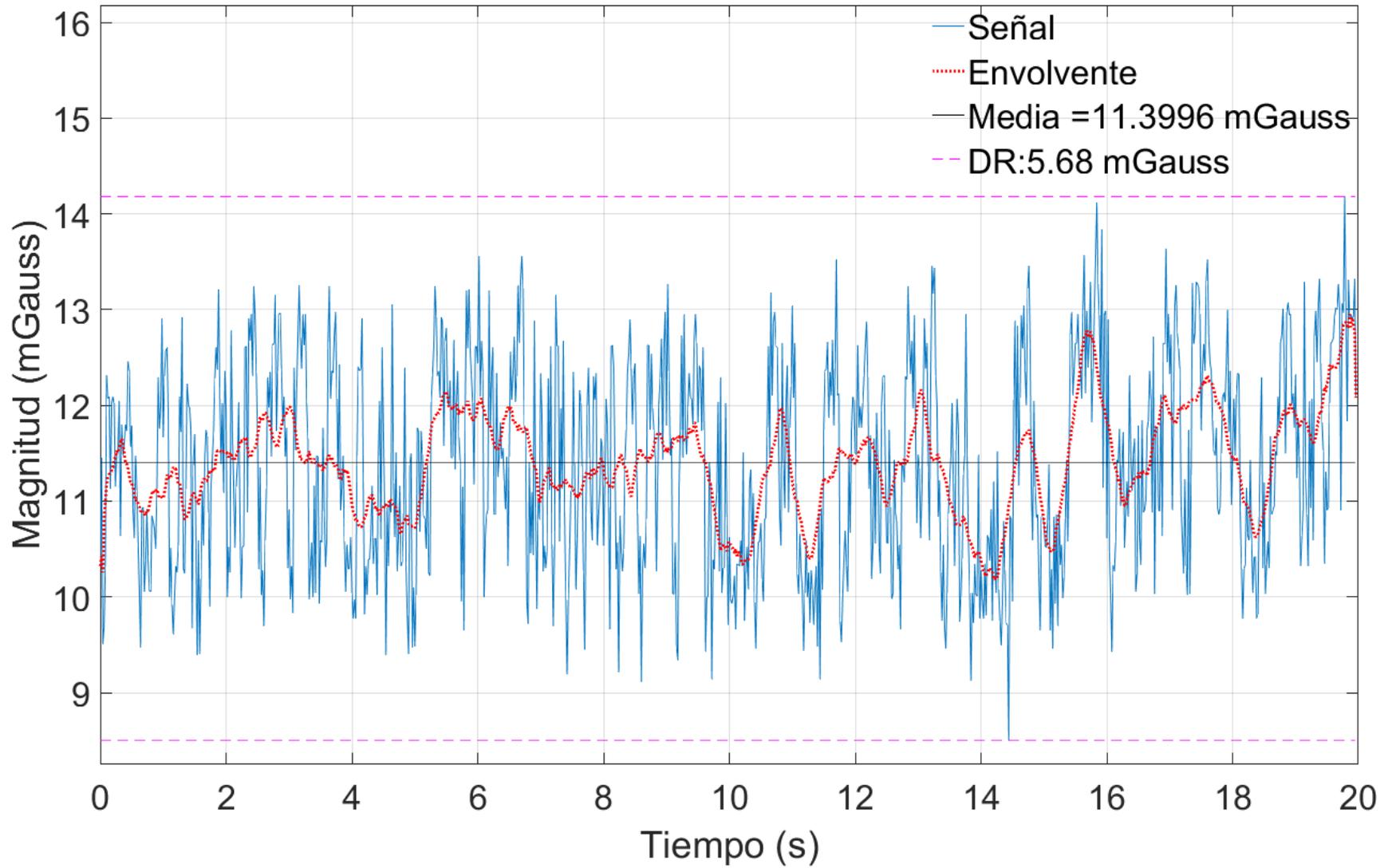


Figura C.43. Medida magnética en eje Y con IMU en posición frontal, aislada del viento y motores encendidos

Magnetómetro eje Z en FRONTAL, motores OFF

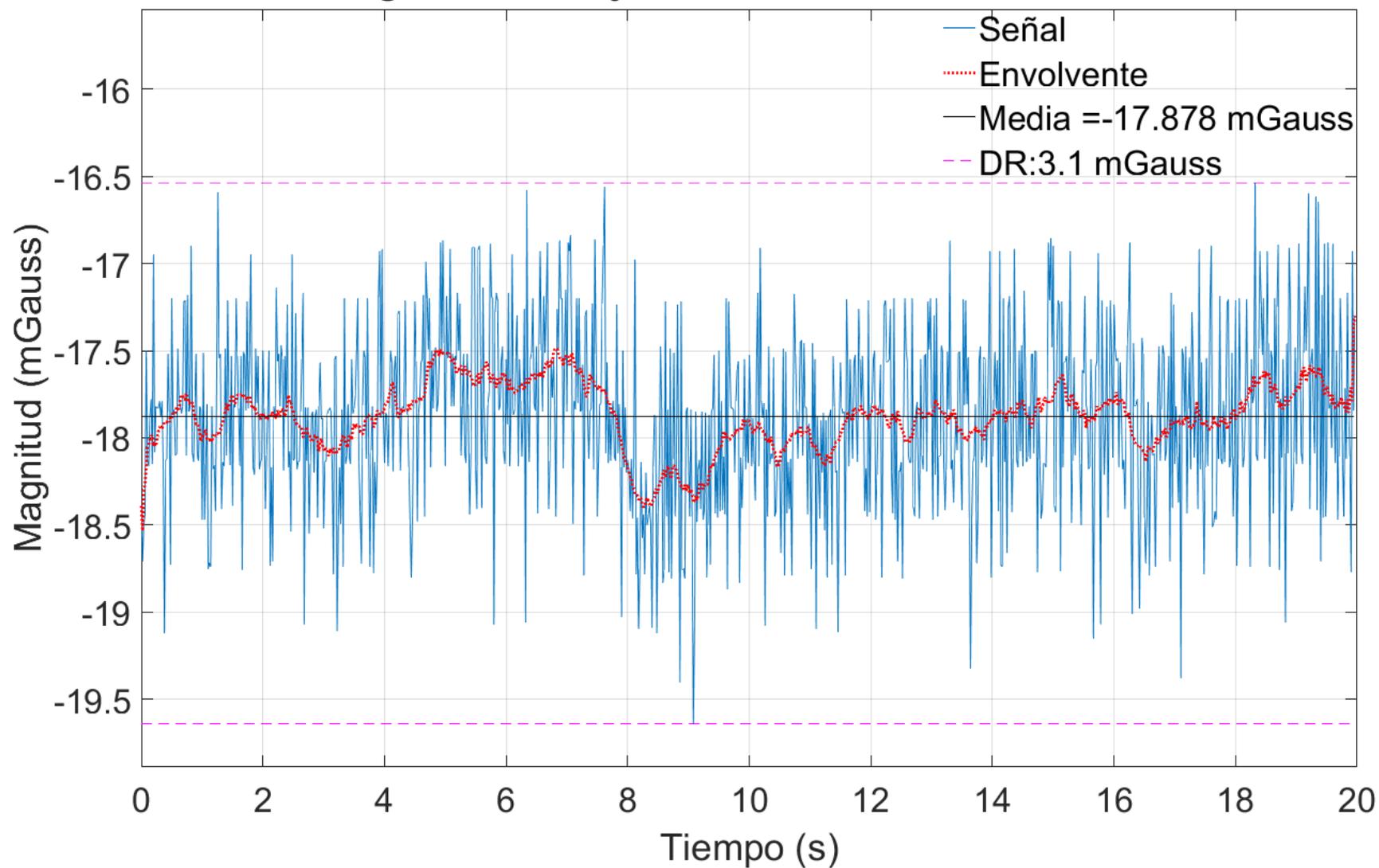


Figura C.44. Medida magnética en eje Z con IMU en posición frontal, aislada del viento y motores apagados

Magnetómetro eje Z en FRONTAL, motores ON

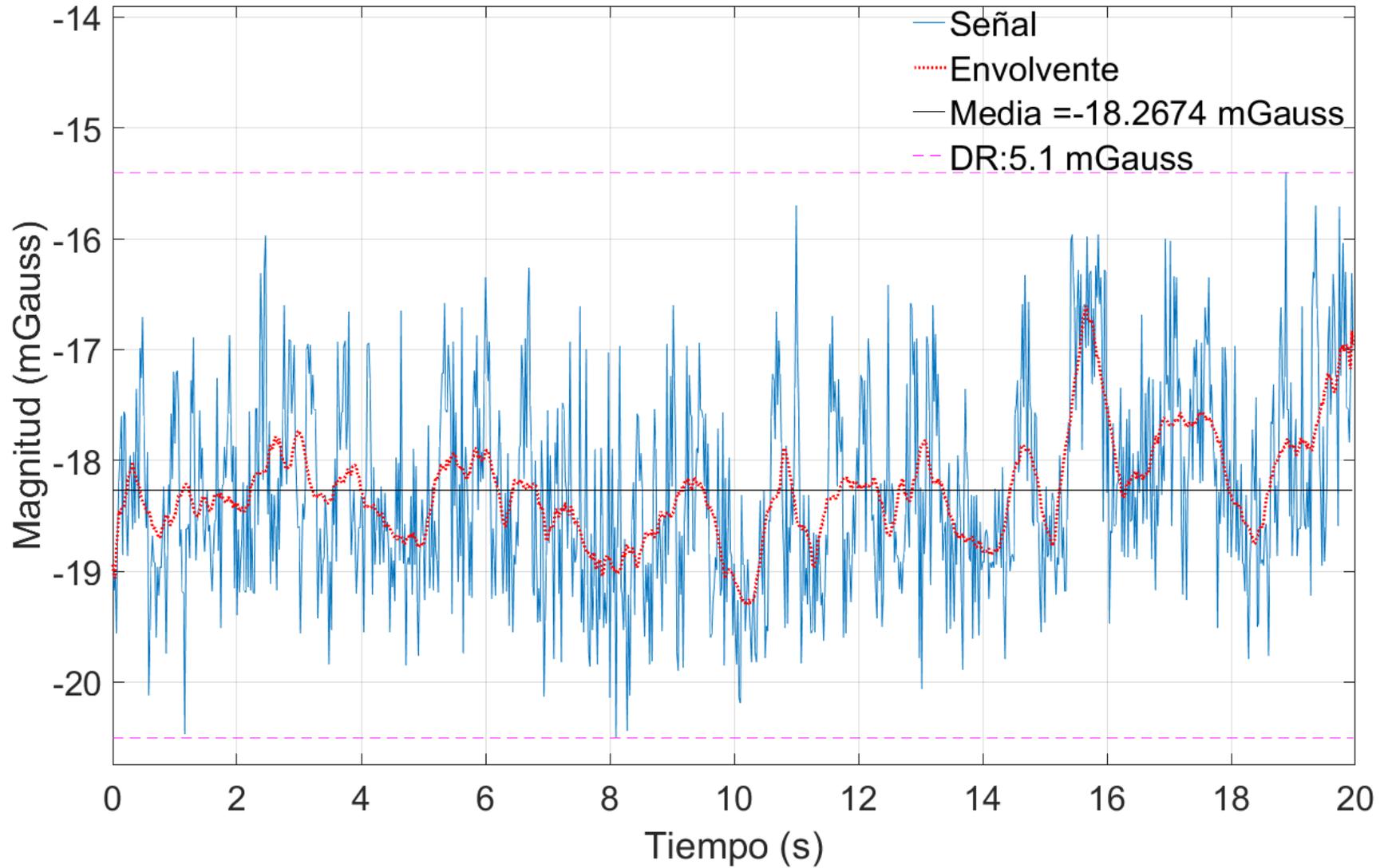


Figura C.45. Medida magnética en eje Z con IMU en posición inferior, aislada del viento y motores encendidos

Magnetómetro eje X en FRONTAL, motores ON

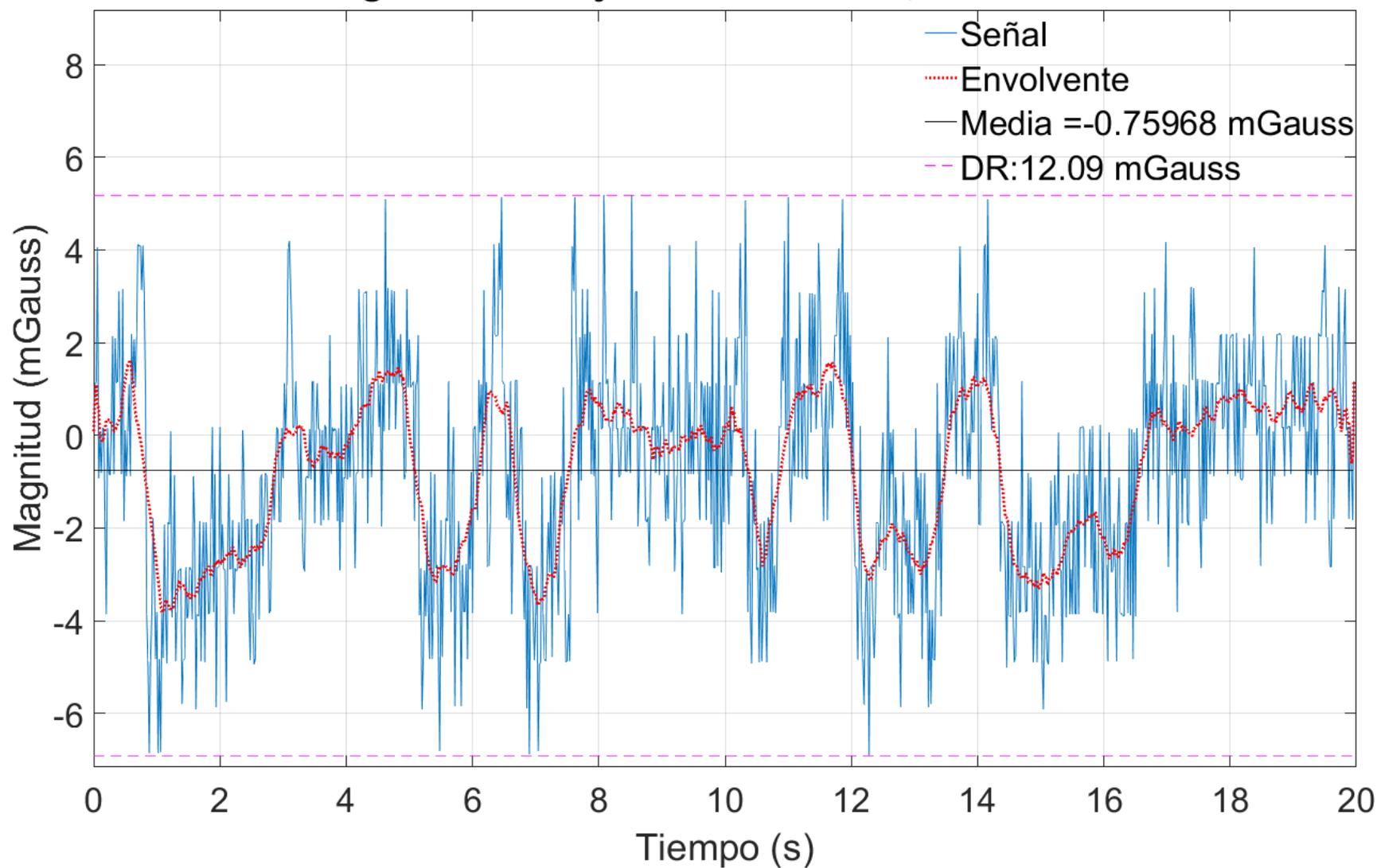


Figura C.46. Medida magnética en eje X con IMU en posición frontal y motores encendidos

Magnetómetro eje X en LATERALIZQ, motores ON

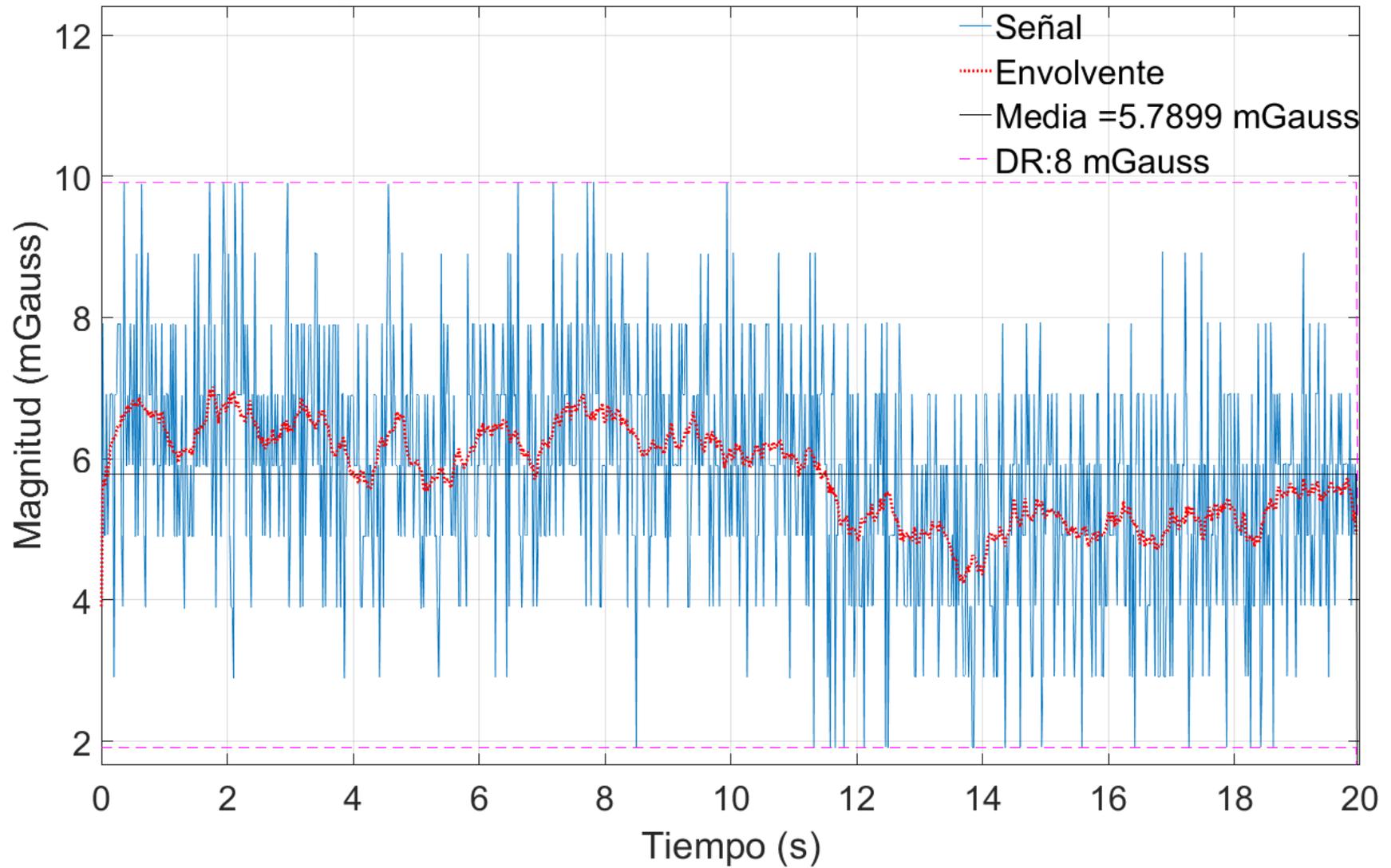


Figura C.47. Medida magnética en eje X con IMU en posición lateral izquierdo y motores encendidos

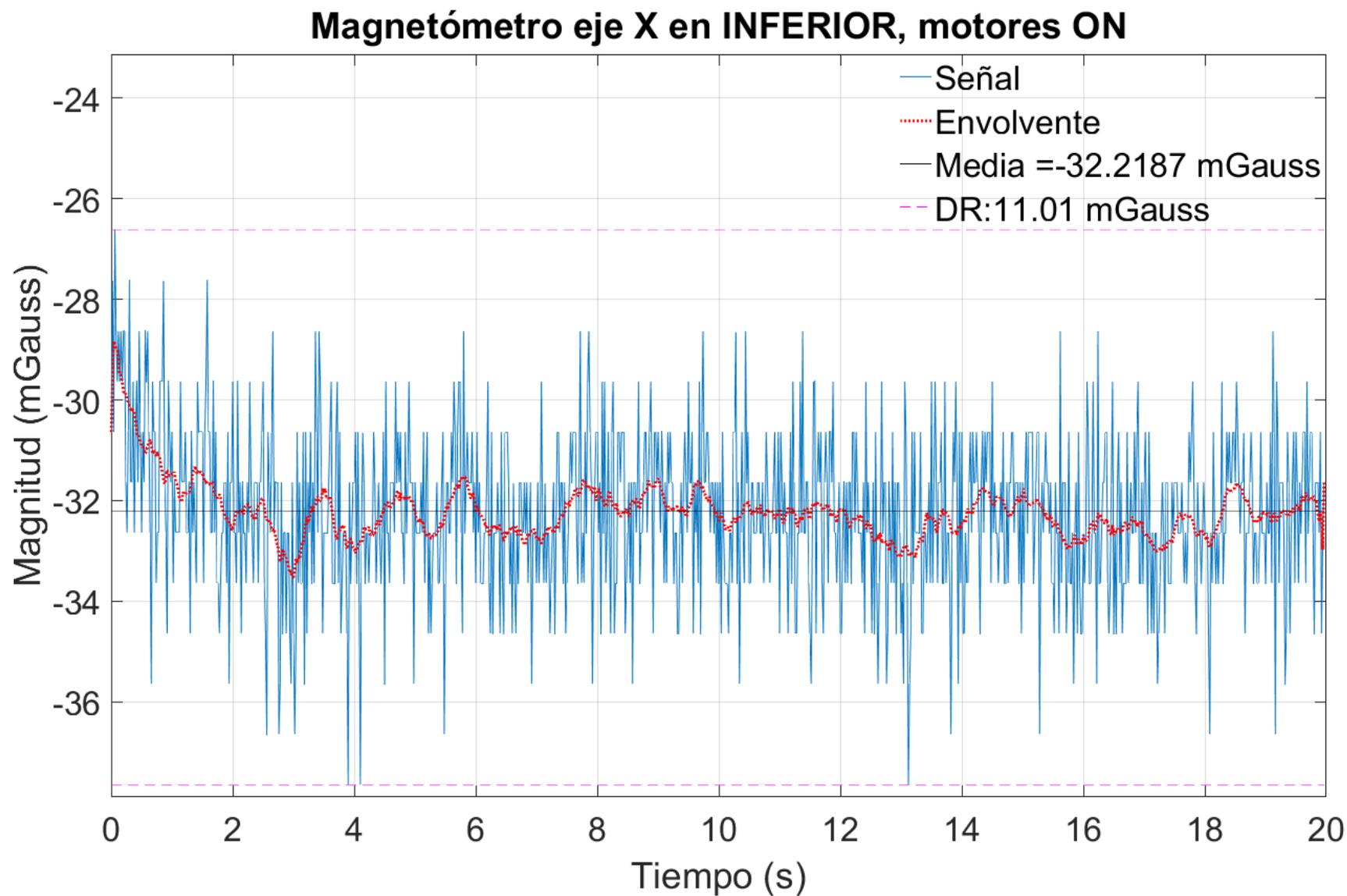


Figura C.48. Medida magnética en eje X con IMU en posición inferior y motores encendidos

Magnetómetro eje Y en FRONTAL, motores ON

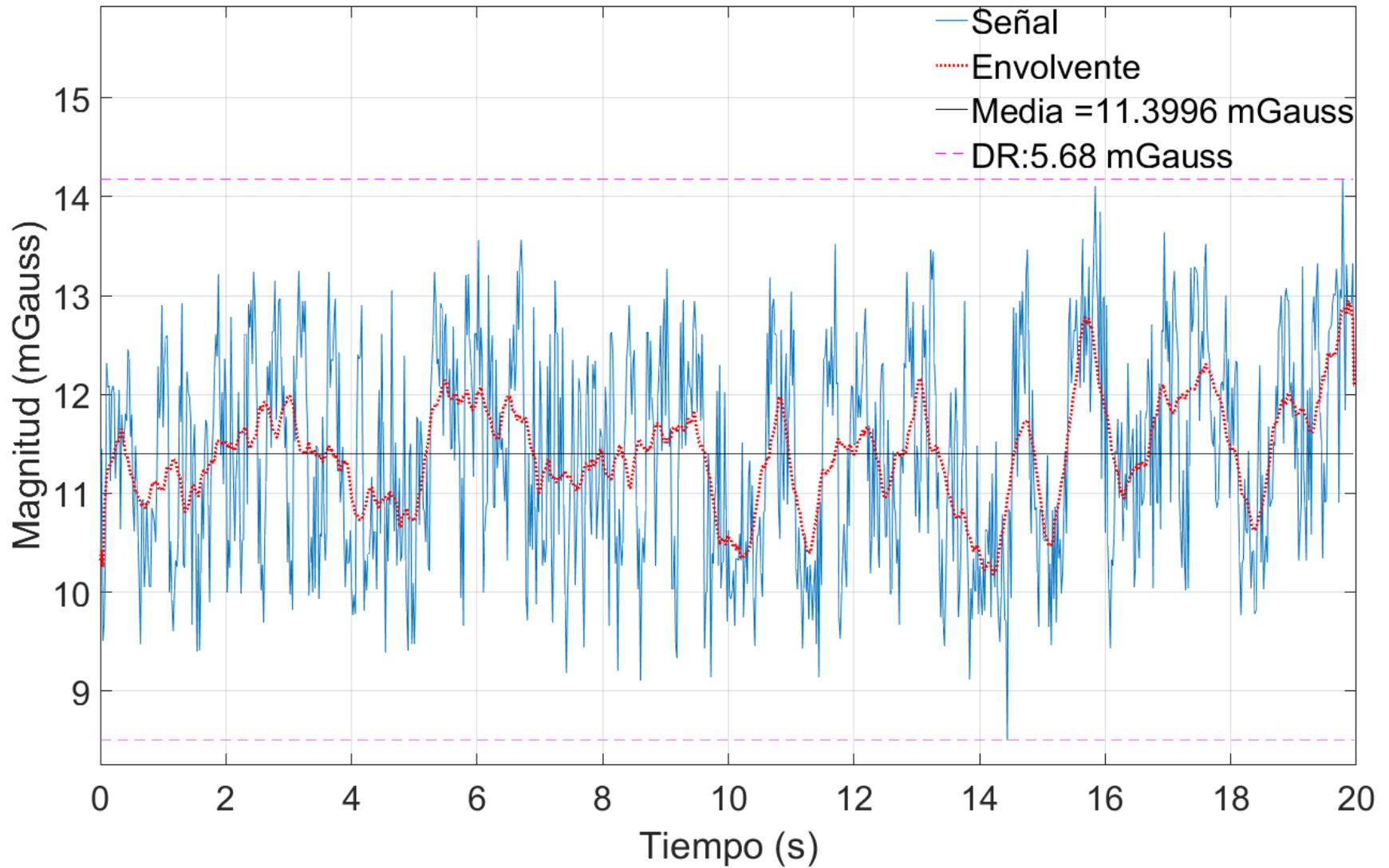


Figura C.49. Medida magnética en eje Y con IMU en posición frontal y motores encendidos

Magnetómetro eje Y en LATERALIZQ, motores ON

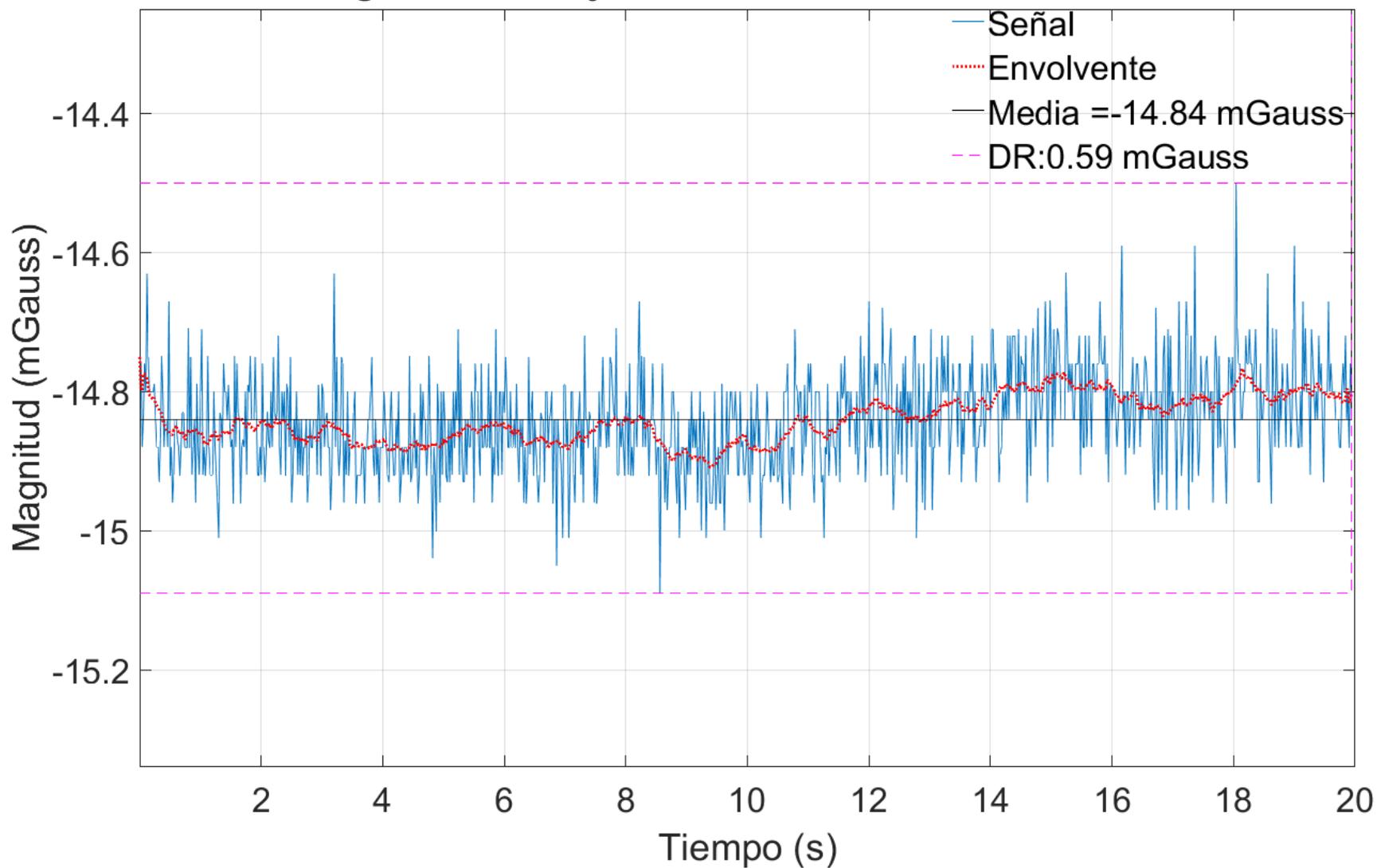


Figura C.50. Medida magnética en eje Y con IMU en posición lateral izquierdo y motores encendidos

Magnetómetro eje Y en INFERIOR, motores ON

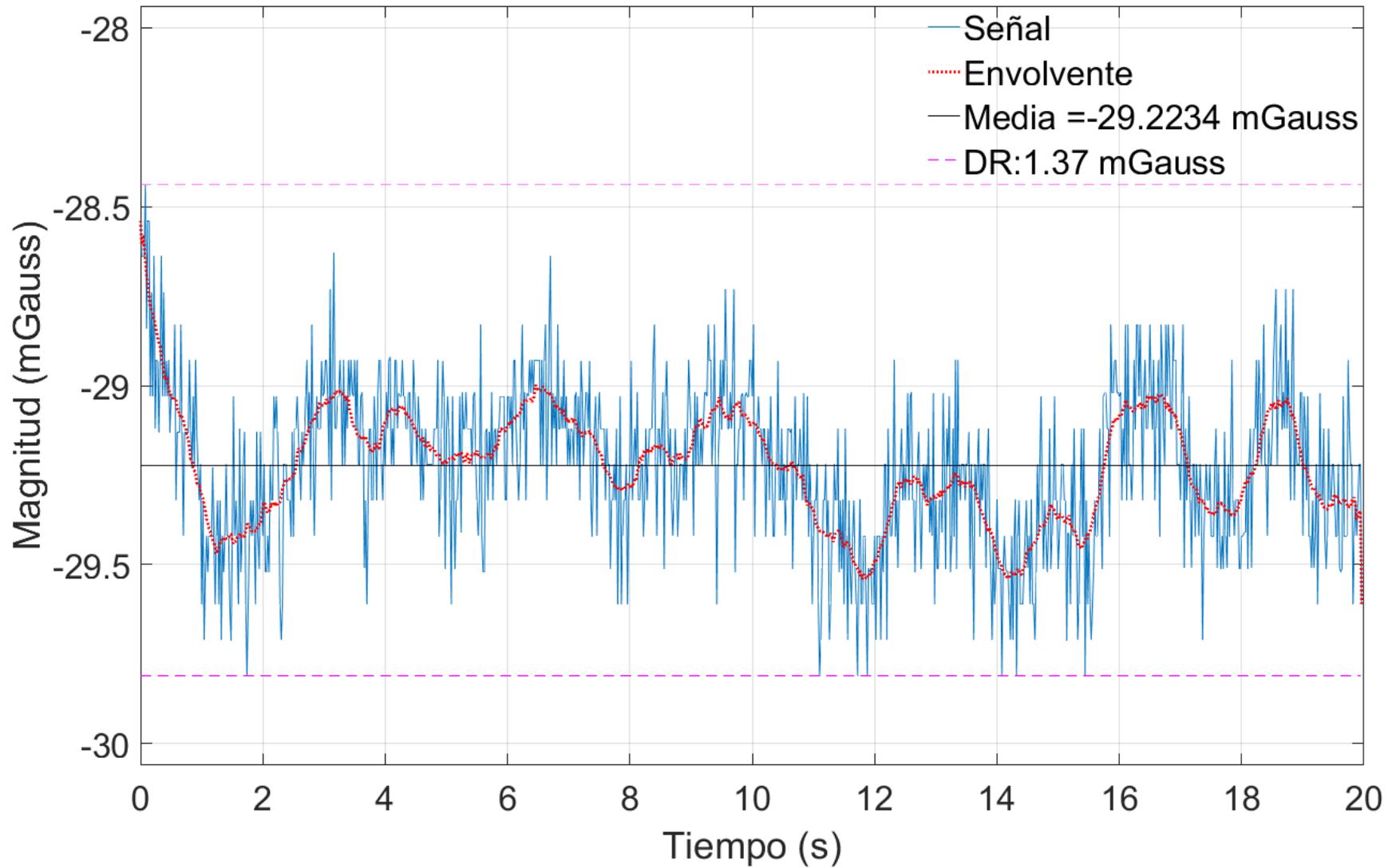


Figura C.51. Medida magnética en eje Y con IMU en posición inferior y motores encendidos

Magnetómetro eje Z en FRONTAL, motores ON

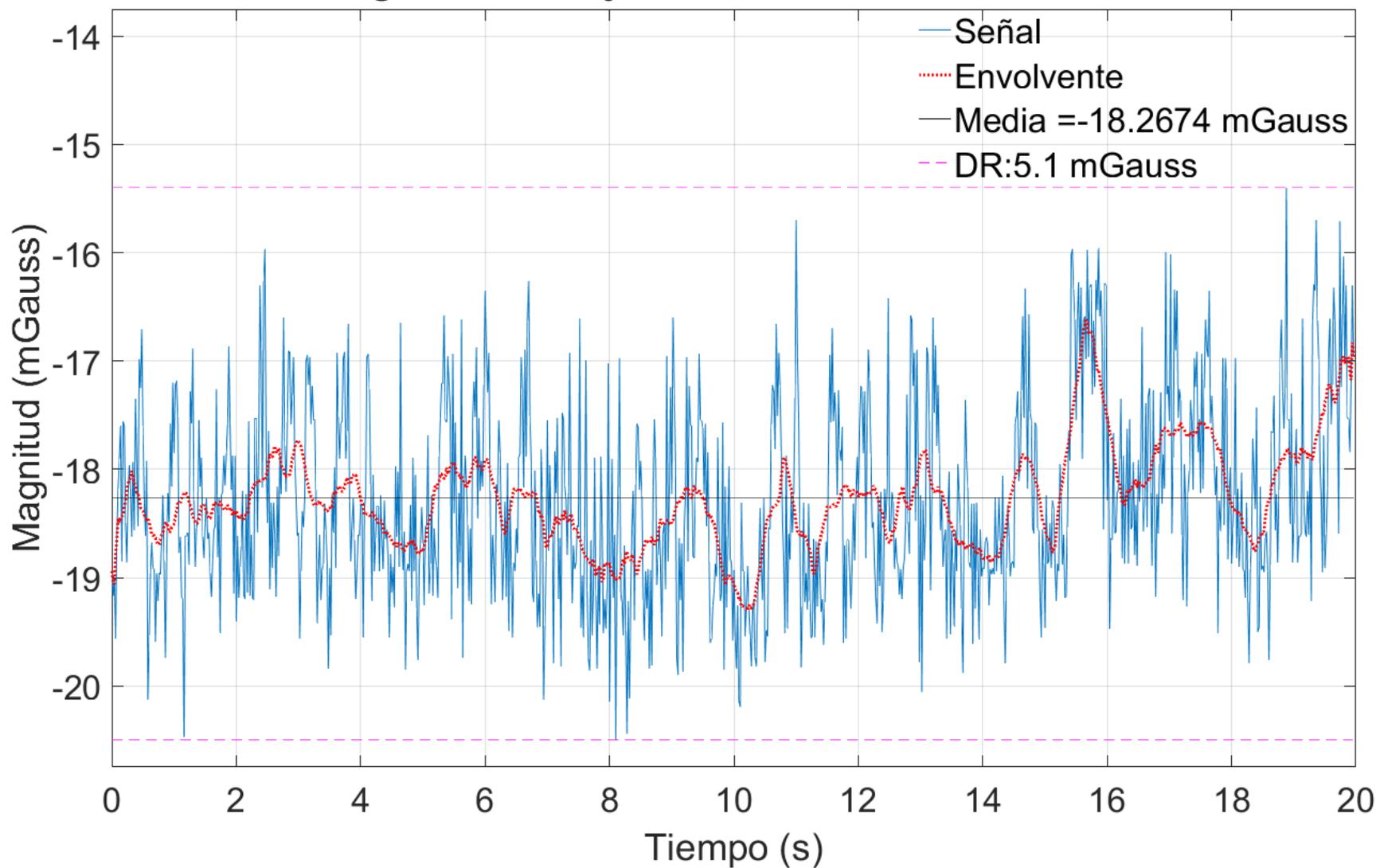


Figura C.52. Medida magnética en eje Z con IMU en posición frontal y motores encendidos

Magnetómetro eje Z en LATERALIZQ, motores ON

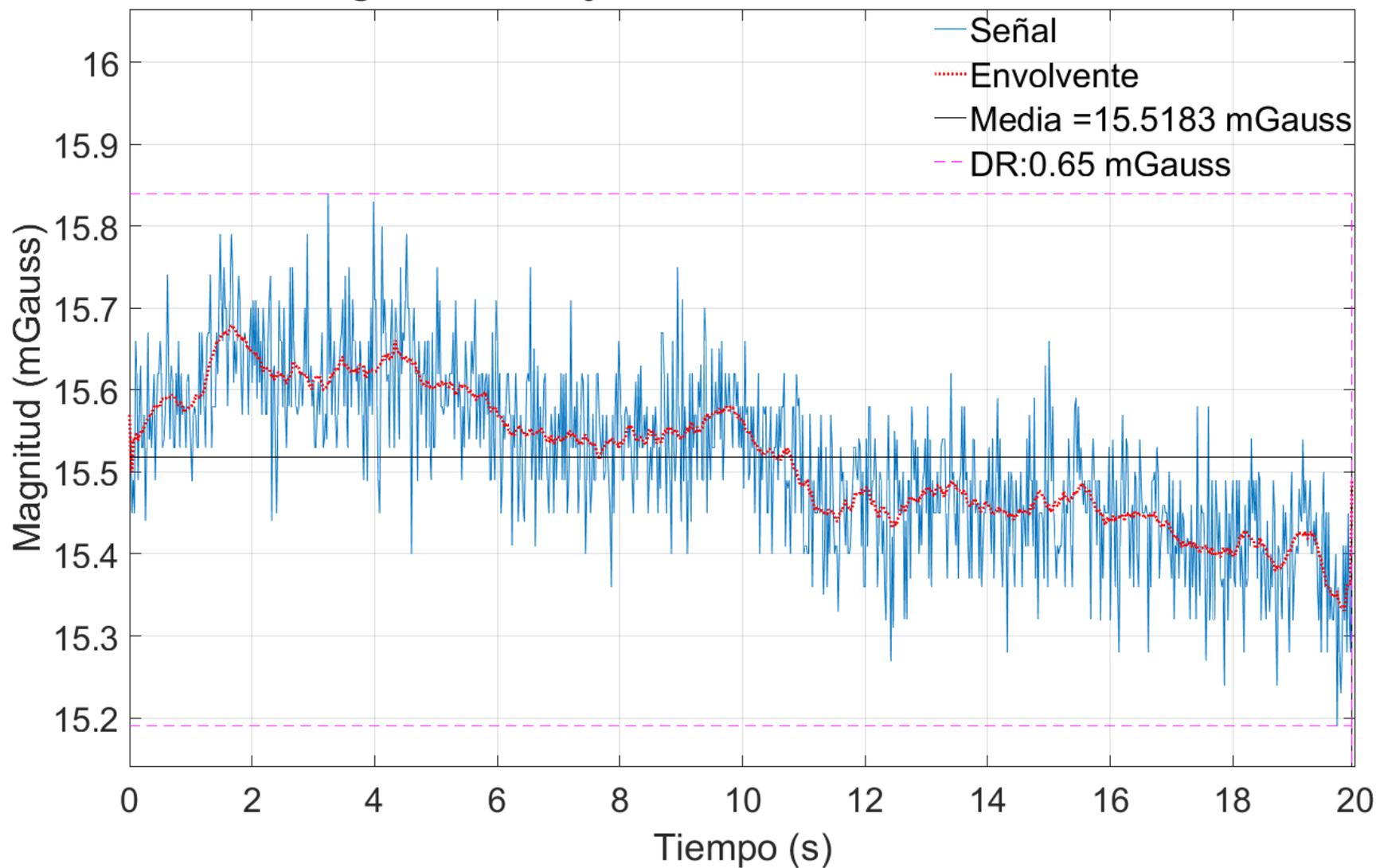


Figura C.53. Medida magnética en eje Z con IMU en posición lateral izquierdo y motores encendidos

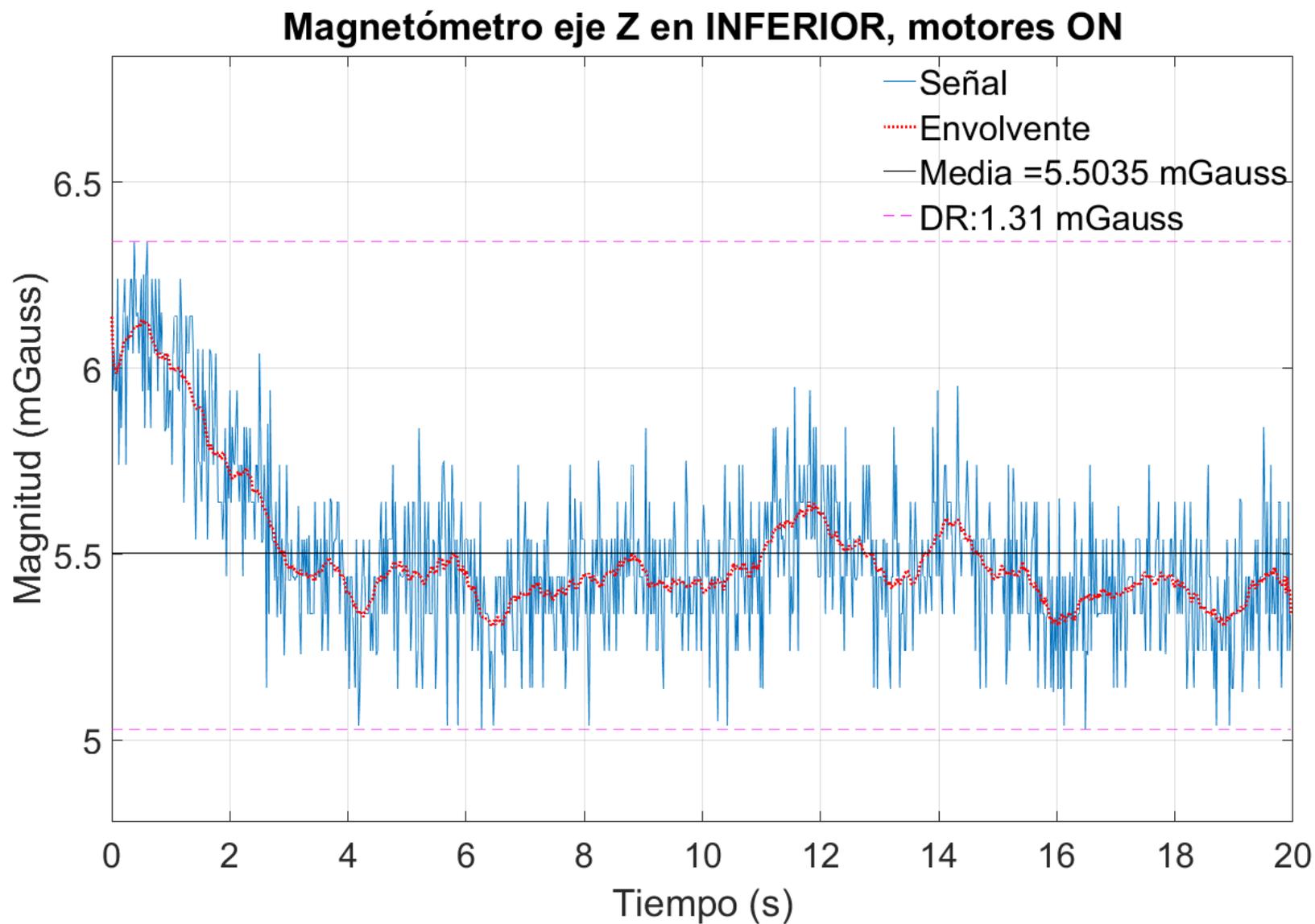


Figura C.54. Medida magnética en eje Z con IMU en posición inferior y motores encendidos

Acelerómetro eje X en FRONTAL, motores ON

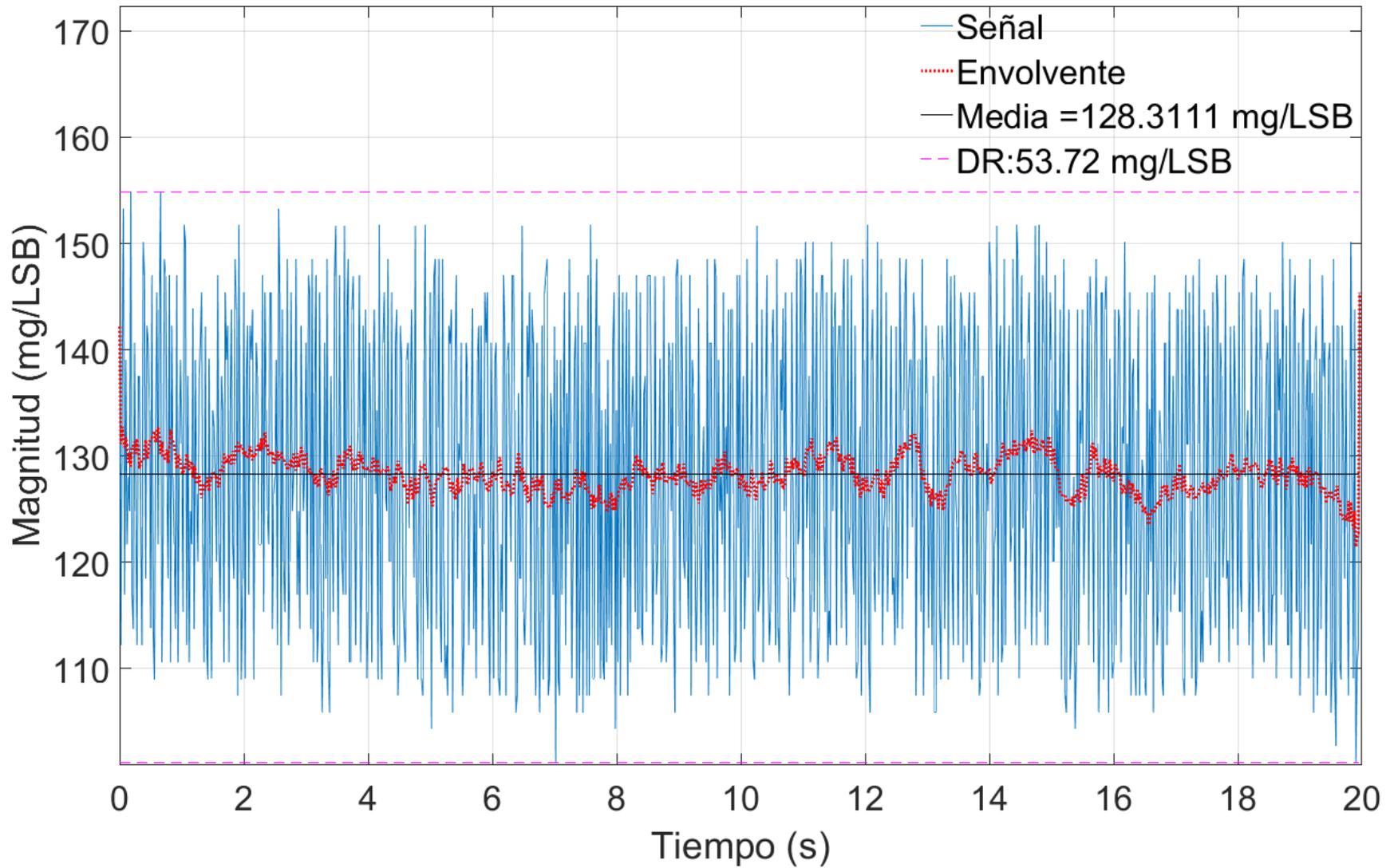


Figura C.55. Medida acelerométrica en eje X con IMU en posición frontal y motores encendidos

Acelerómetro eje X en LATERALIZQ, motores ON

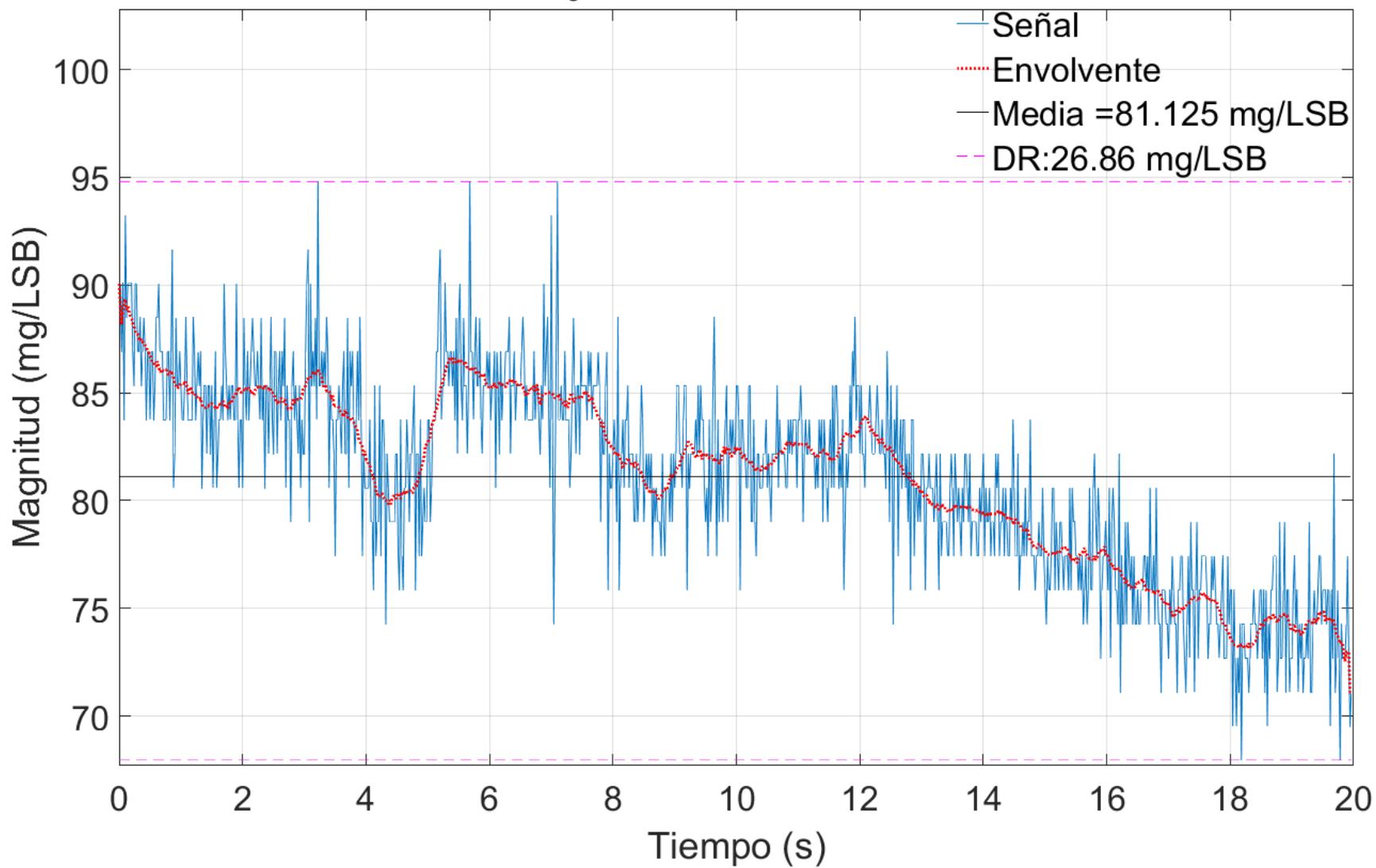


Figura C.56. Medida acelerométrica en eje X con IMU en posición lateral izquierdo y motores encendidos

Acelerómetro eje X en INFERIOR, motores ON

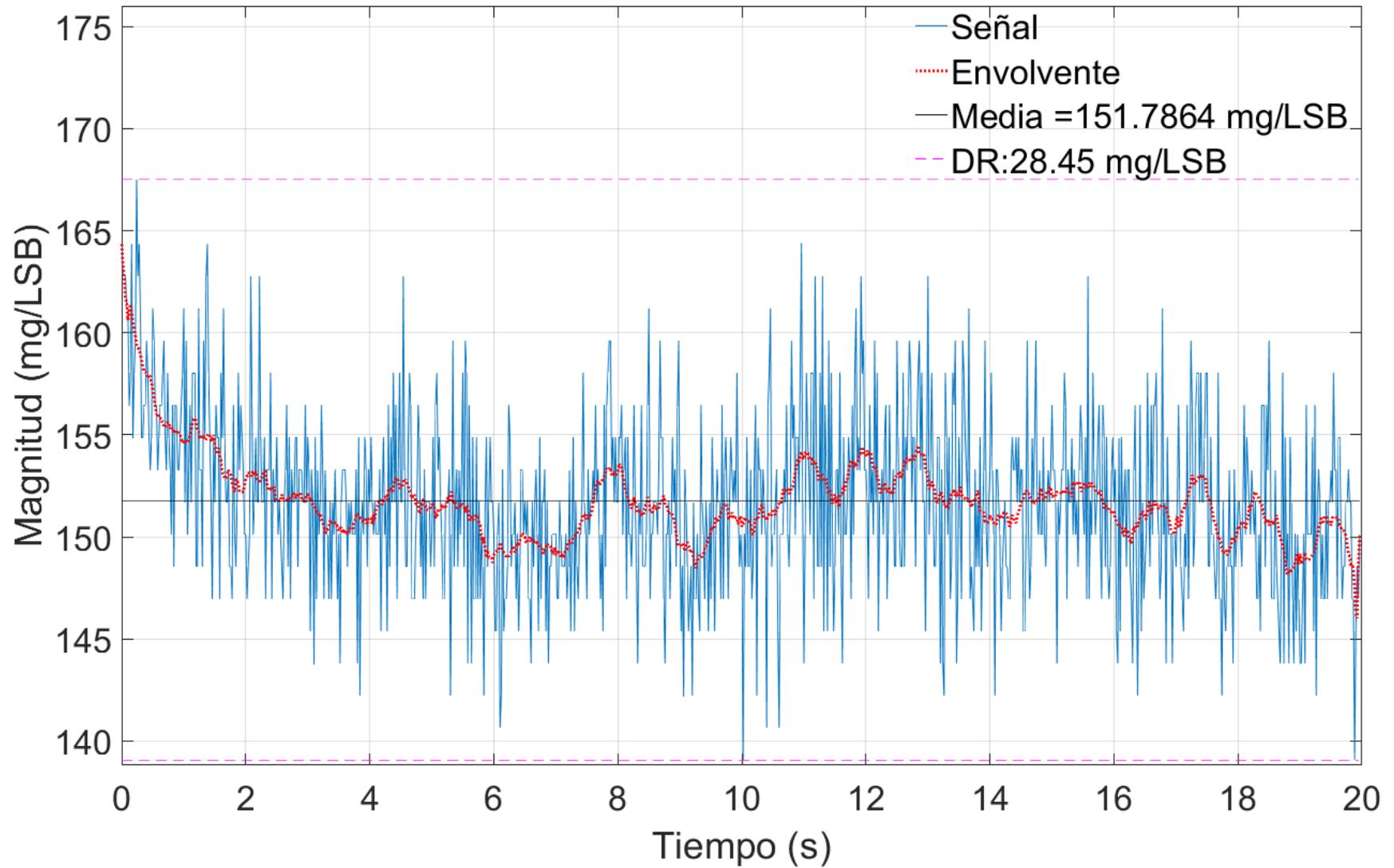


Figura C.57. Medida acelerométrica en eje X con IMU en posición inferior y motores encendidos

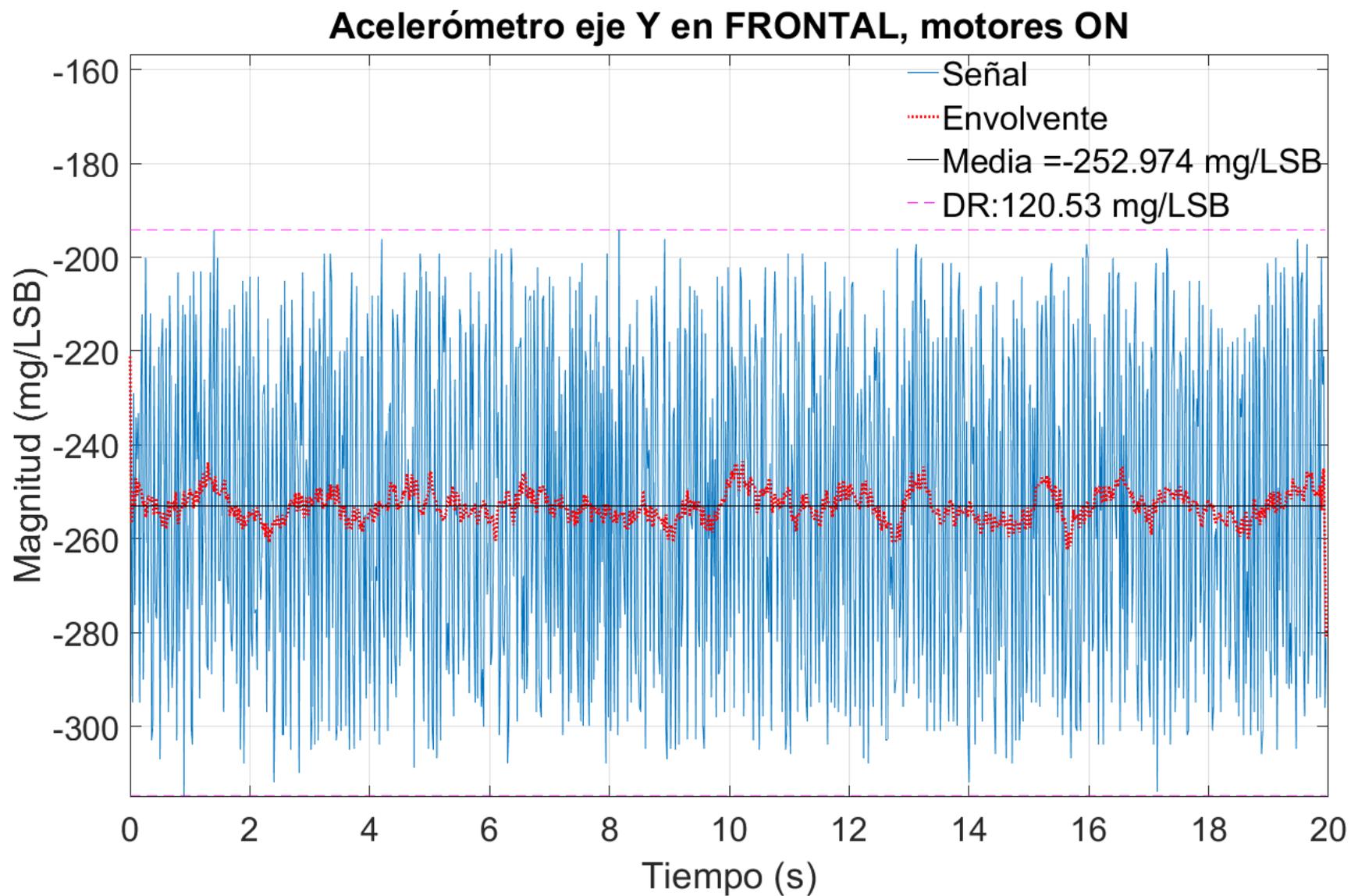


Figura C.58. Medida acelerométrica en eje Y con IMU en posición frontal y motores encendidos

Acelerómetro eje Y en LATERALIZQ, motores ON

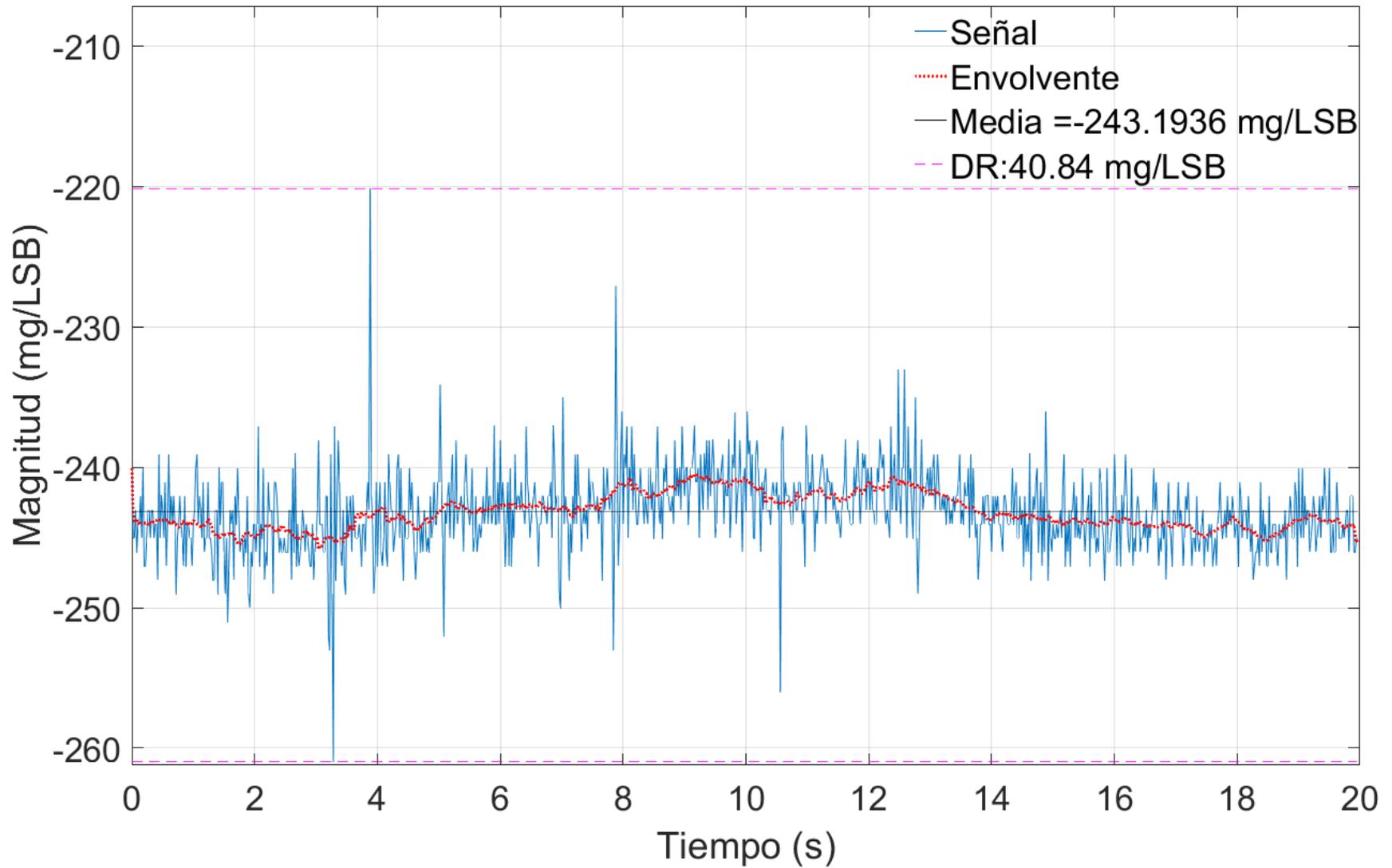


Figura C.59. Medida acelerométrica en eje Y con IMU en posición lateral izquierdo y motores encendidos

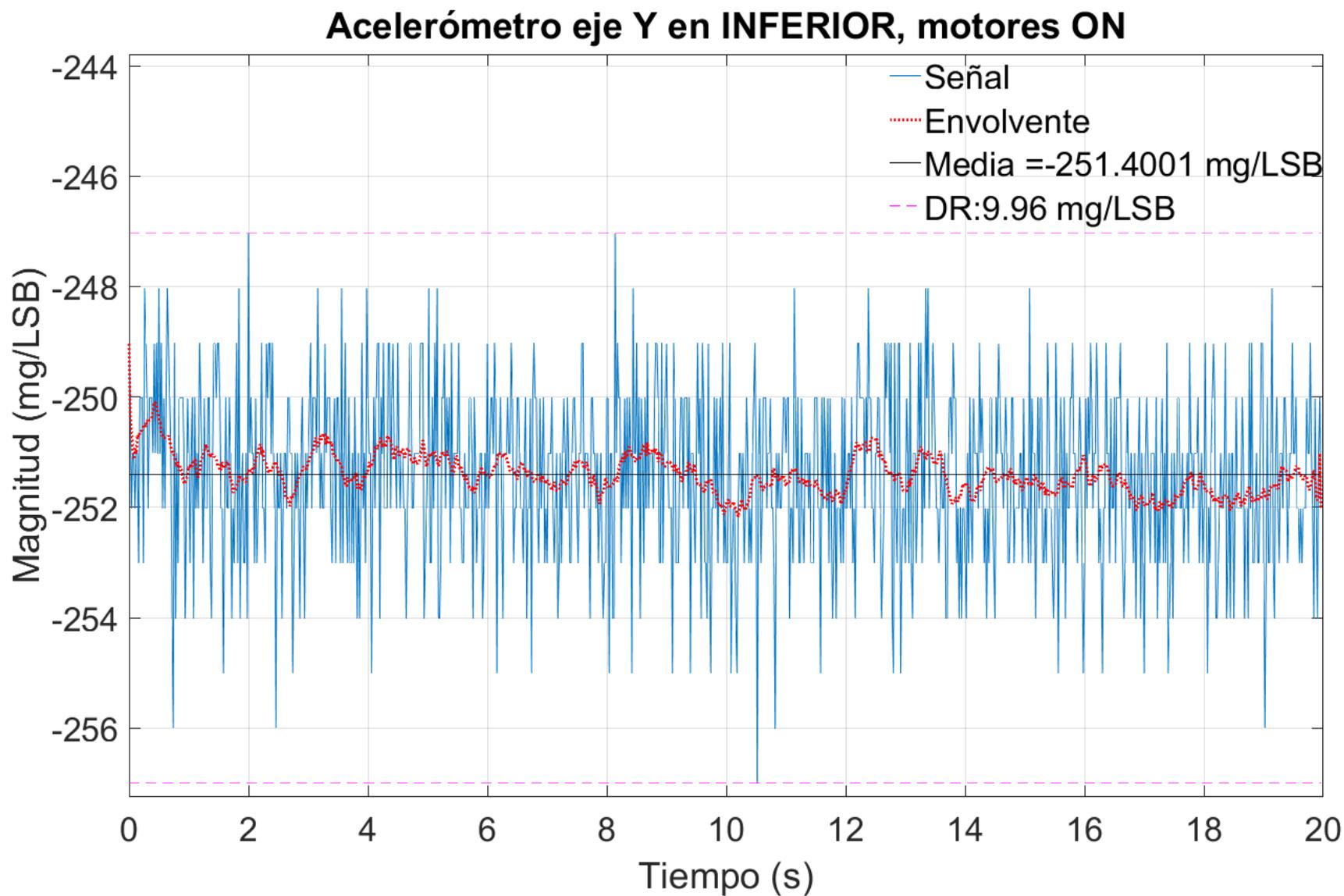


Figura C.60. Medida acelerométrica en eje Y con IMU en posición inferior y motores encendidos

Acelerómetro eje Z en FRONTAL, motores ON

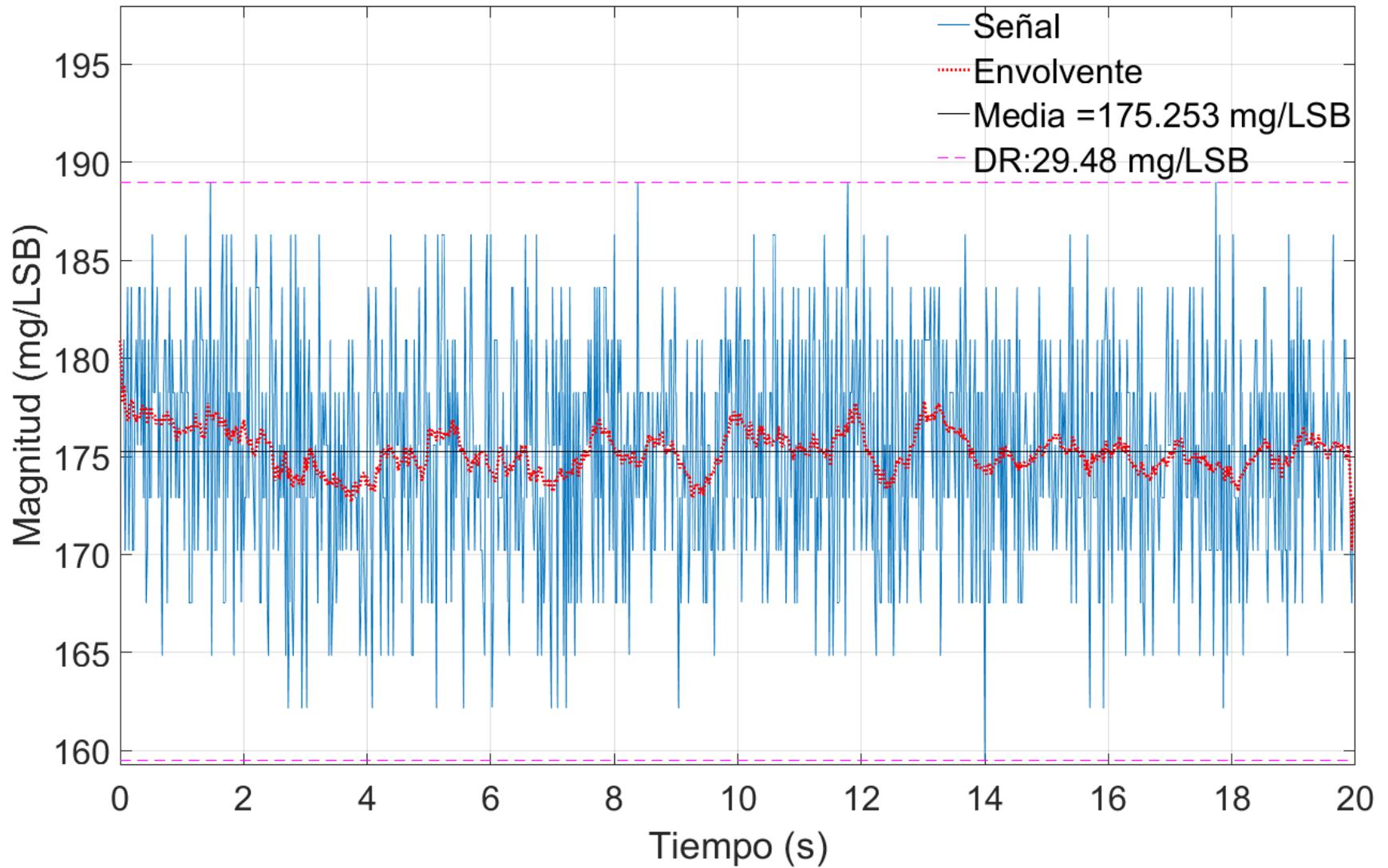


Figura C.61. Medida acelerométrica en eje Z con IMU en posición frontal y motores encendidos

Acelerómetro eje Z en LATERALIZQ, motores ON

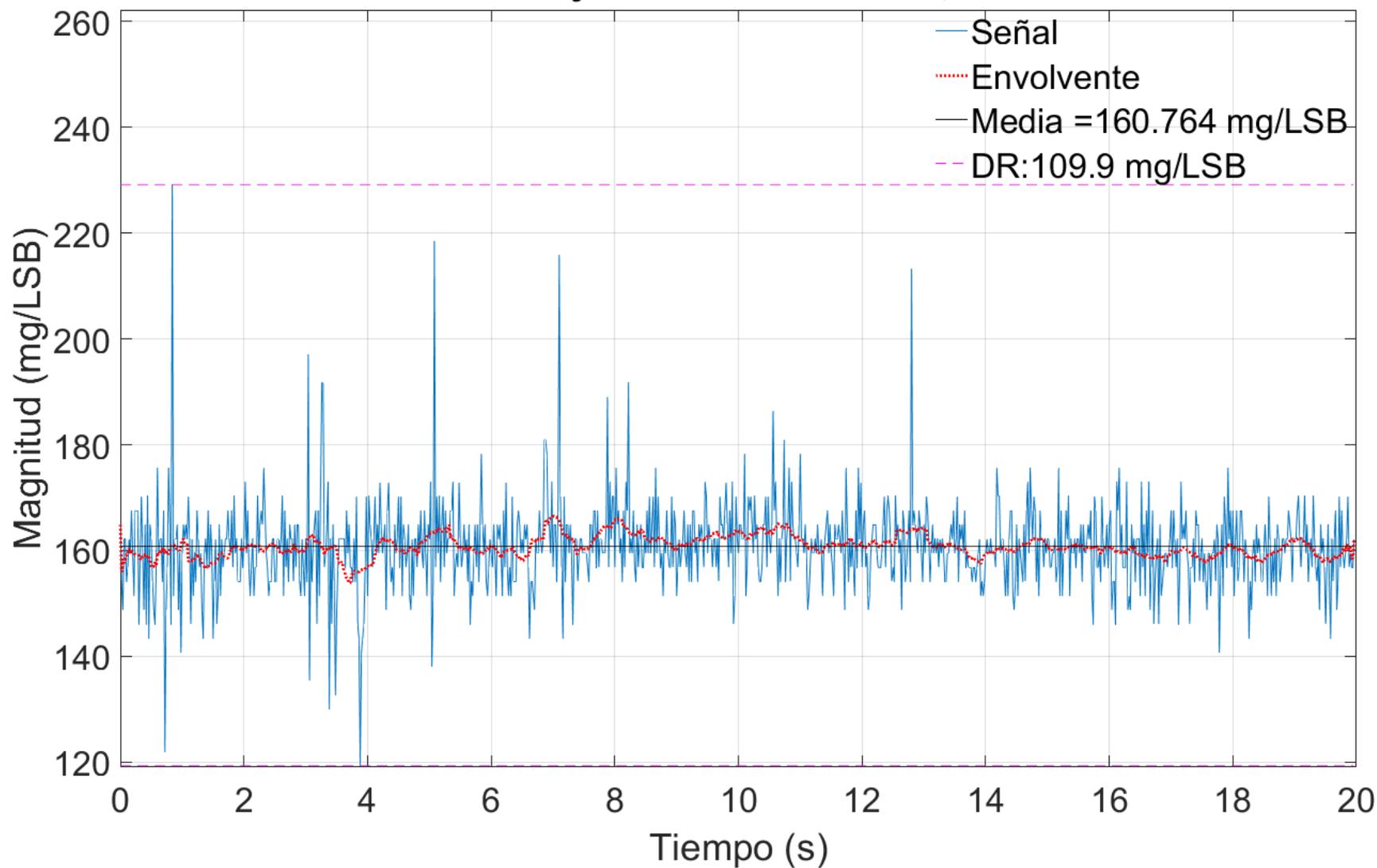


Figura C.62. Medida acelerométrica en eje Z con IMU en posición lateral izquierdo y motores encendidos

Acelerómetro eje Z en INFERIOR, motores ON

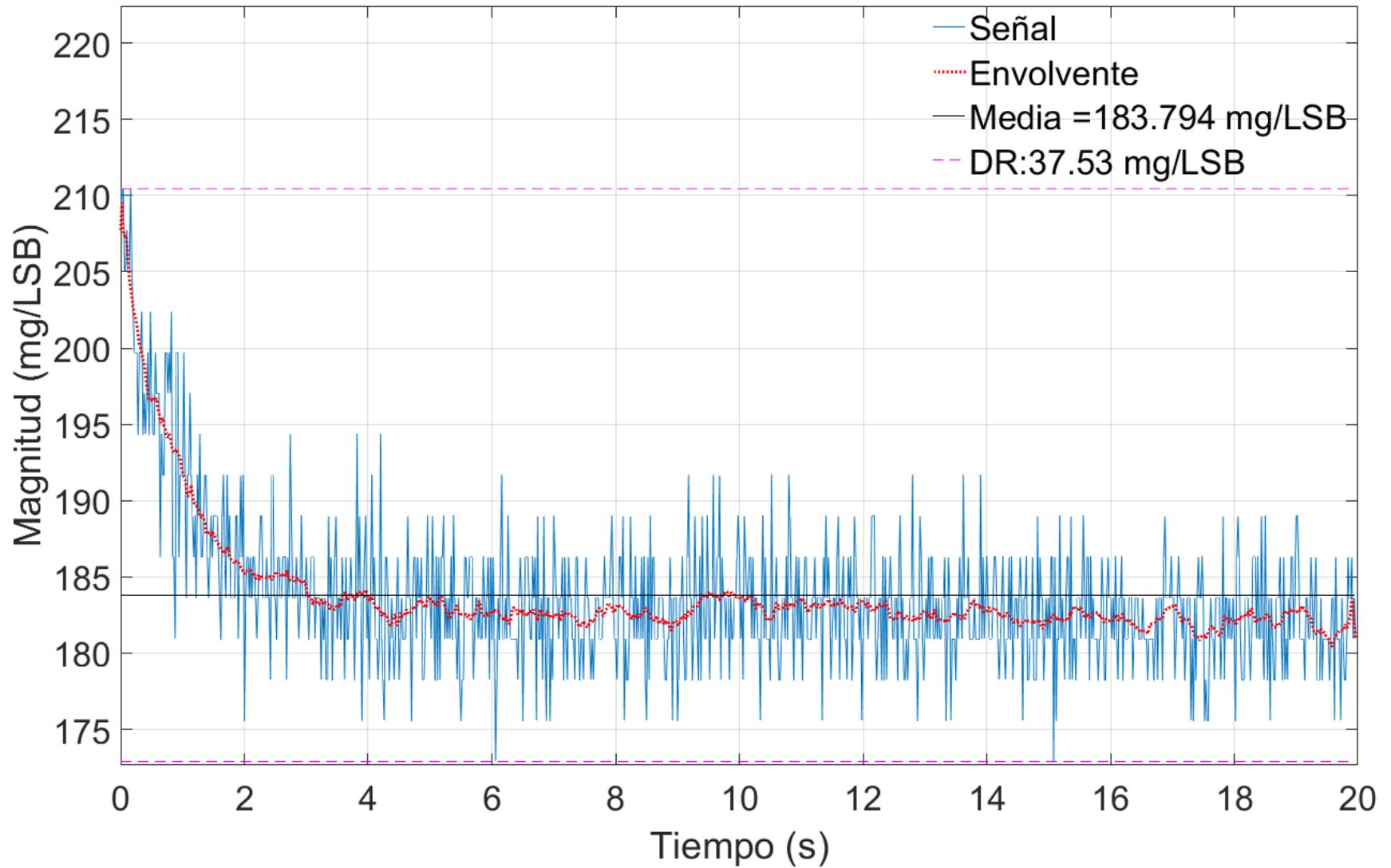


Figura C.63. Medida acelerométrica en eje Z con IMU en posición inferior y motores encendidos

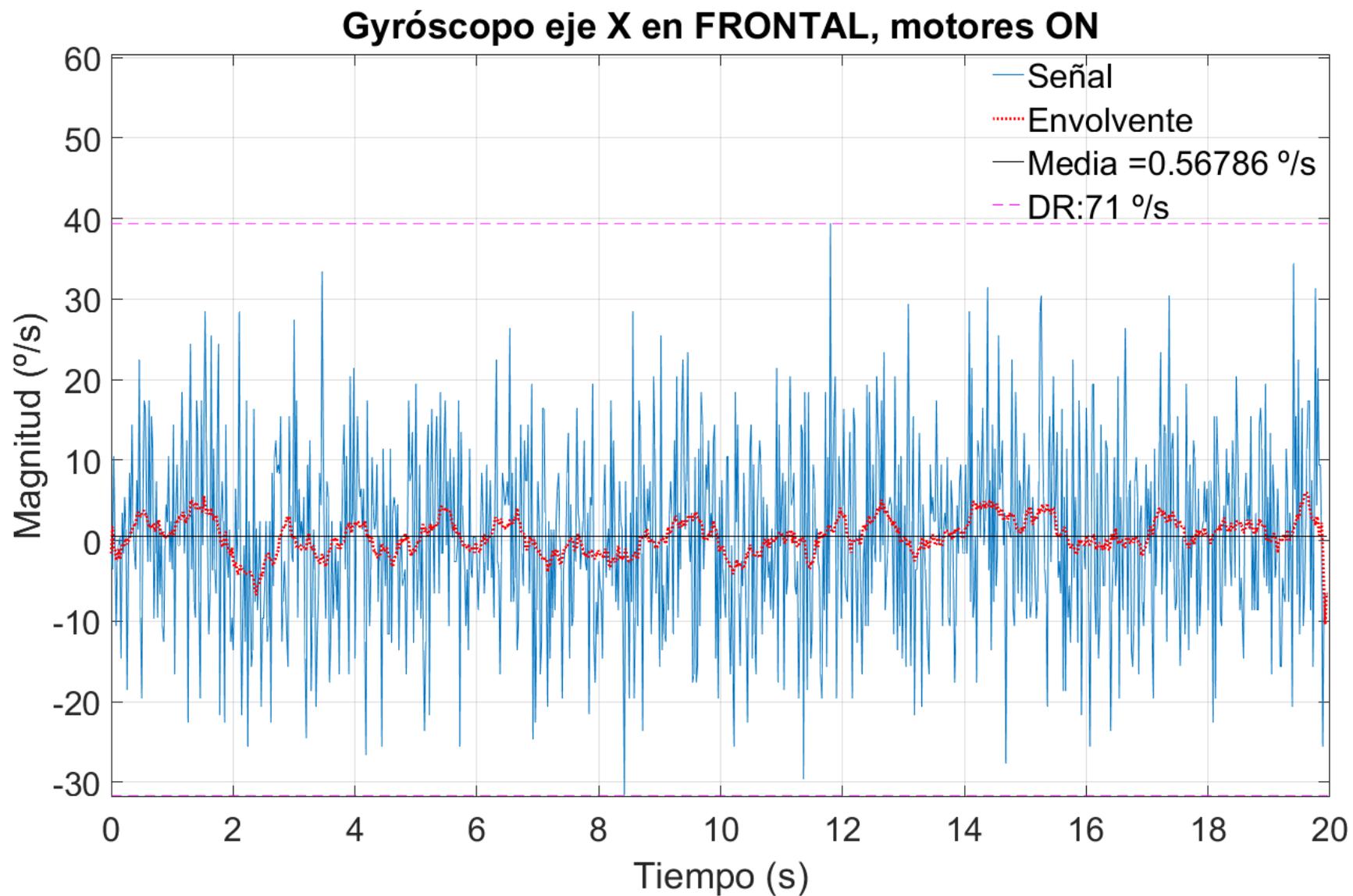


Figura C.64. Medida giroscópica en eje X con IMU en posición frontal y motores encendidos

Gyrómetro eje X en LATERALIZQ, motores ON

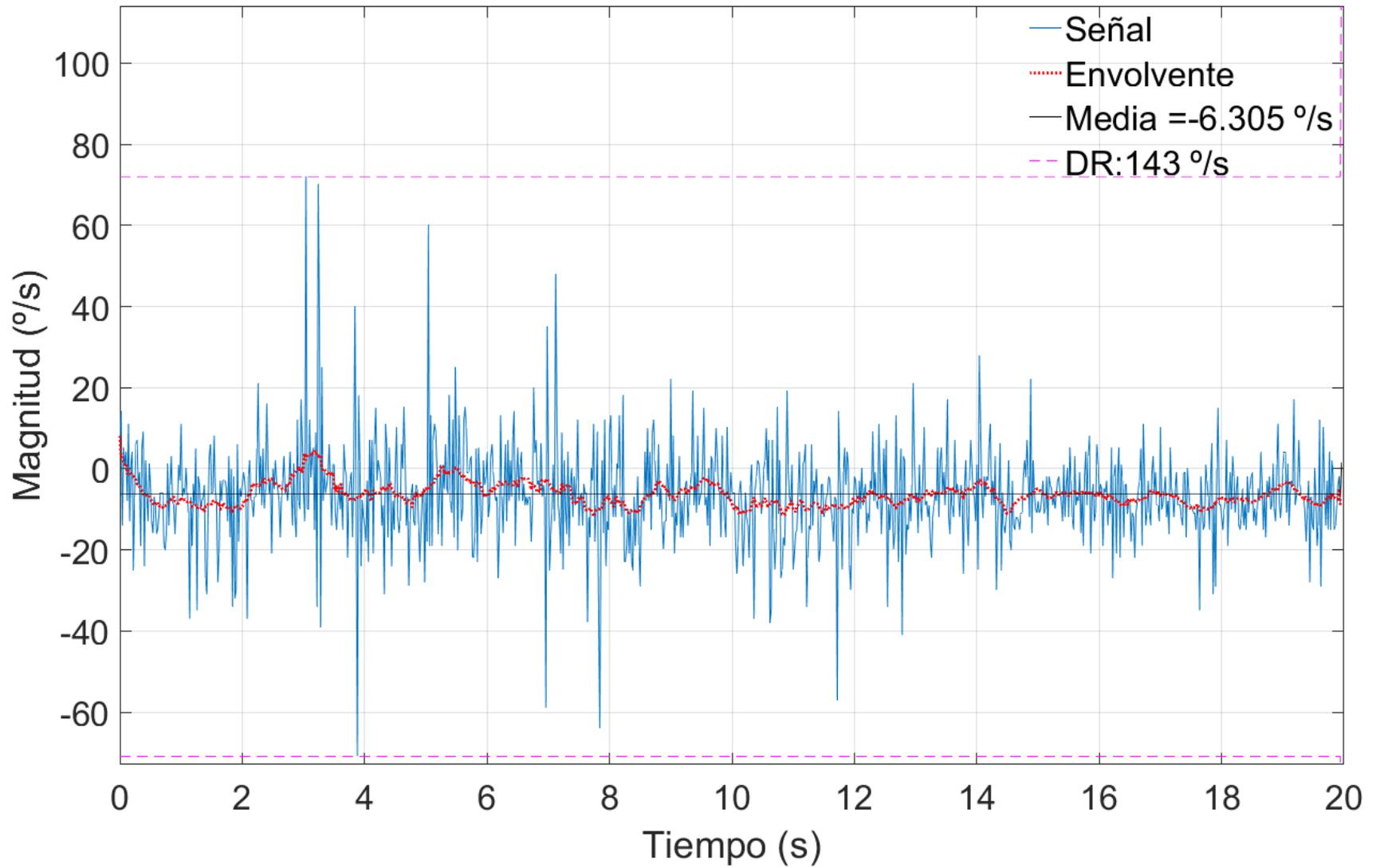


Figura C.65. Medida giroscópica en eje X con IMU en posición lateral izquierdo y motores encendidos

Gyrómetro eje X en INFERIOR, motores ON

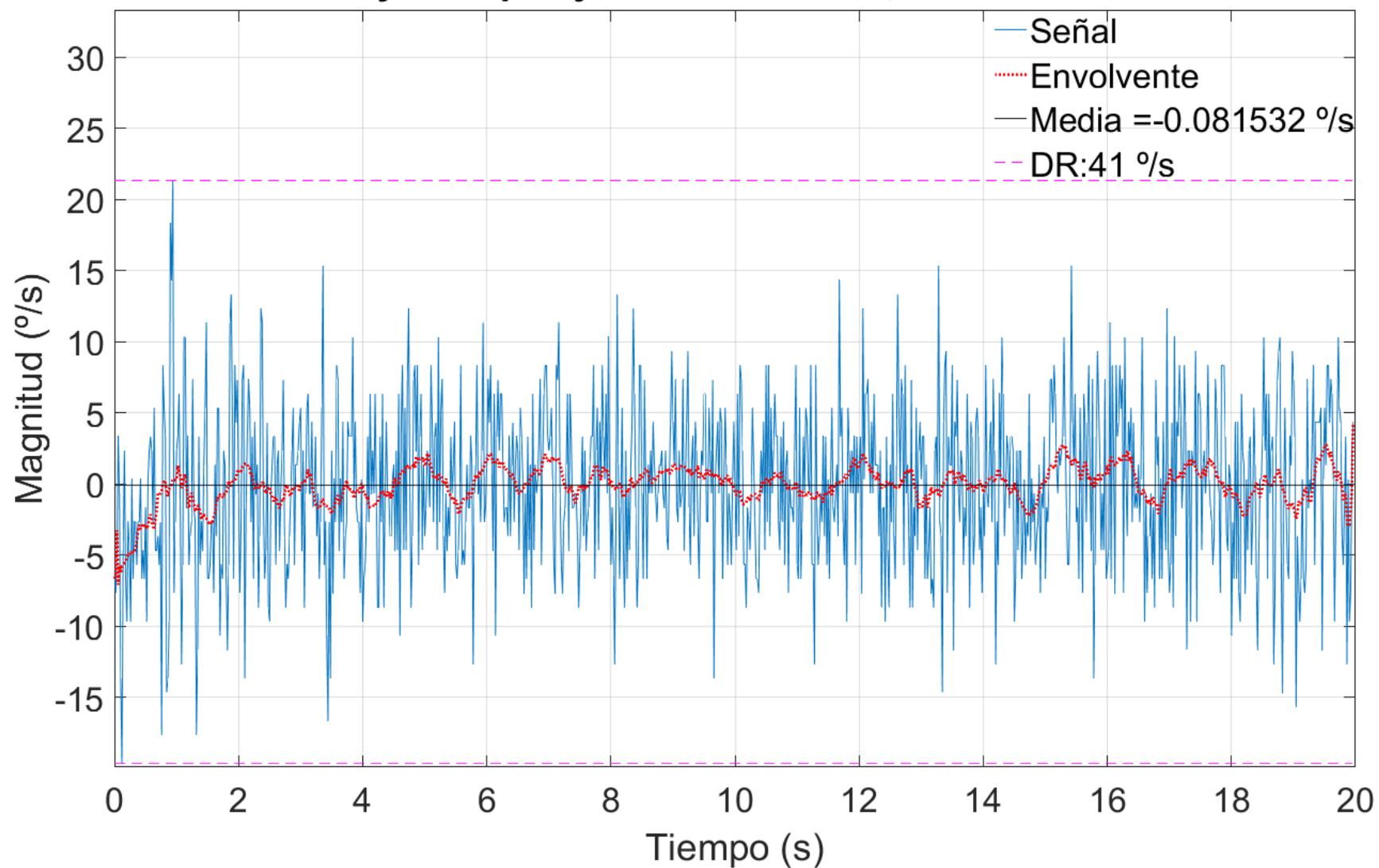


Figura C.66. Medida giroscópica en eje X con IMU en posición inferior y motores encendidos

Gyrómetro eje Y en FRONTAL, motores ON

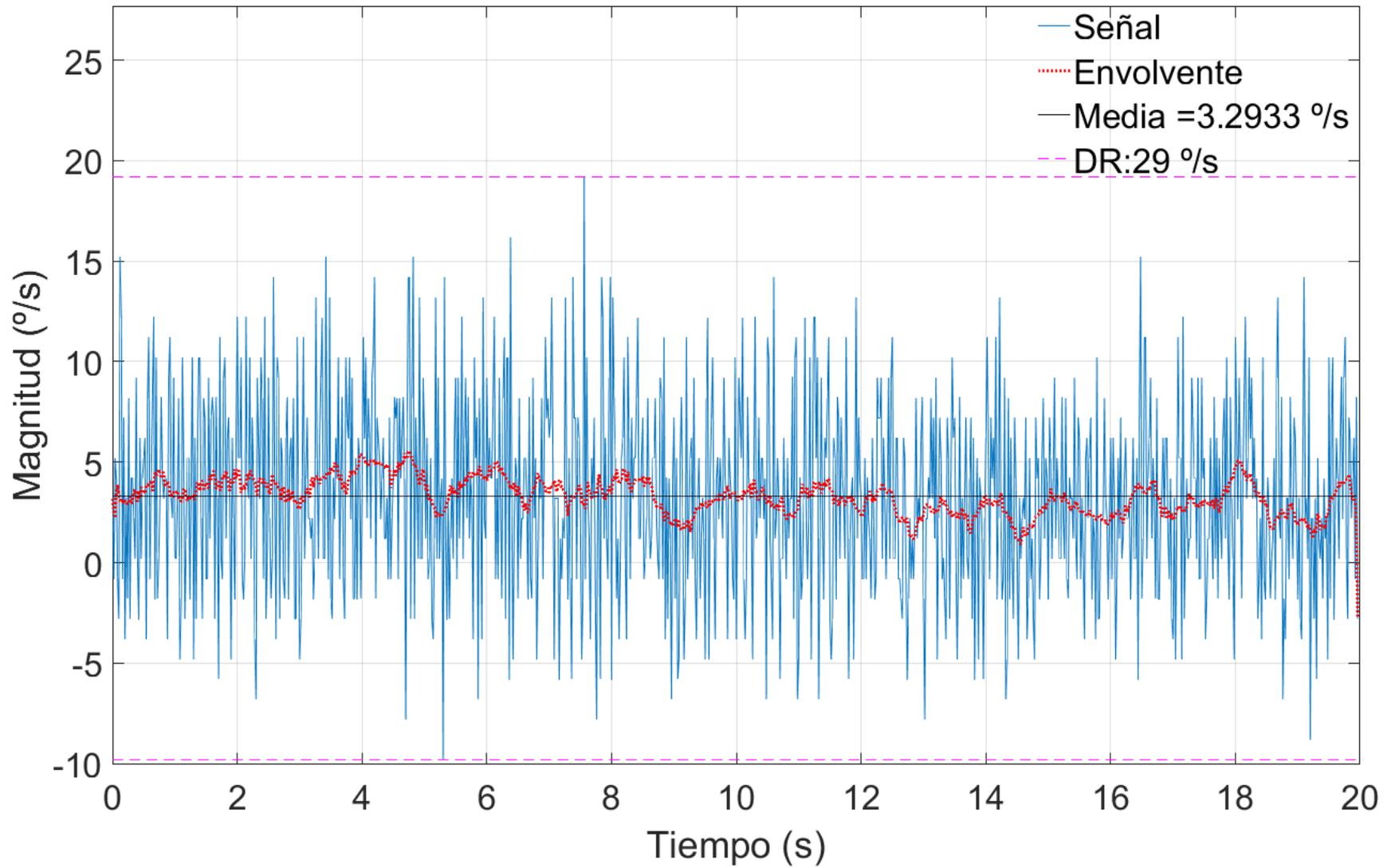


Figura C.67. Medida giroscópica en eje Y con IMU en posición frontal y motores encendidos

Gyróscopo eje Y en LATERALIZQ, motores ON

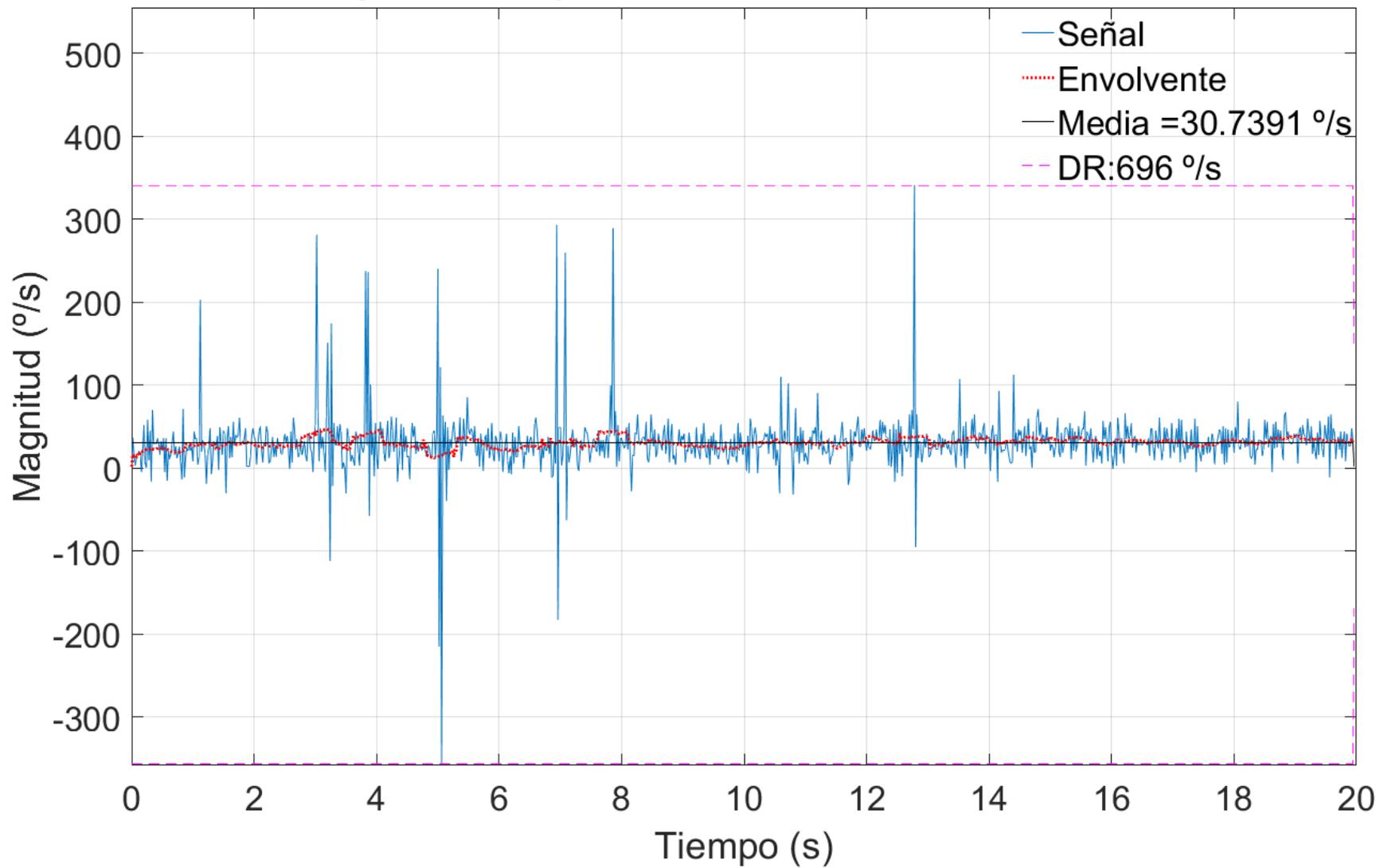


Figura C.68. Medida giroscópica en eje Y con IMU en posición lateral izquierdo y motores encendidos

Gyrómetro eje Y en INFERIOR, motores ON

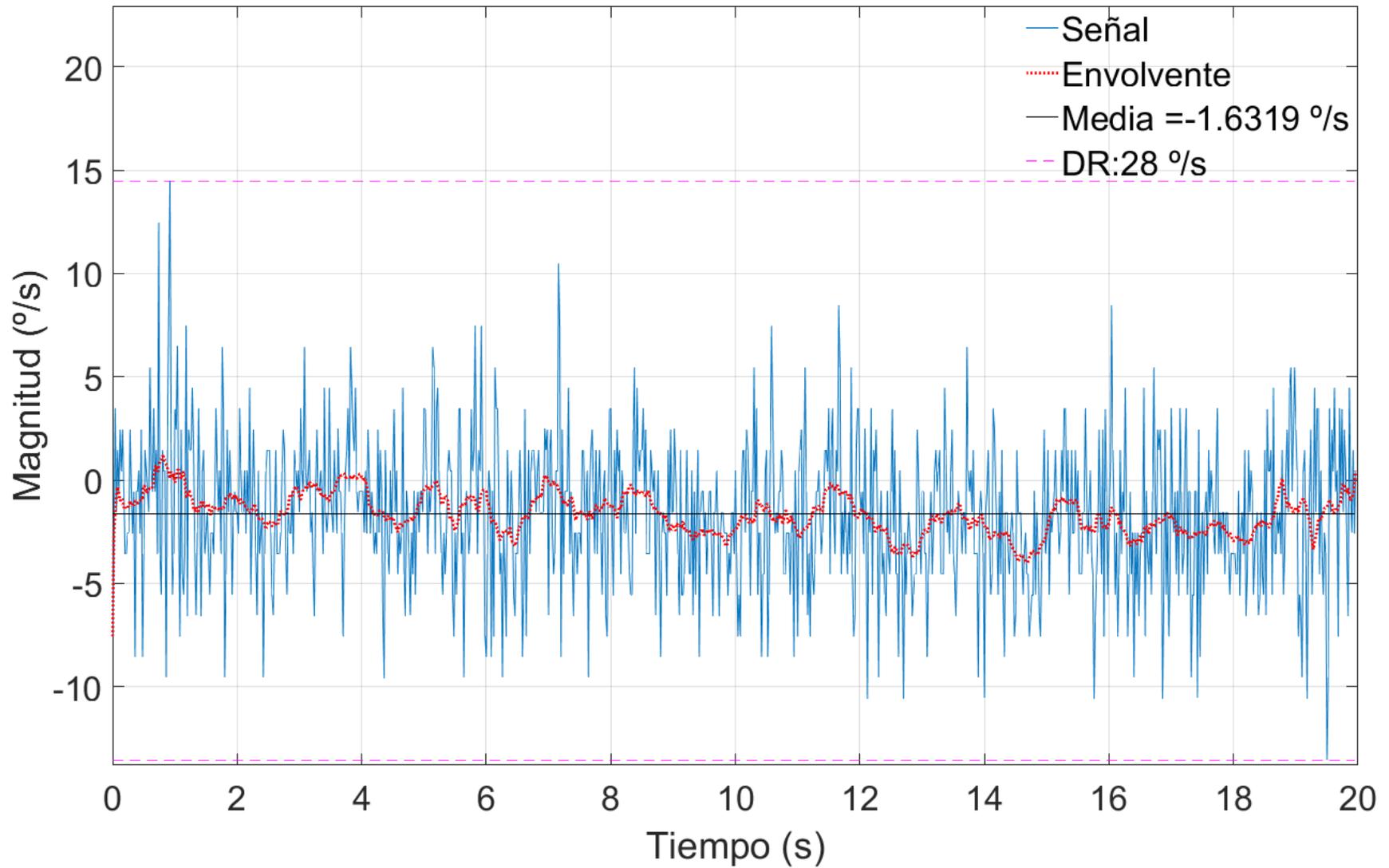


Figura C.69. Medida giroscópica en eje Y con IMU en posición inferior y motores encendidos

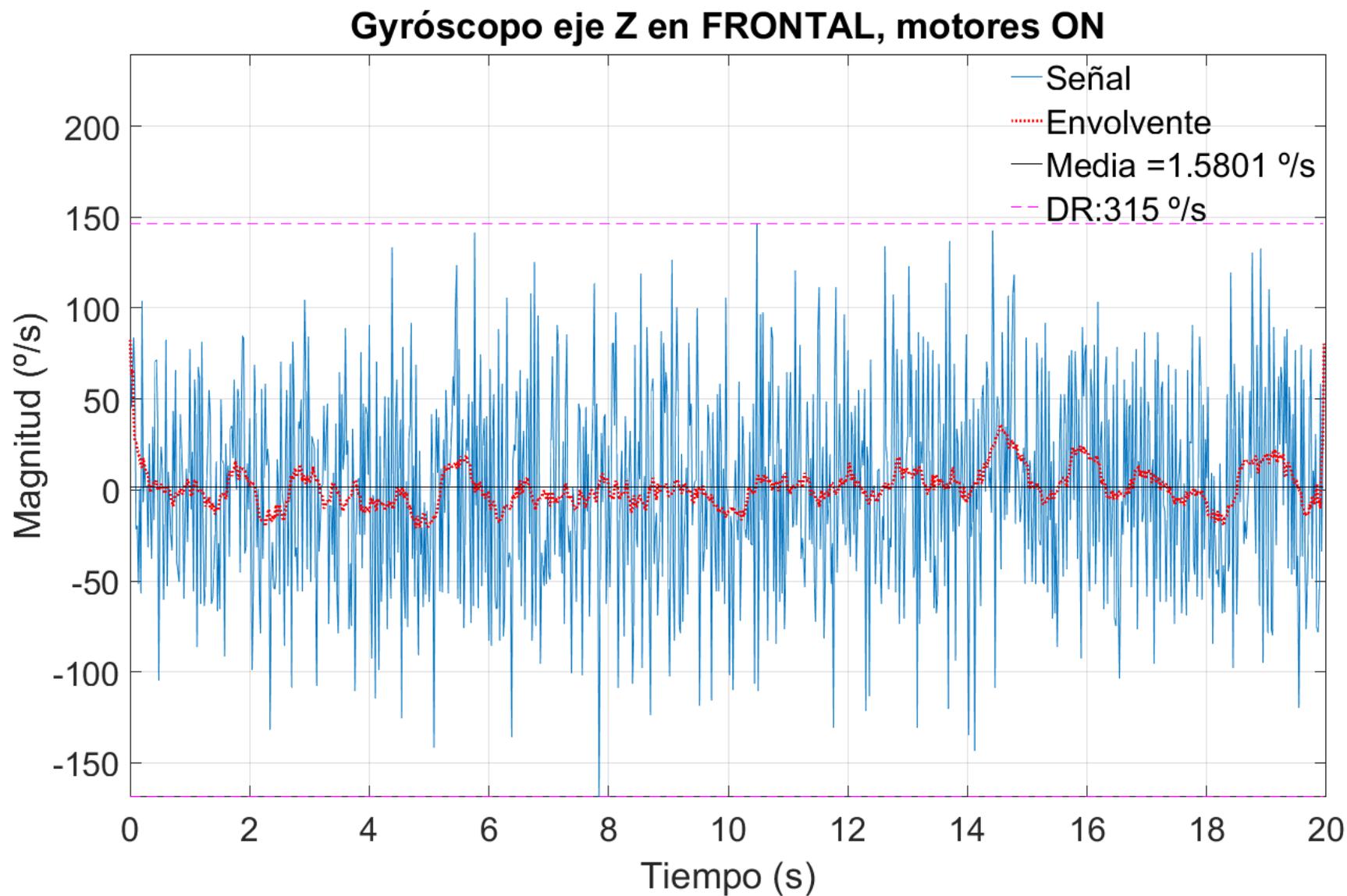


Figura C.70. Medida giroscópica en eje Z con IMU en posición frontal y motores encendidos

Gyróscopo eje Z en LATERALIZQ, motores ON

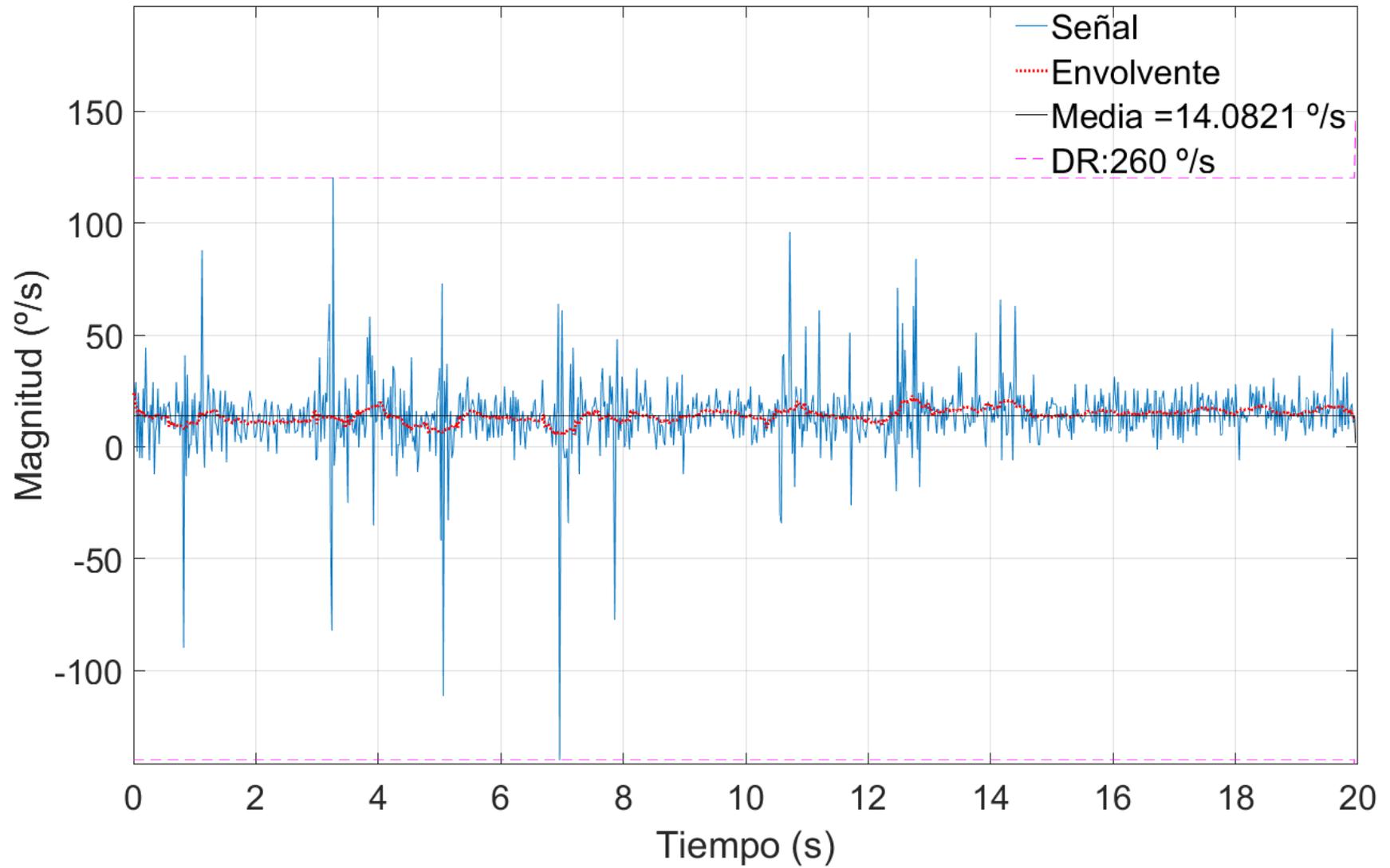


Figura C.71. Medida giroscópica en eje Z con IMU en posición lateral izquierdo y motores encendidos

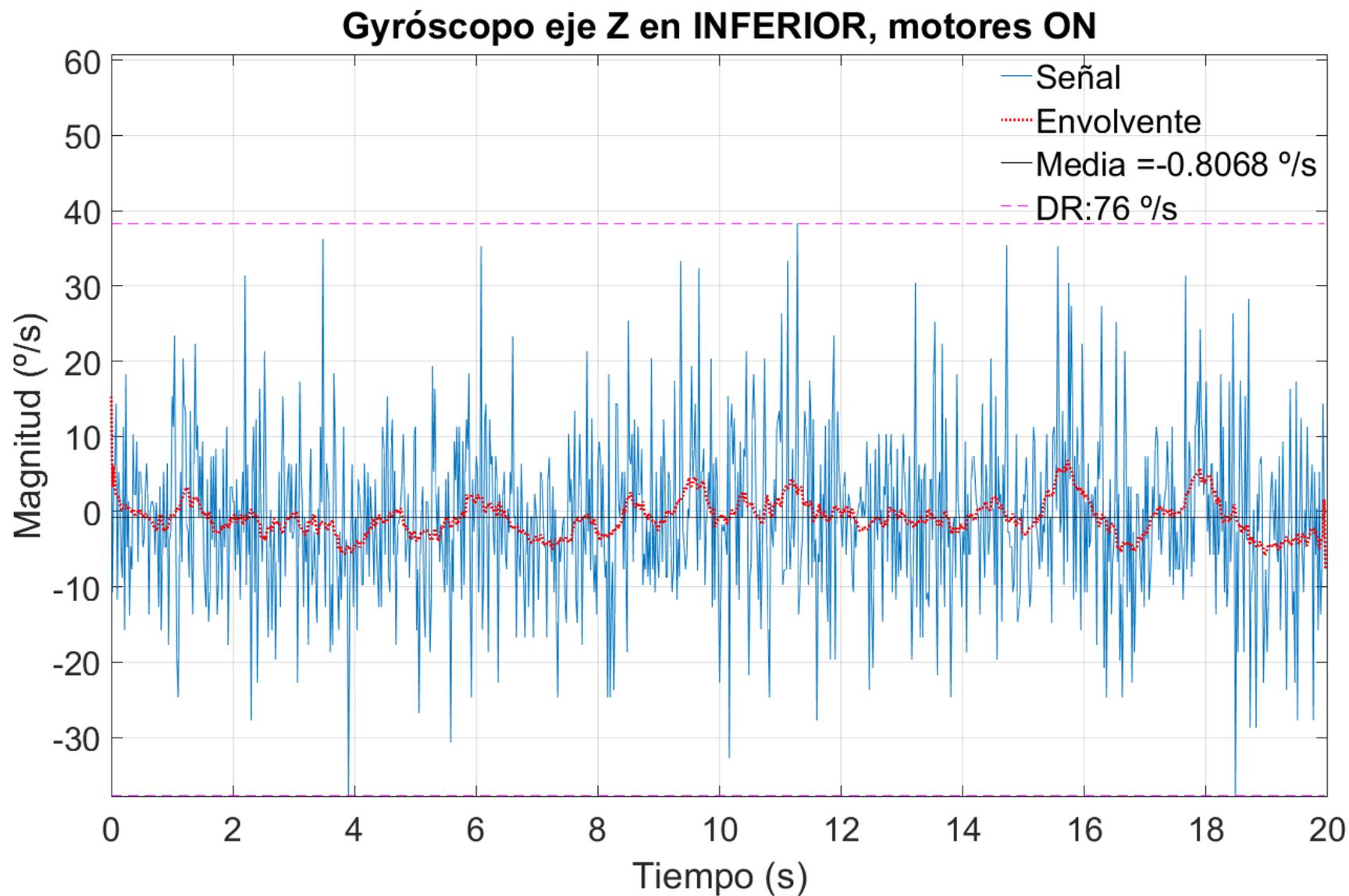


Figura C.72. Medida giroscópica en eje Z con IMU en posición frontal y motores encendidos

Acelerómetro eje X en LATERALIZQ y SIN METAL (peor caso)

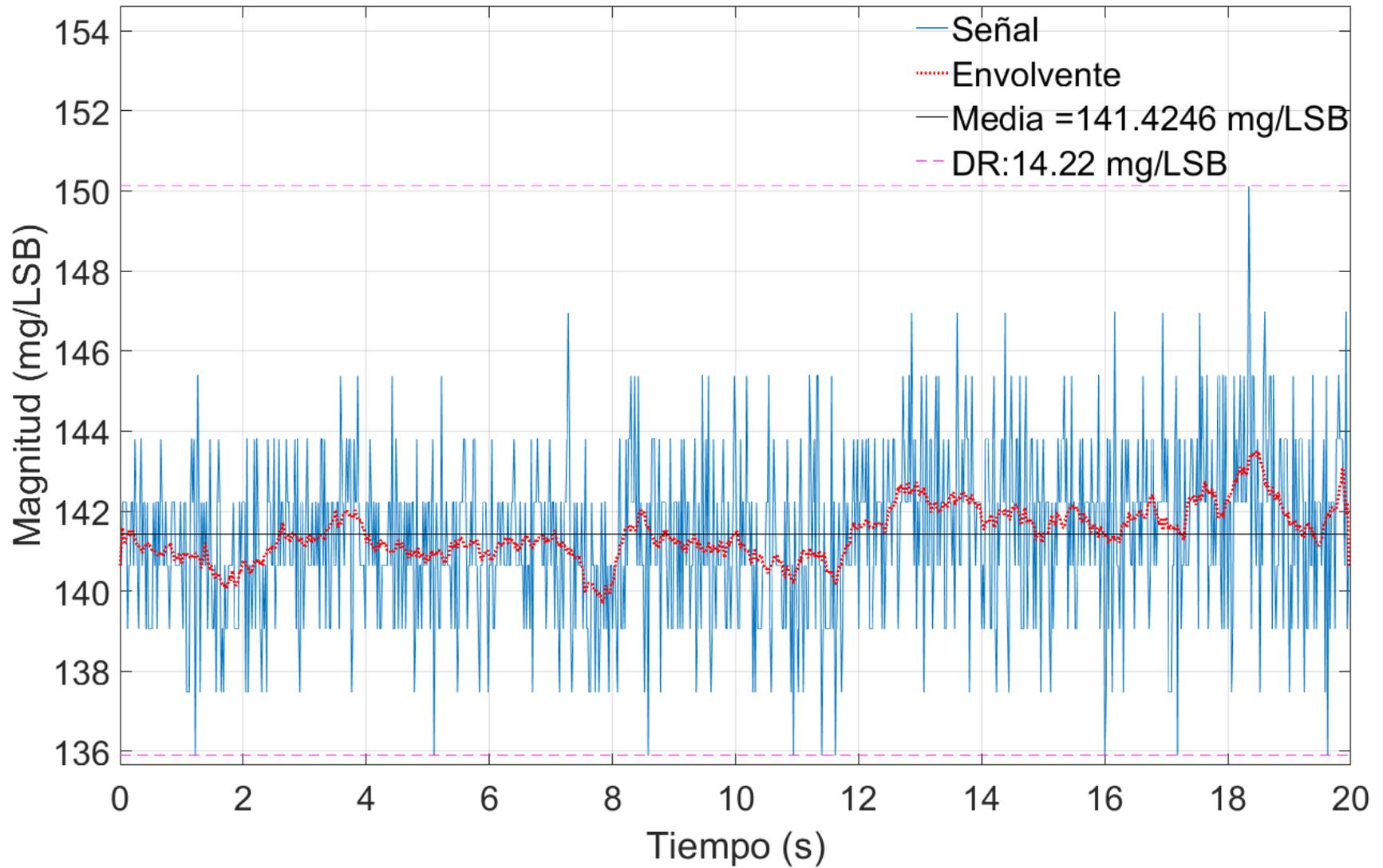


Figura C.73. Medida acelerométrica en eje X sin metal (peor caso)

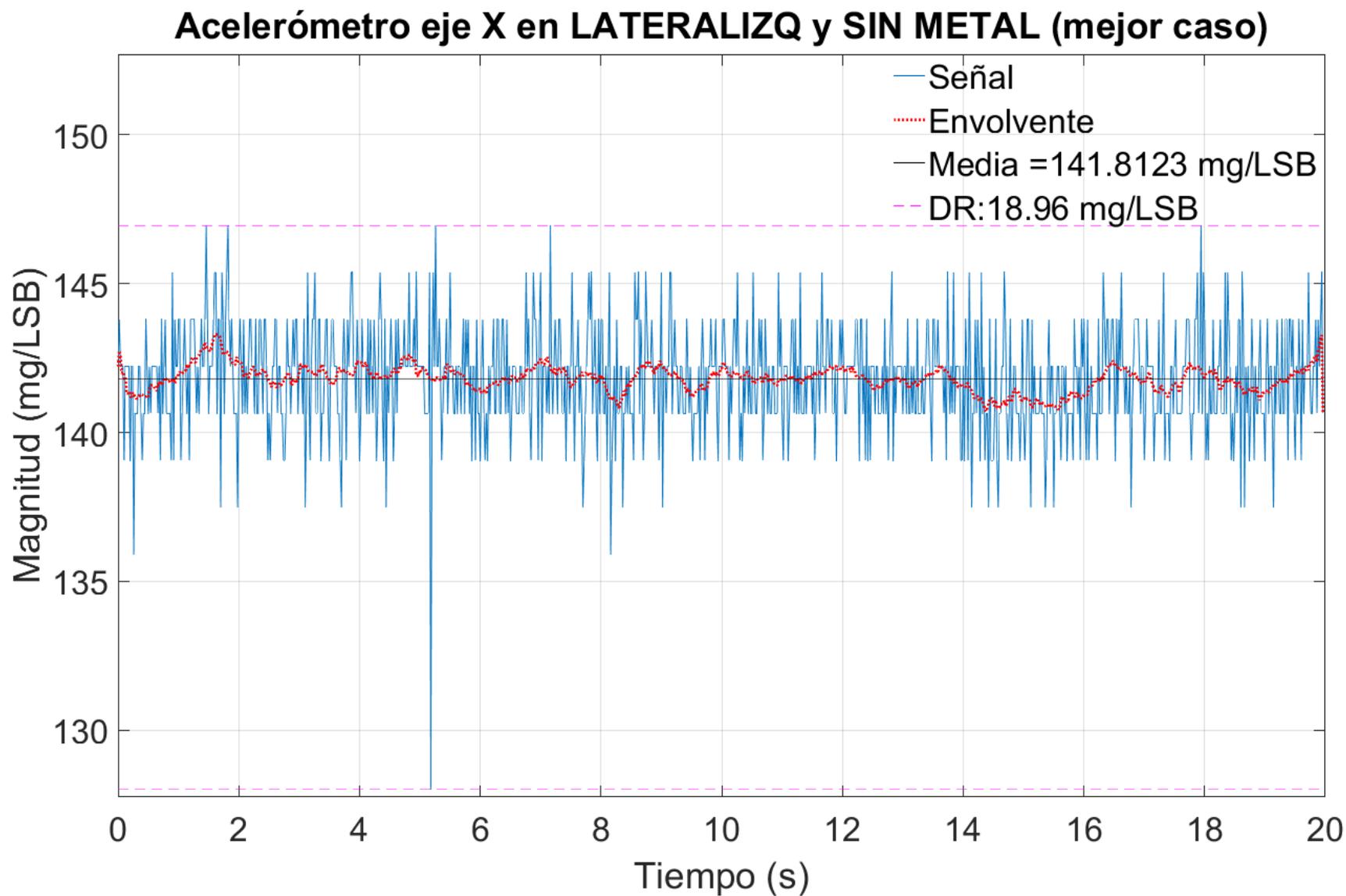


Figura C.74. Medida acelerométrica en eje X sin metal (mejor caso)

Acelerómetro eje Y en LATERALIZQ y SIN METAL (peor caso)

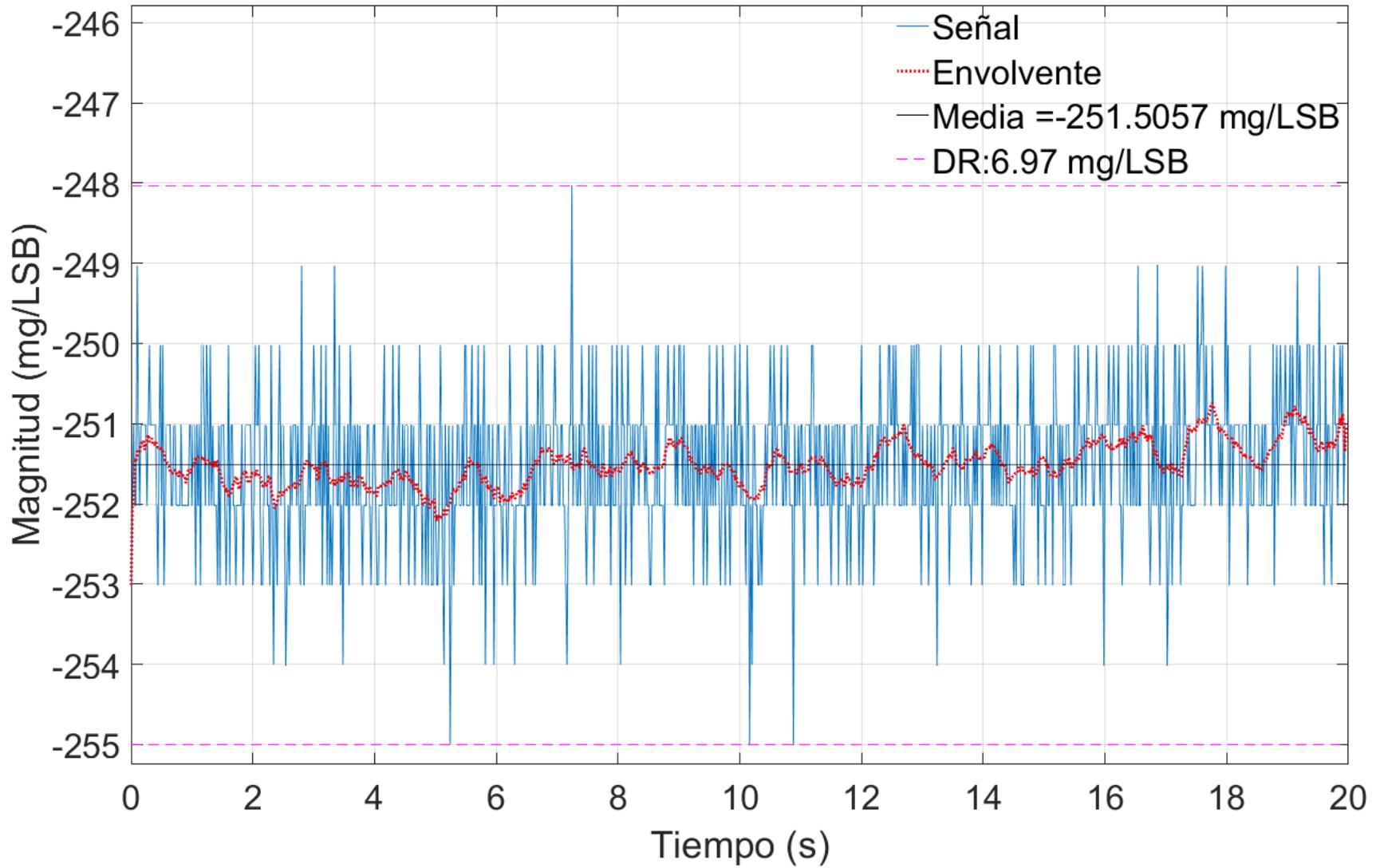


Figura C.75. Medida acelerométrica en eje Y sin metal (peor caso)

Acelerómetro eje Y en LATERALIZQ y SIN METAL (mejor caso)

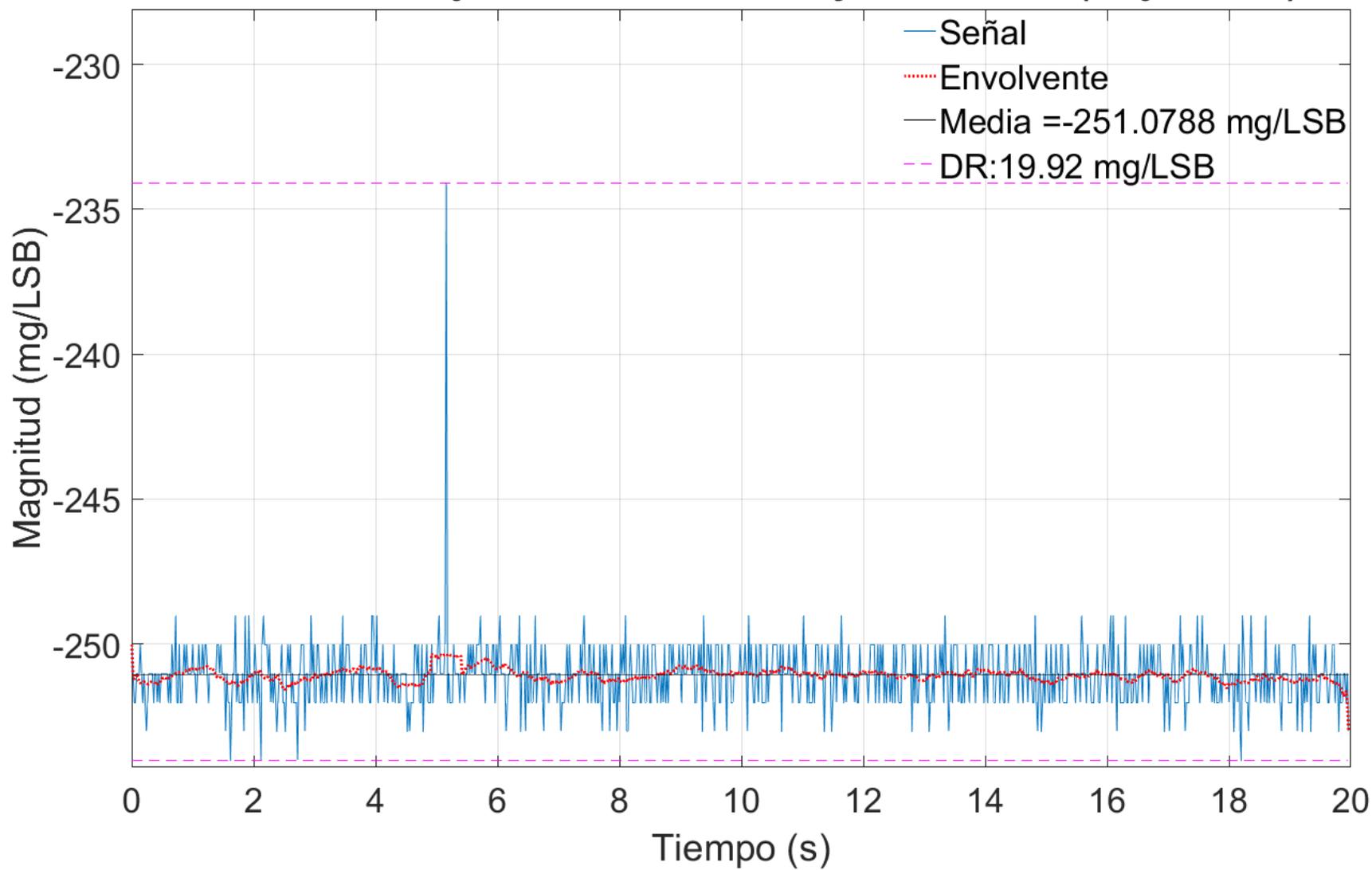


Figura C.76. Medida acelerométrica en eje Y sin metal (mejor caso)

Acelerómetro eje Z en LATERALIZQ y SIN METAL (peor caso)

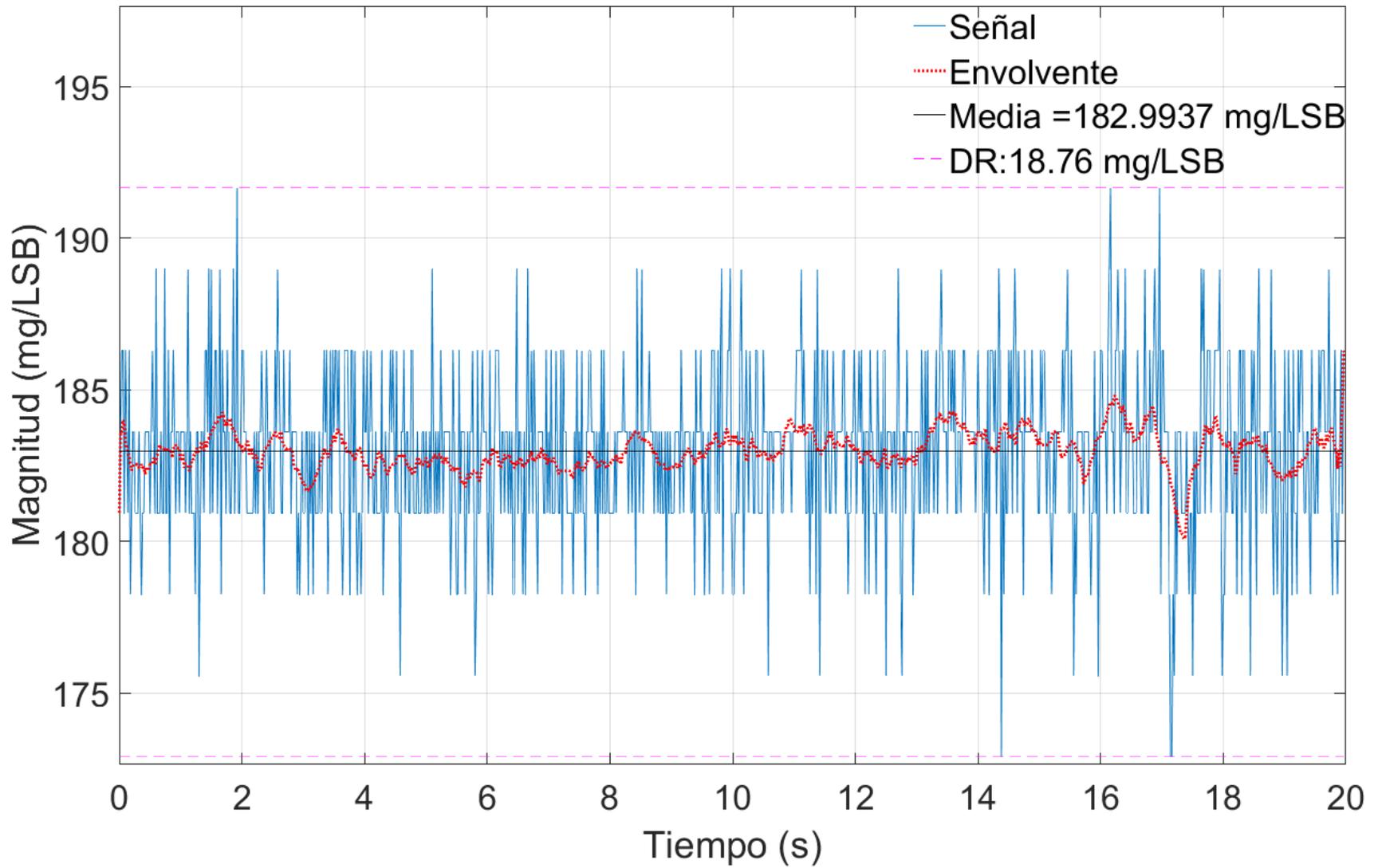


Figura C.77. Medida acelerométrica en eje Z sin metal (peor caso)

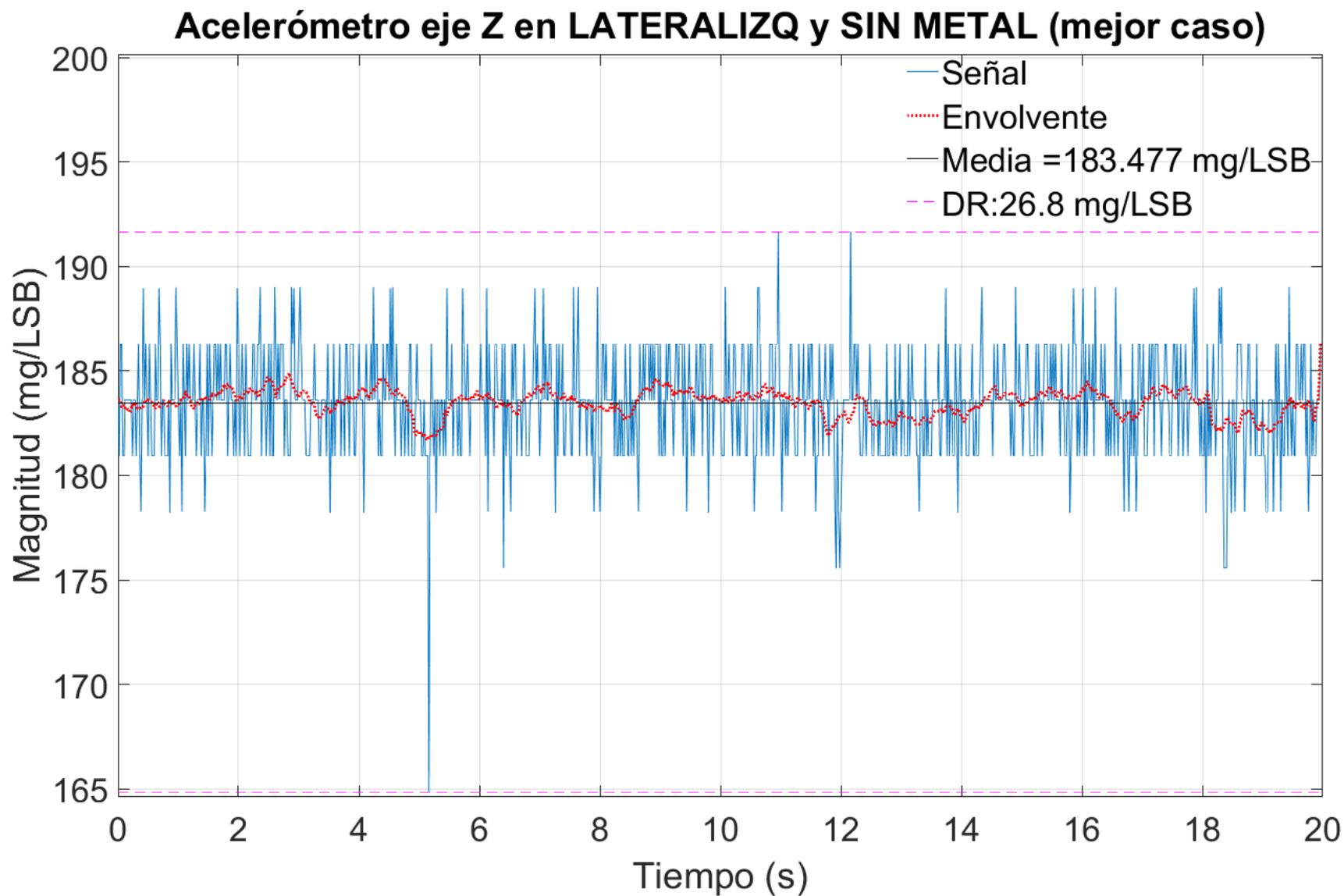


Figura C.78. Medida acelerométrica en eje Z sin metal (mejor caso)

Acelerómetro eje X en LATERALIZQ y CON METAL (peor caso)

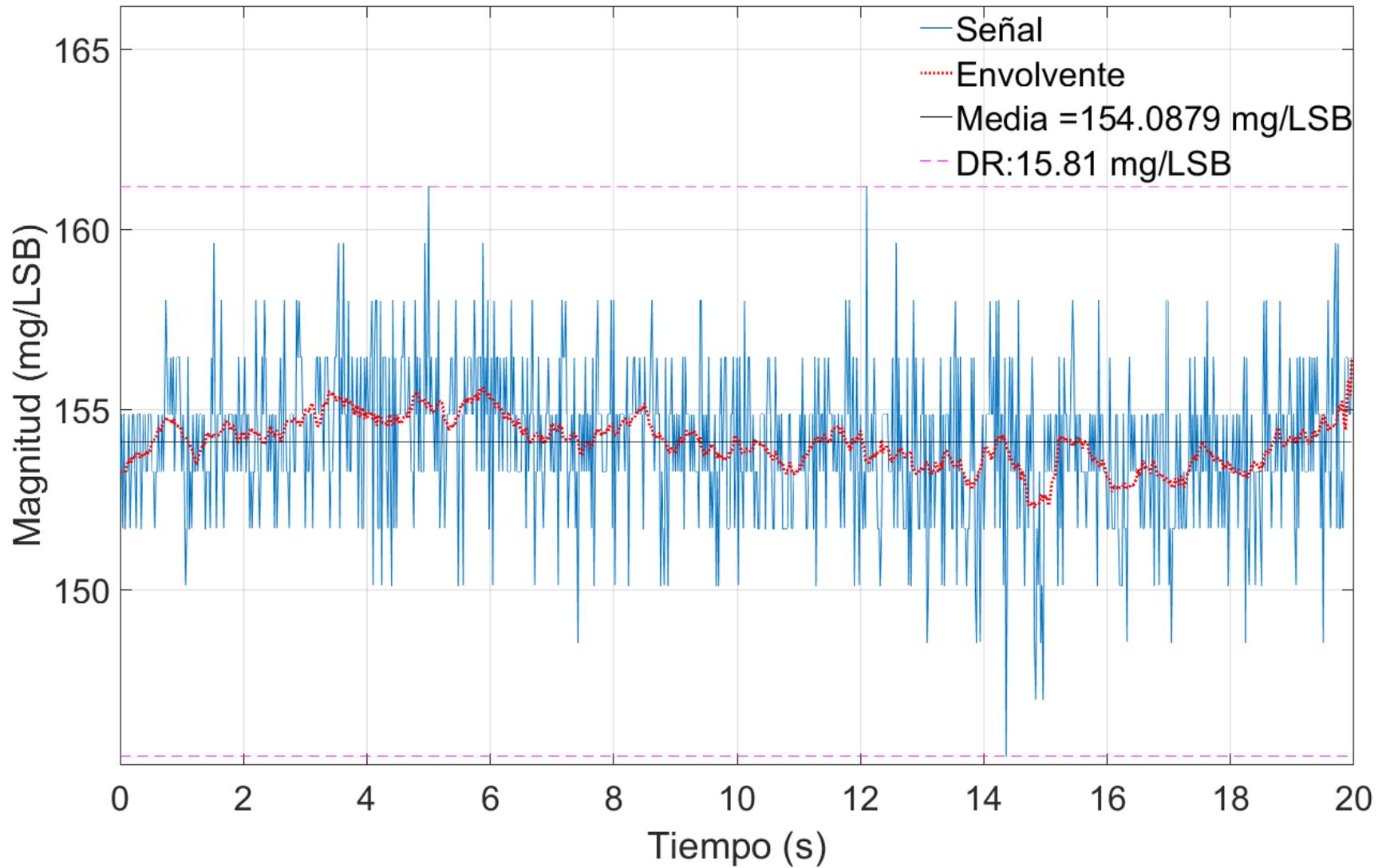


Figura C.79. Medida acelerométrica en eje X con metal (peor caso)

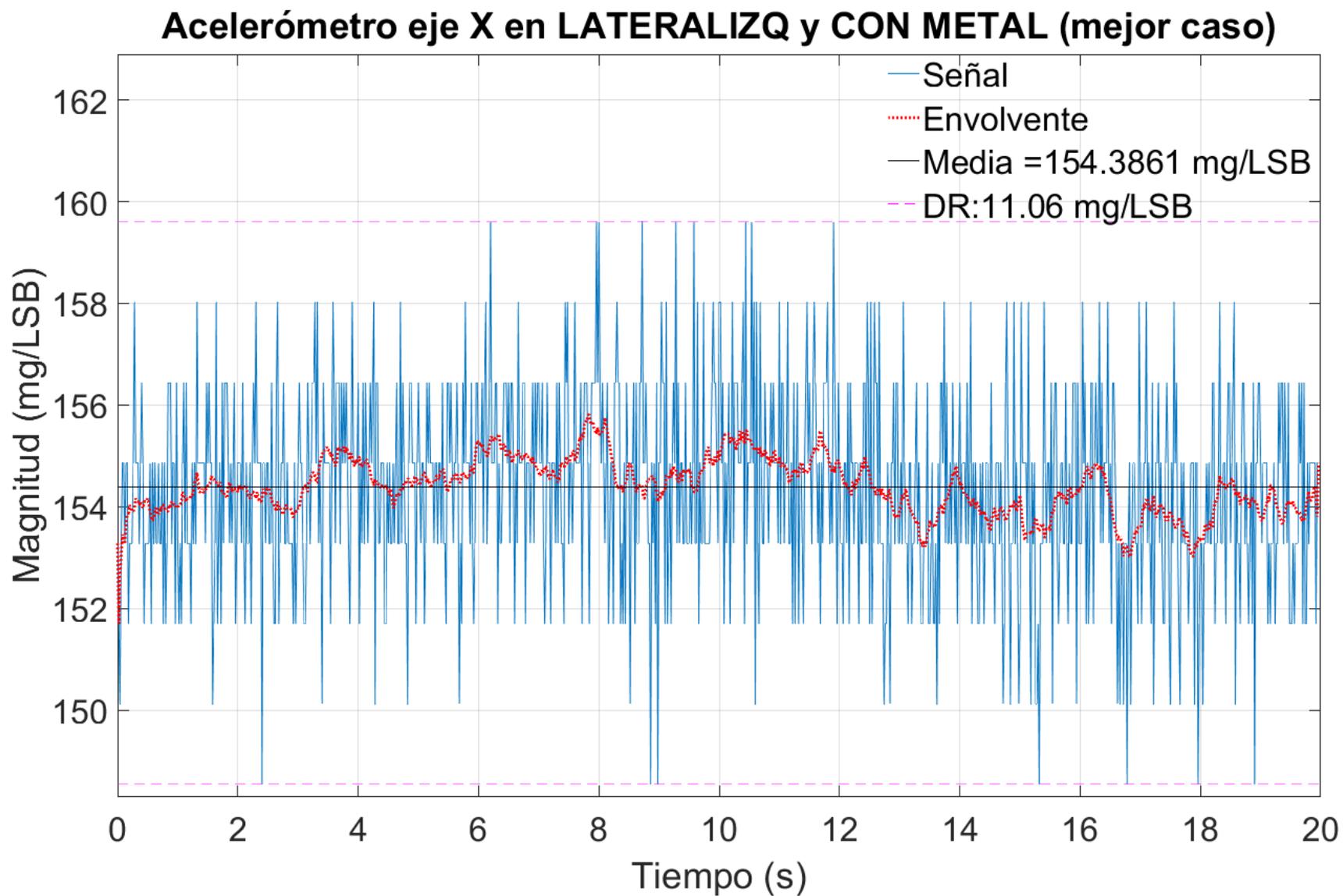


Figura C.80. Medida acelerométrica en eje X con metal (mejor caso)

Acelerómetro eje Y en LATERALIZQ y CON METAL (peor caso)

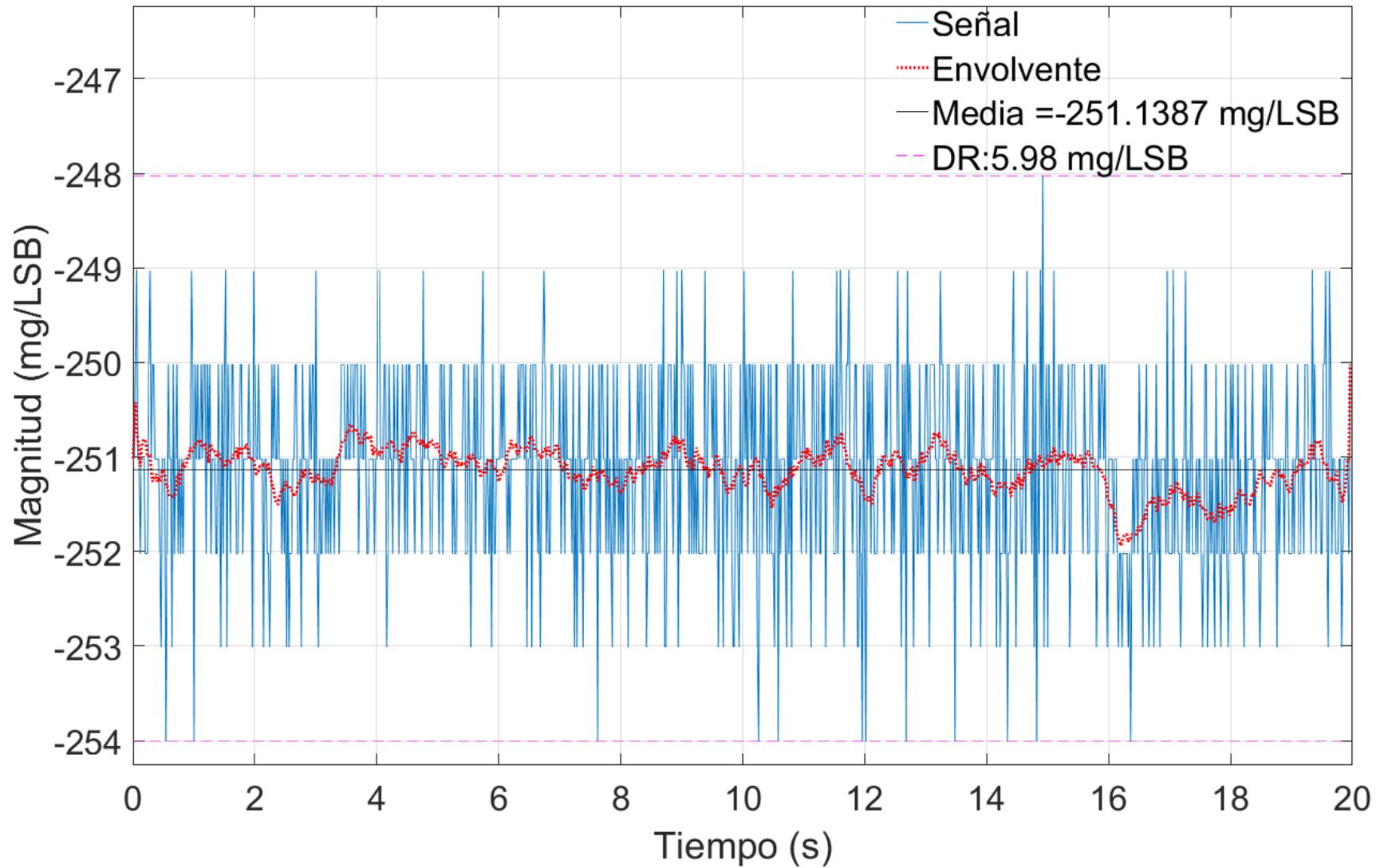


Figura C.81. Medida acelerométrica en eje Y con metal (peor caso)

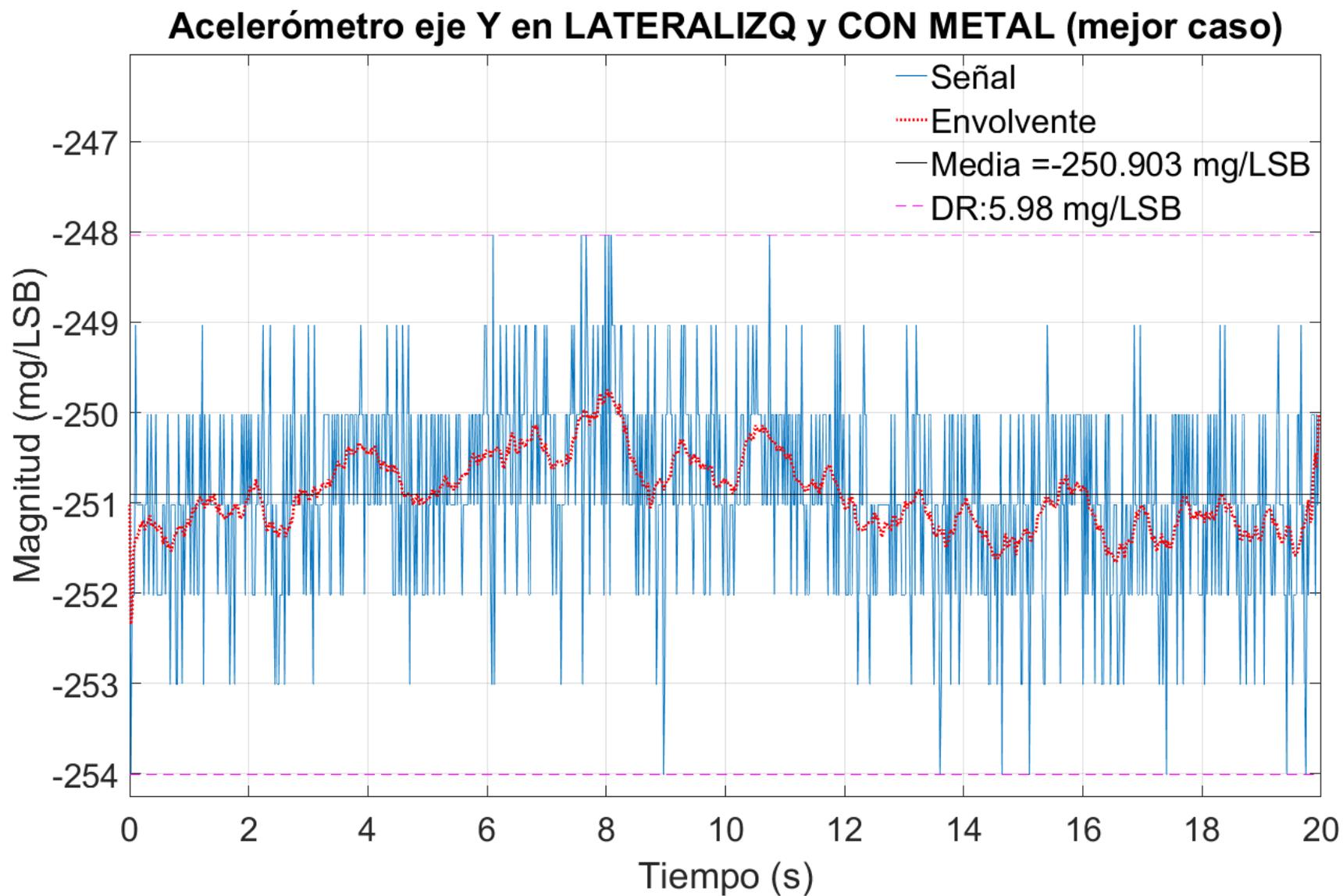


Figura C.82. Medida acelerométrica en eje Y con metal (mejor caso)

Acelerómetro eje Z en LATERALIZQ y CON METAL (peor caso)

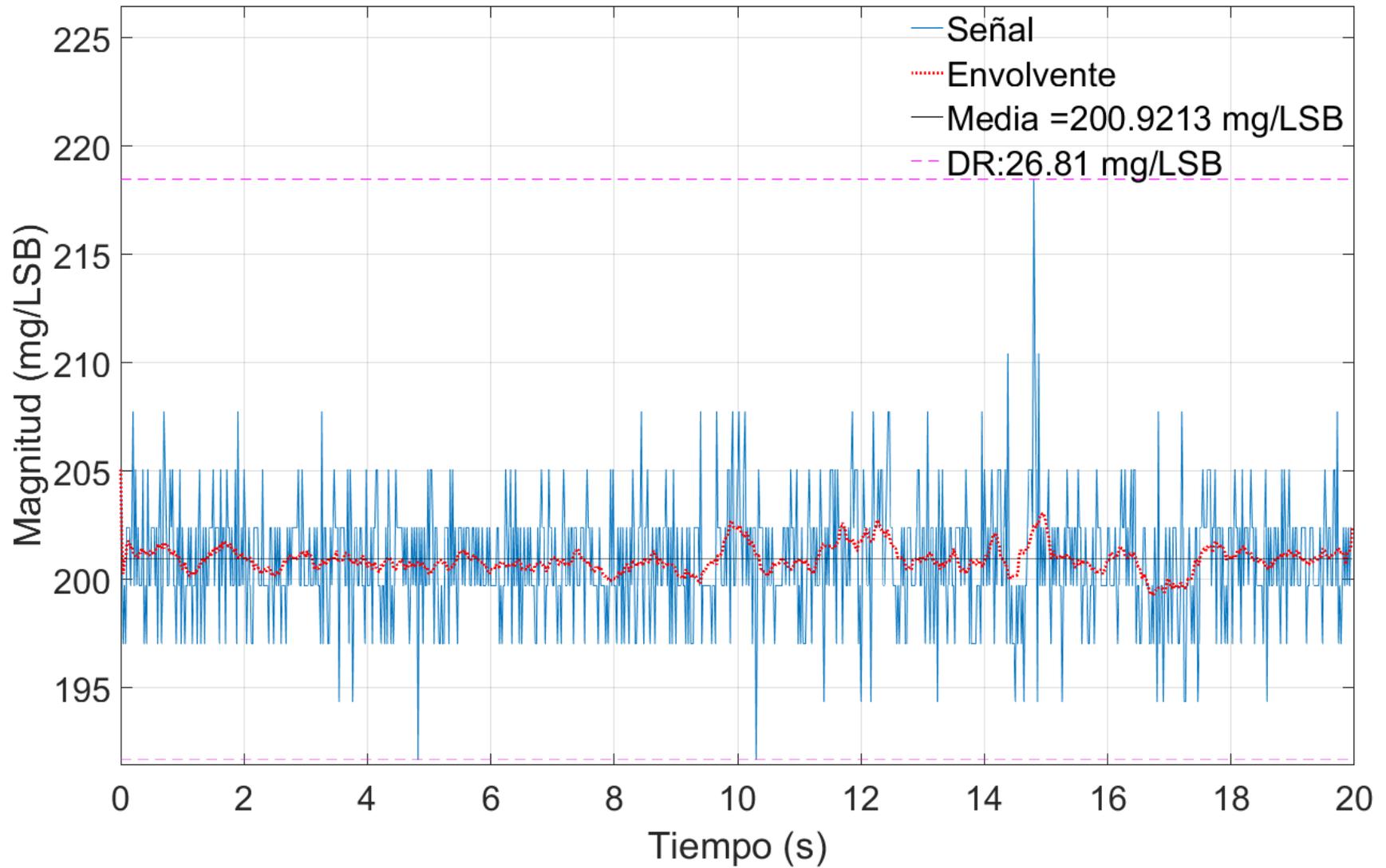


Figura C.83. Medida acelerométrica en eje Z con metal (peor caso)

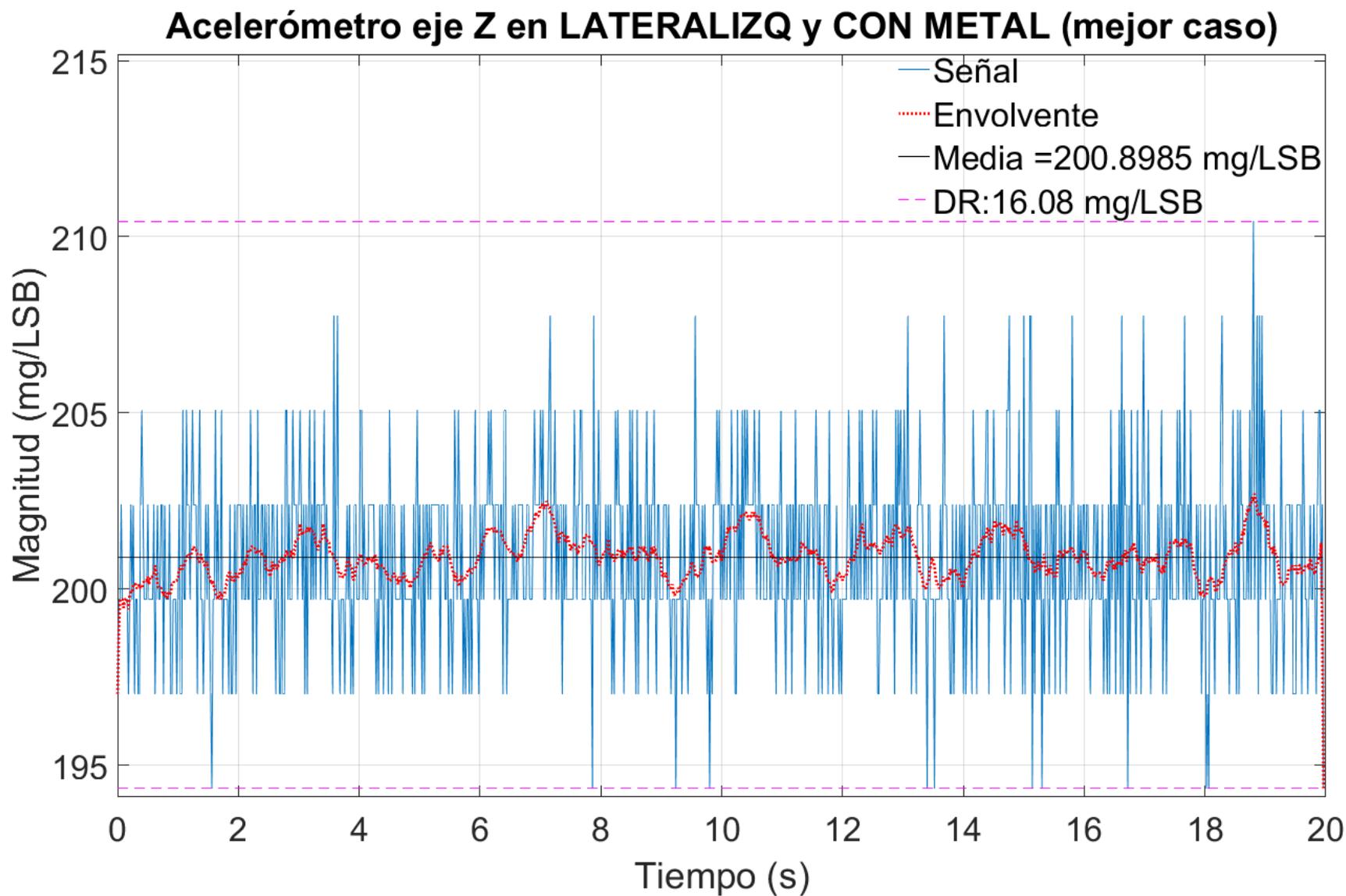


Figura C.84. Medida acelerométrica en eje Z con metal (mejor caso)

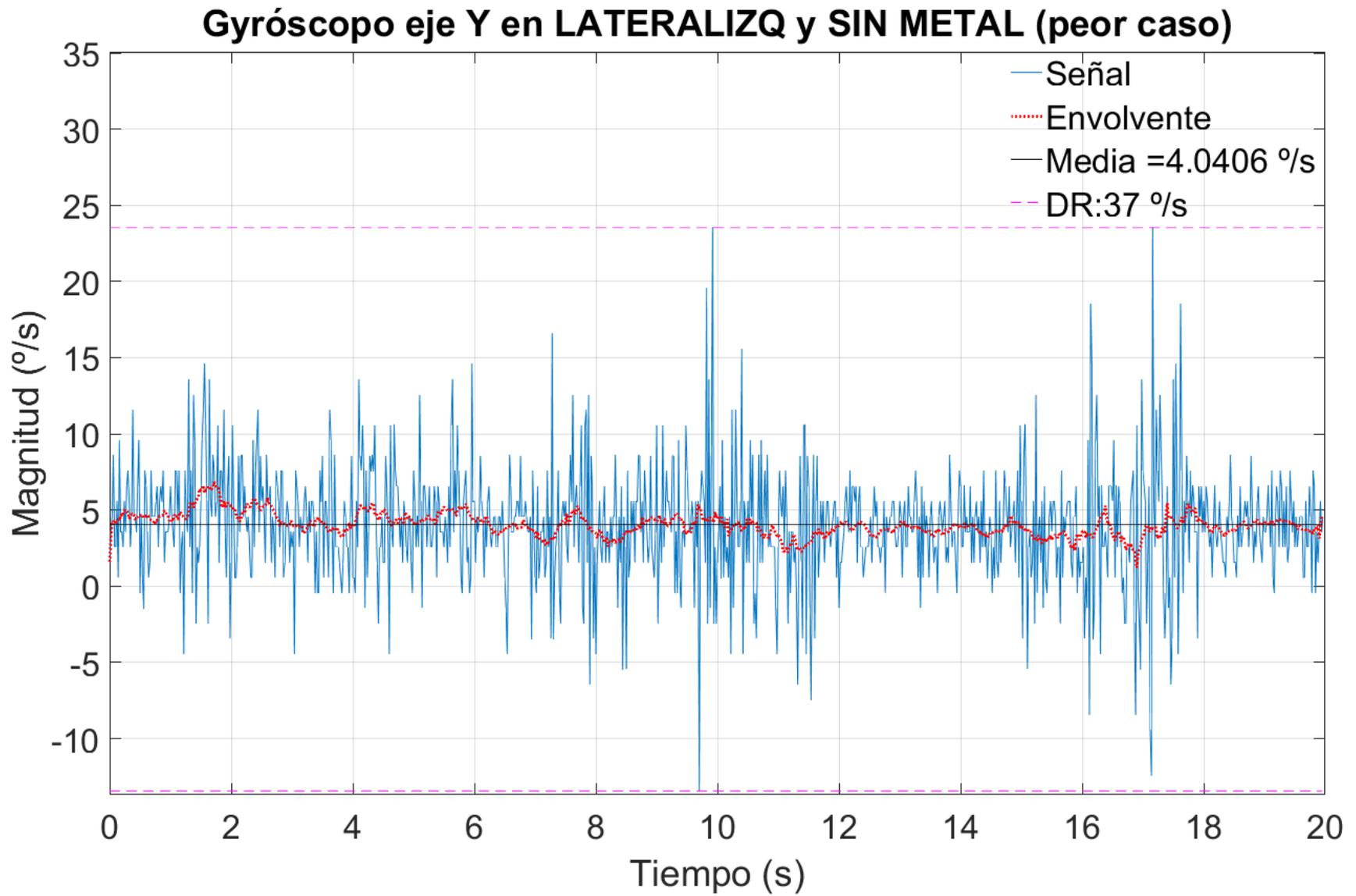


Figura C.85. Medida giroscópica en eje X sin metal (peor caso)

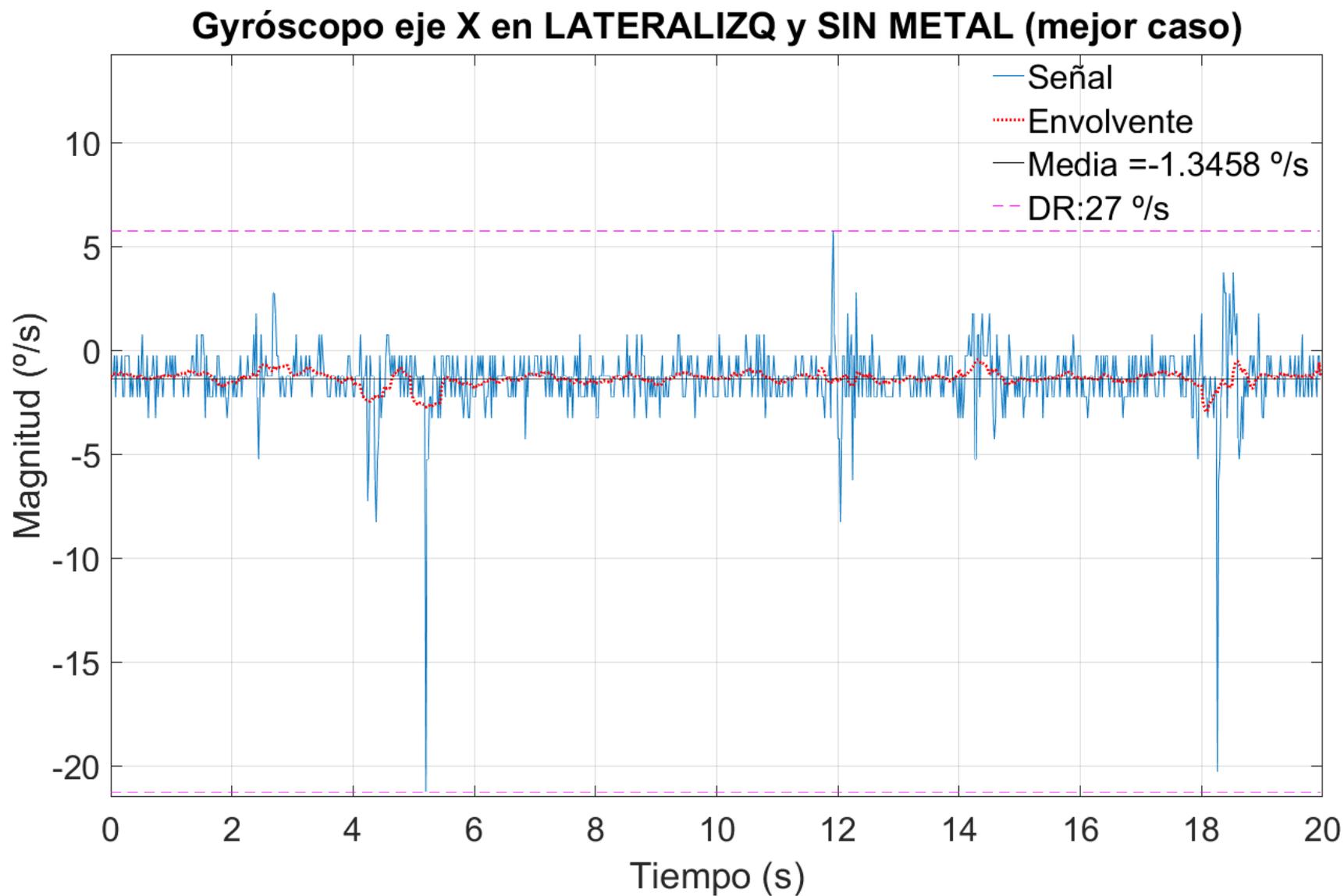


Figura C.86. Medida giroscópica en eje X sin metal (mejor caso)

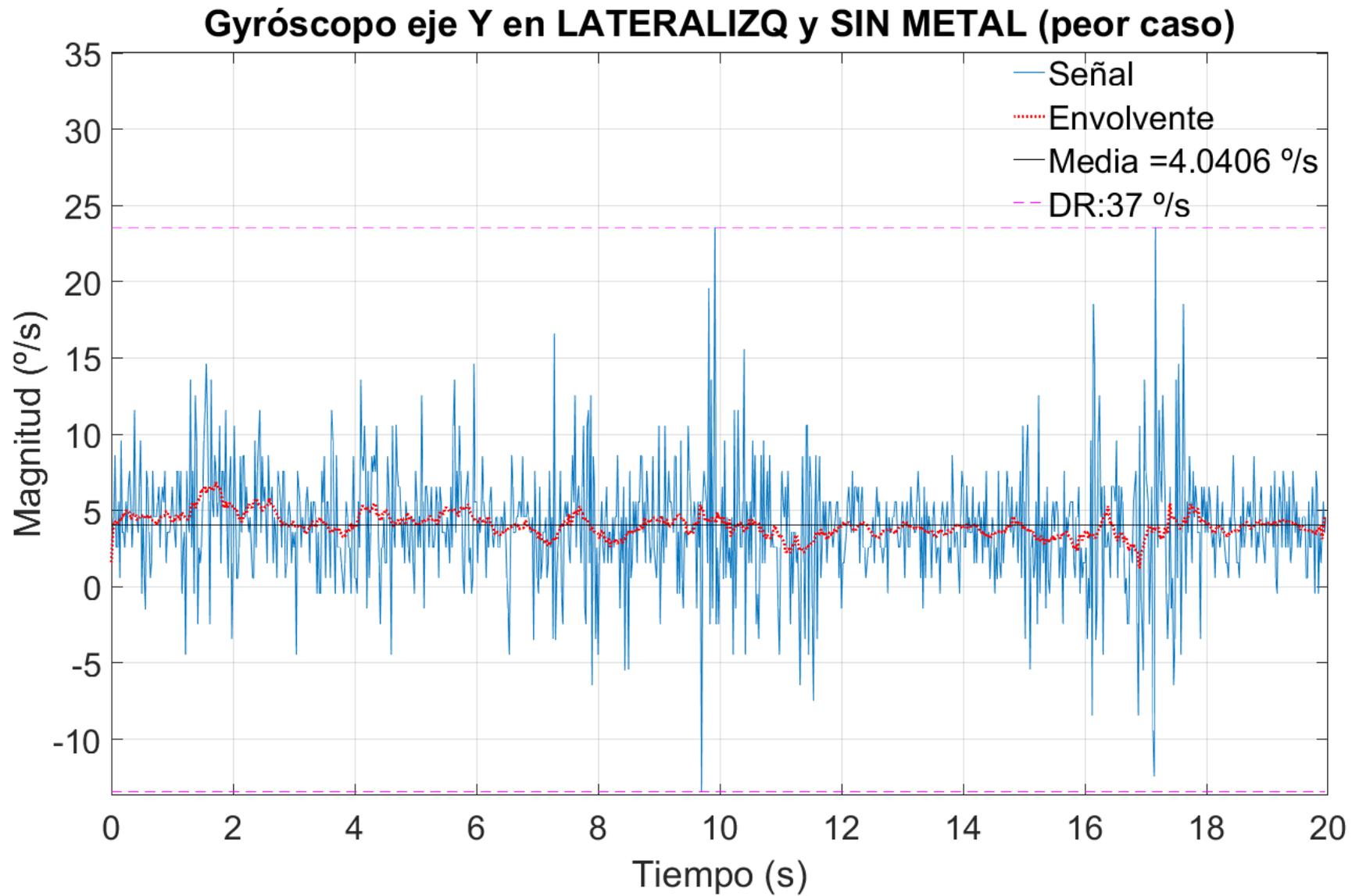


Figura C.87. Medida giroscópica en eje Y sin metal (peor caso)

Gyrómetro eje Y en LATERALIZQ y SIN METAL (mejor caso)

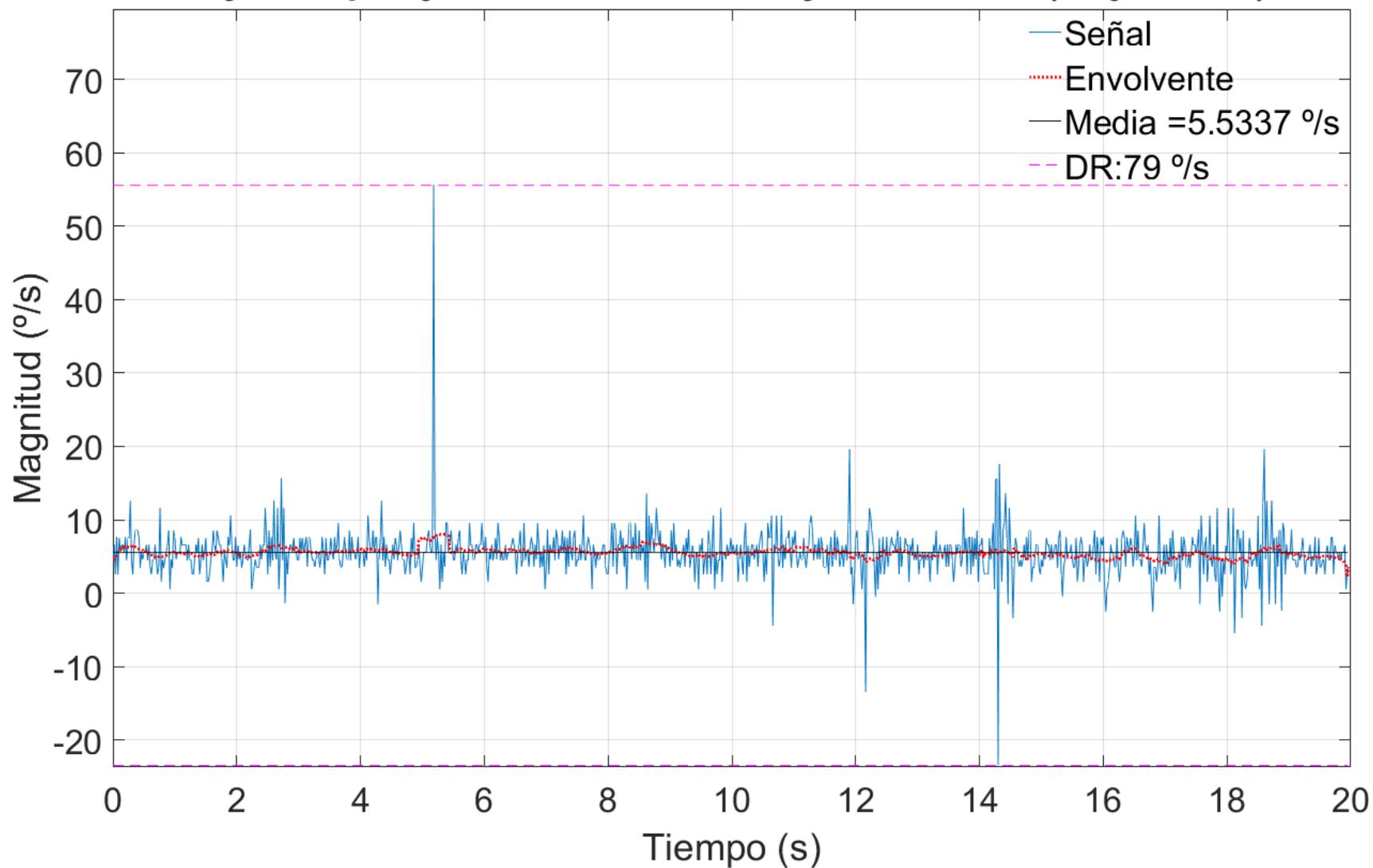


Figura C.88. Medida giroscópica en eje Y sin metal (mejor caso)

Gyrómetro eje Z en LATERALIZQ y SIN METAL (peor caso)

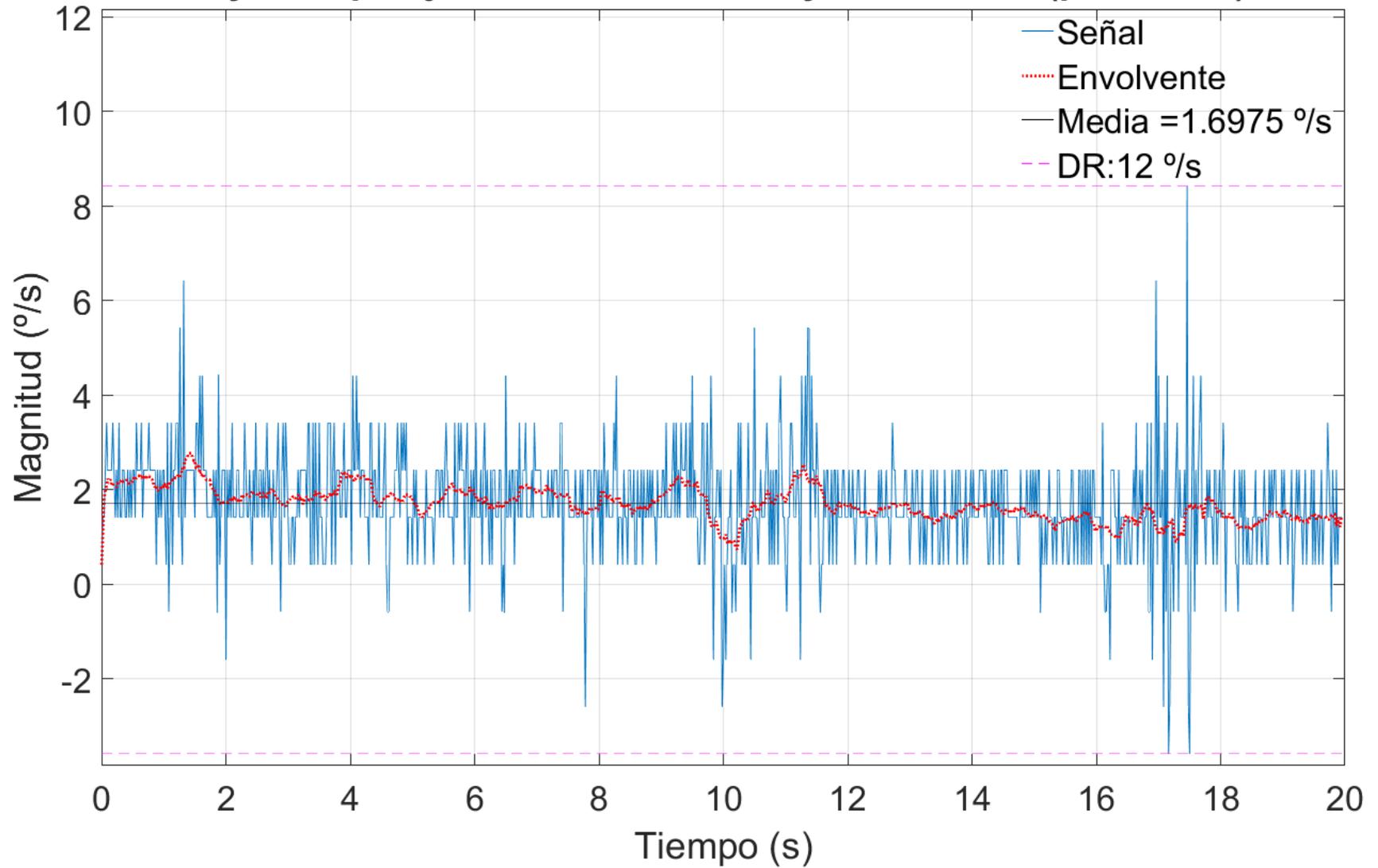


Figura C.89. Medida giroscópica en eje Z sin metal (peor caso)

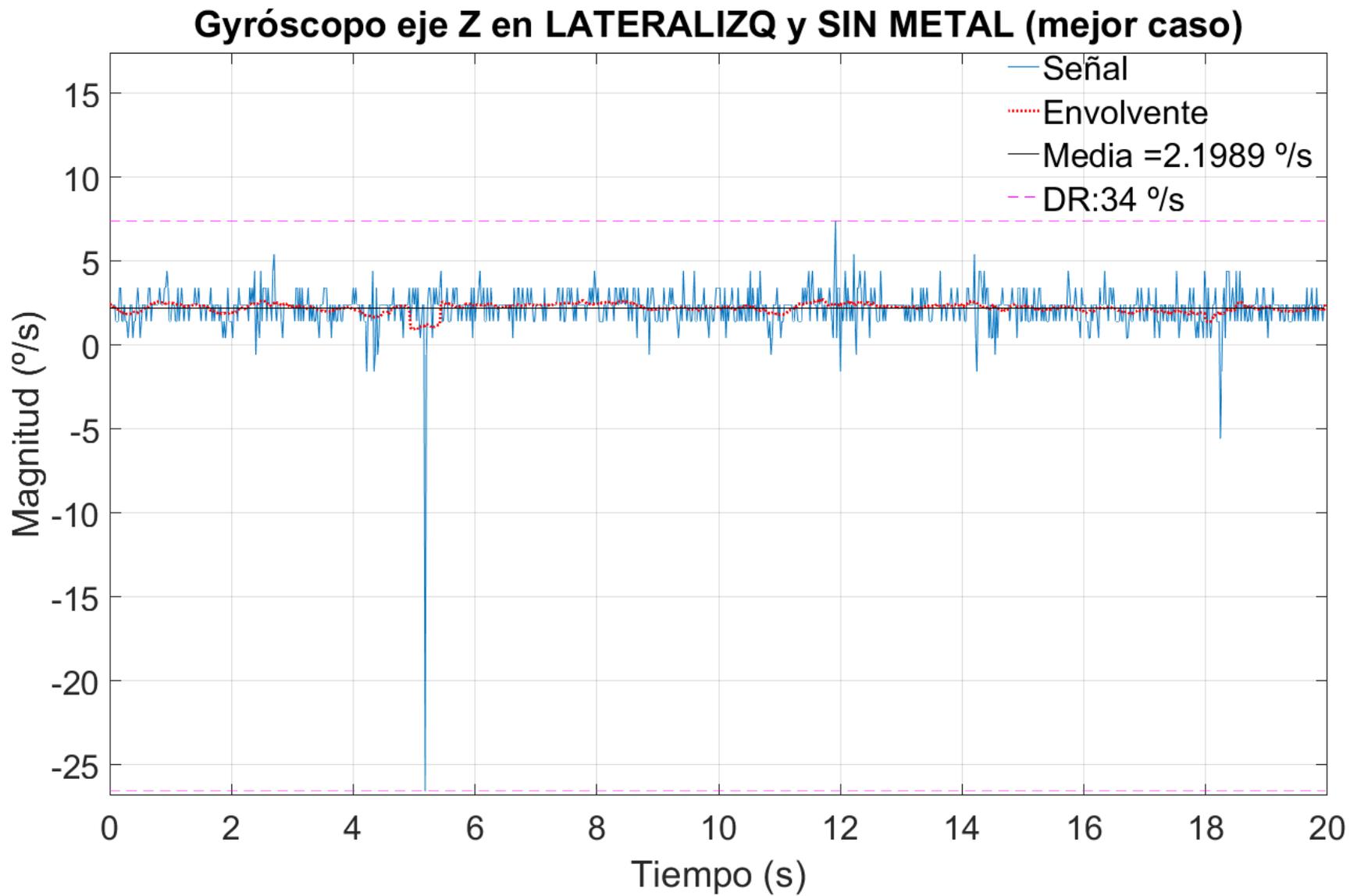


Figura C.90. Medida giroscópica en eje Z sin metal (mejor caso)

Gyrómetro eje X en LATERALIZQ y CON METAL (peor caso)

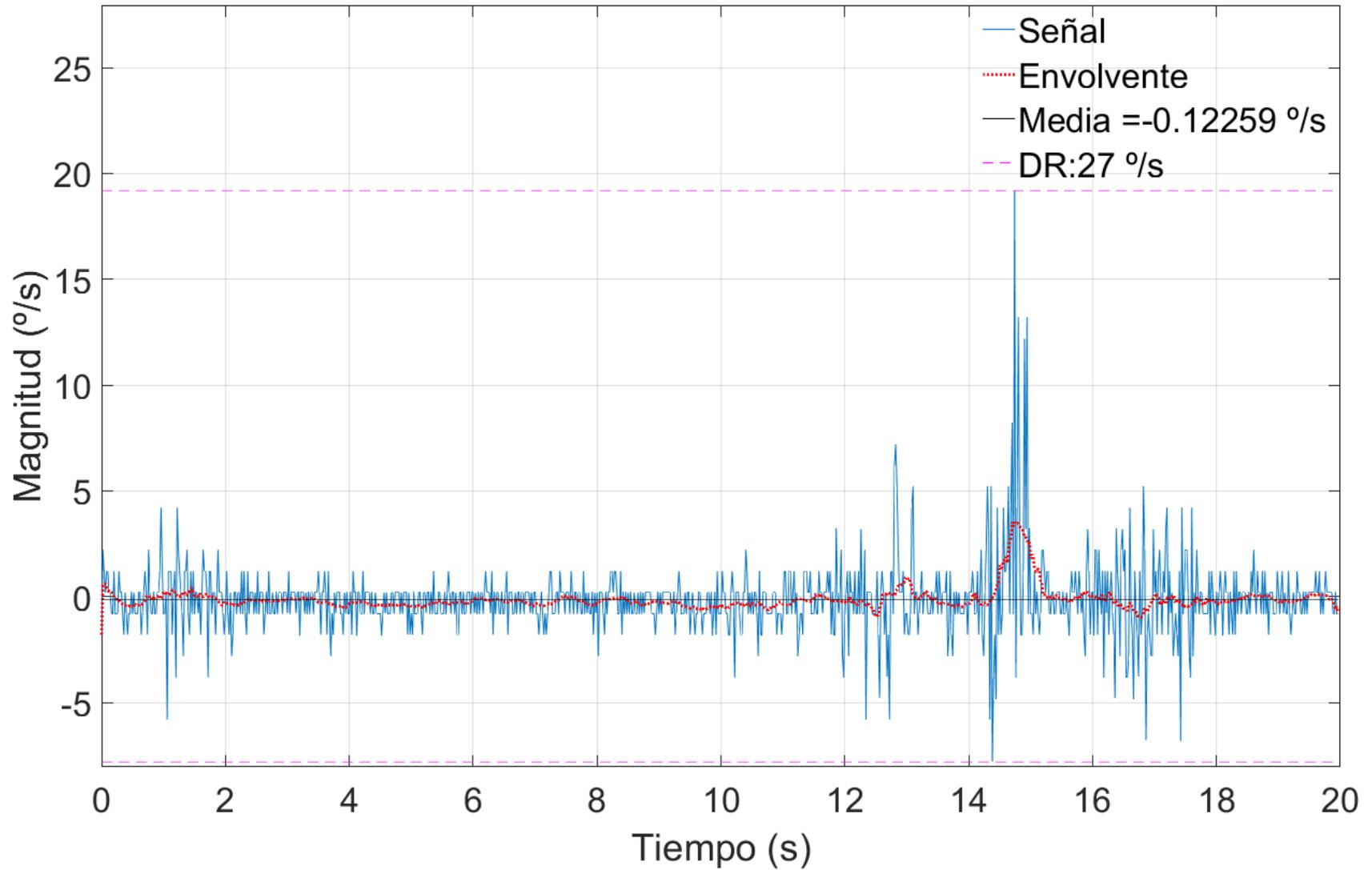


Figura C.91. Medida giroscópica en eje X con metal (peor caso)

Gyrómetro eje X en LATERALIZQ y CON METAL (mejor caso)

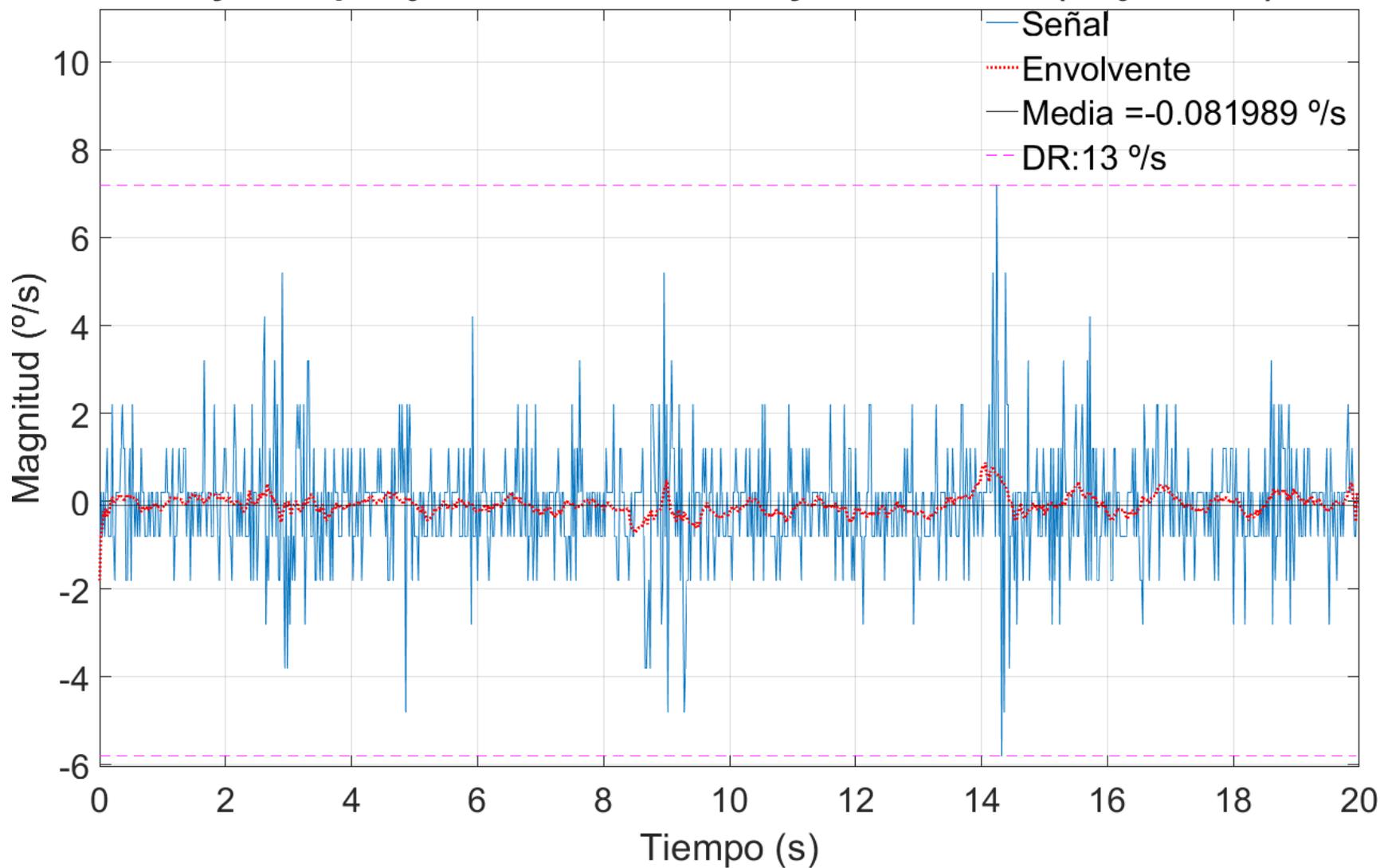


Figura C.92. Medida giroscópica en eje X con metal (mejor caso)

Gyrómetro eje Y en LATERALIZQ y CON METAL (peor caso)

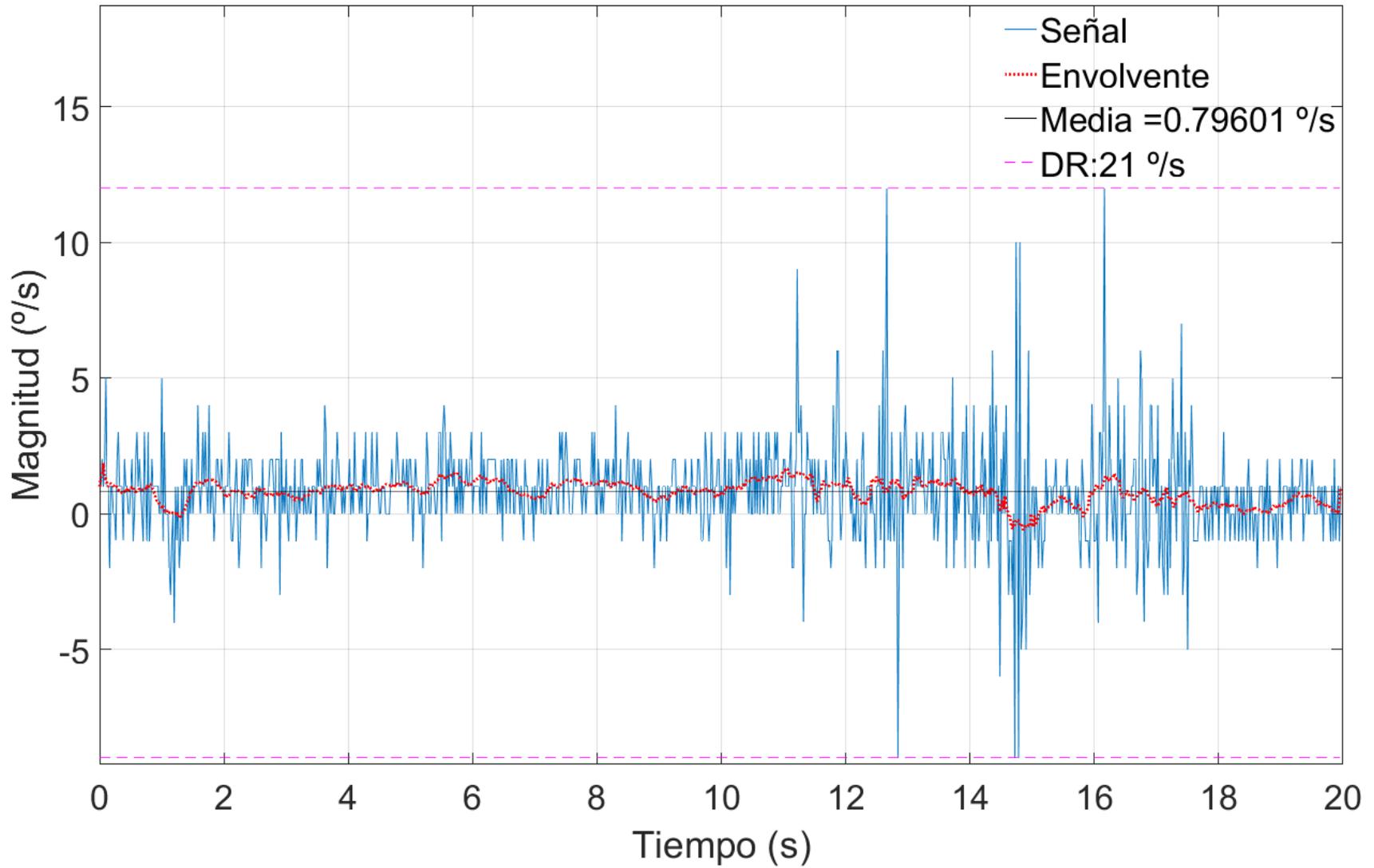


Figura C.93. Medida giroscópica en eje Y con metal (peor caso)

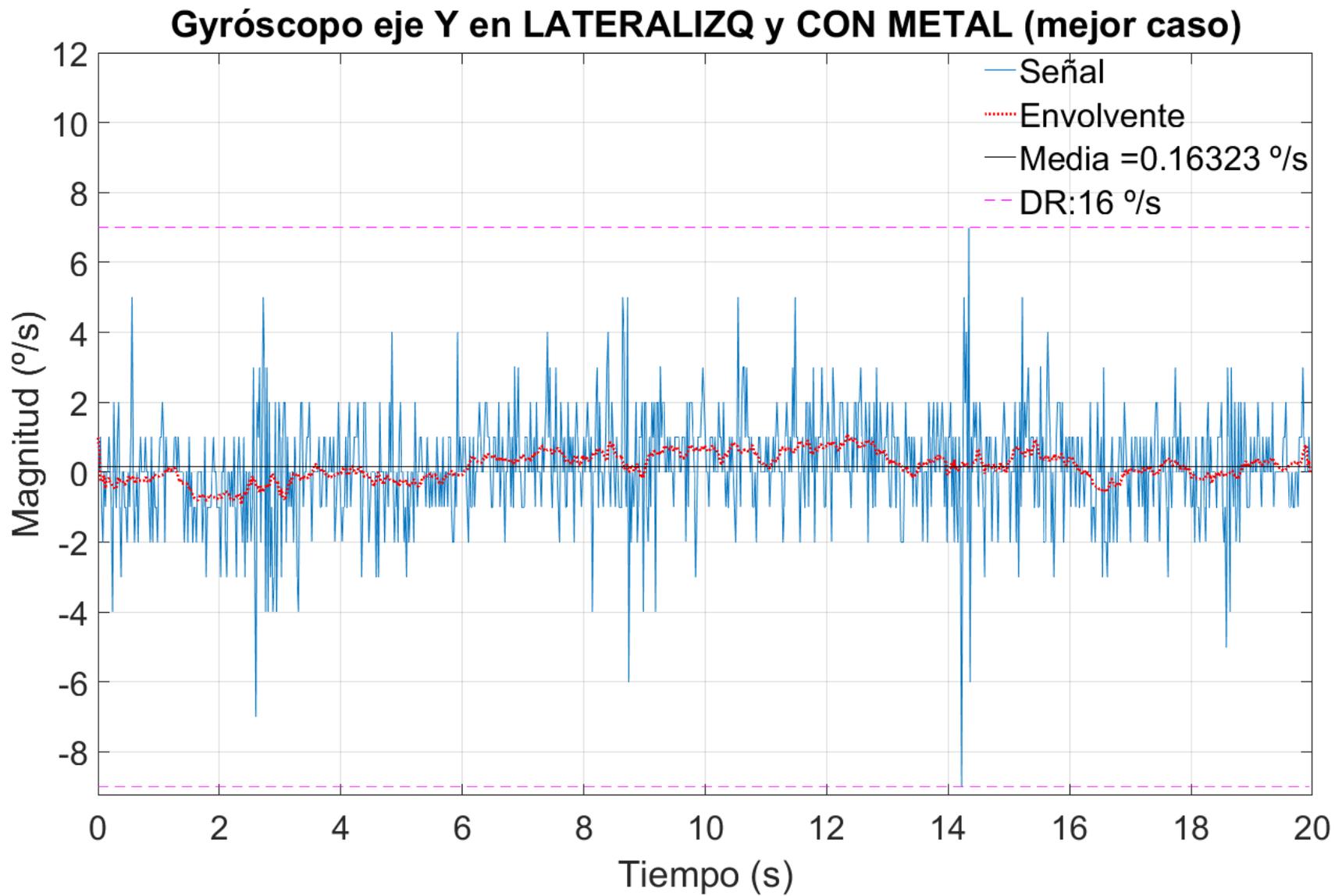


Figura C.94. Medida giroscópica en eje Y con metal (mejor caso)

Gyrómetro eje Z en LATERALIZQ y CON METAL (peor caso)

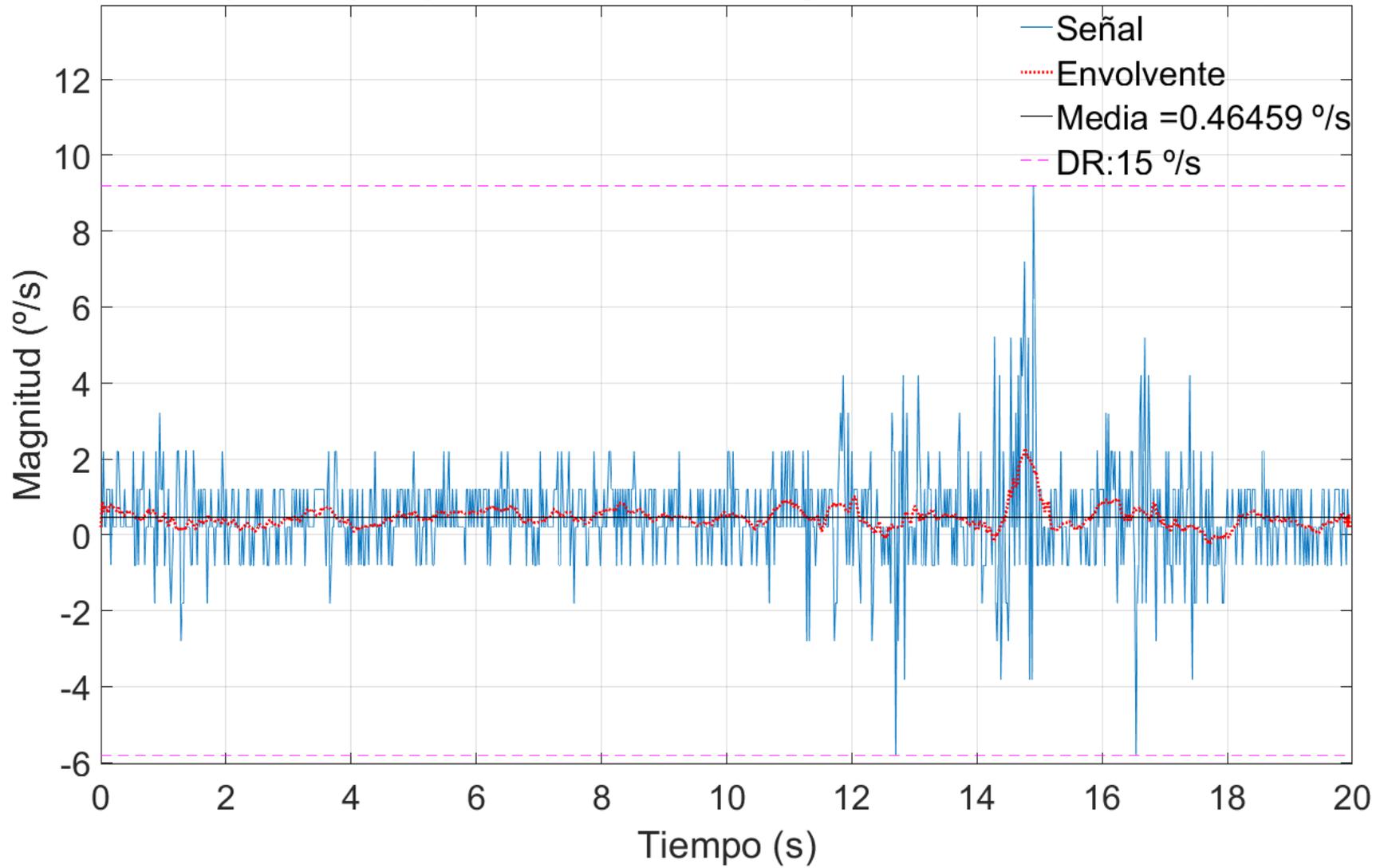


Figura C.95. Medida giroscópica en eje Z con metal (peor caso)

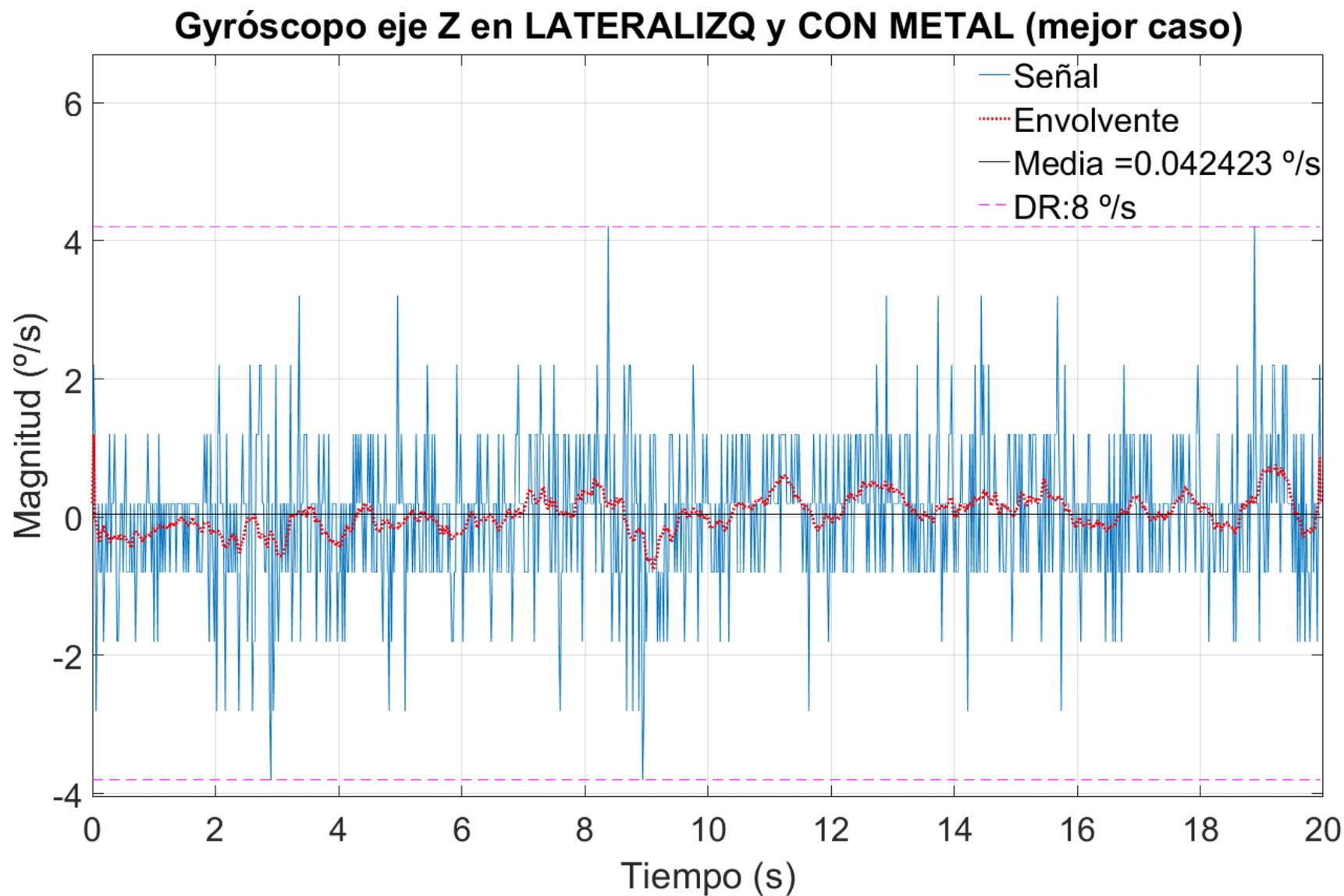


Figura C.96. Medida giroscópica en eje Z con metal (mejor caso)

Magnetómetro eje X en LATERALIZQ y SIN METAL (peor caso)

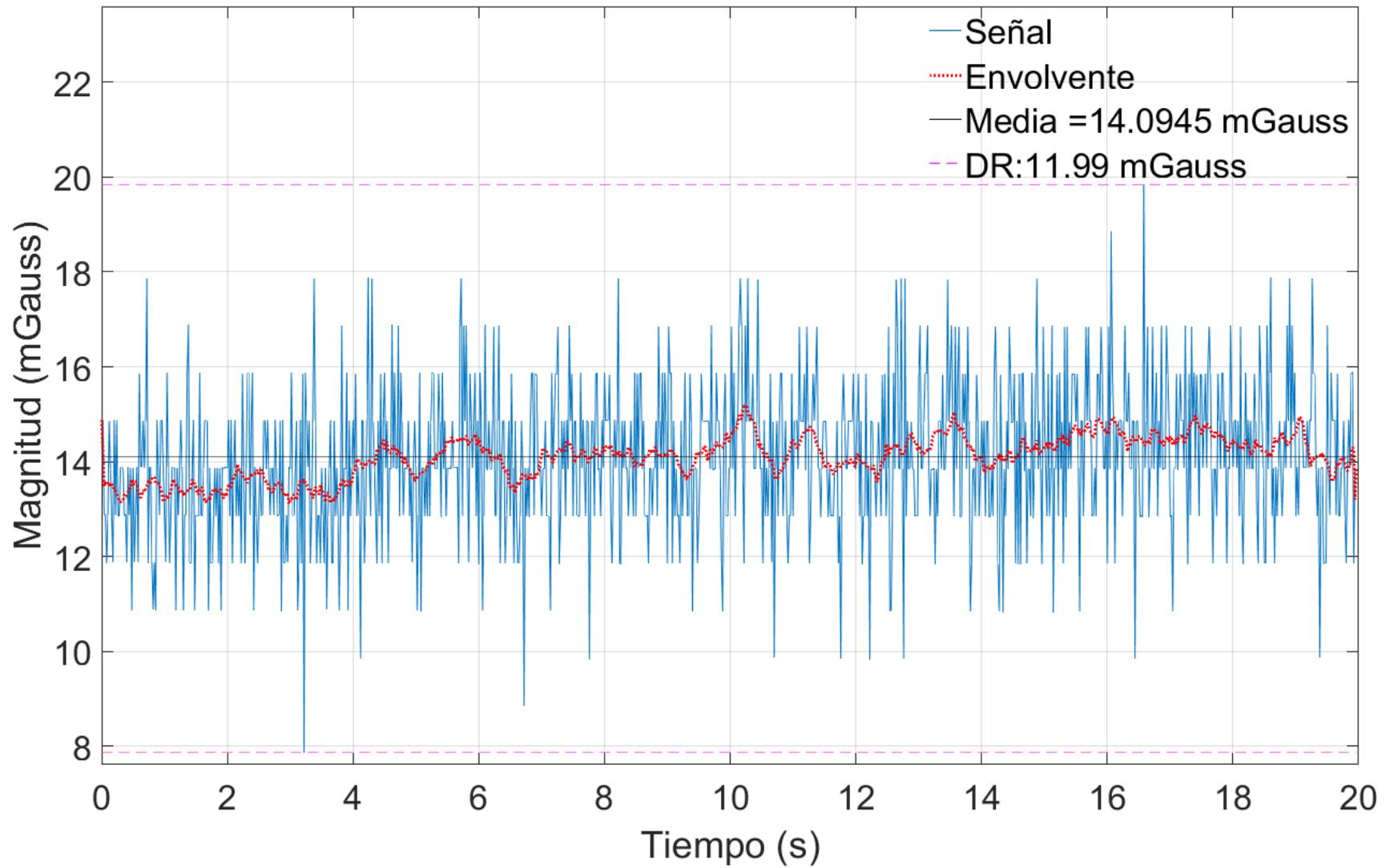


Figura C.97. Medida magnética en eje X sin metal (peor caso)

Magnetómetro eje X en LATERALIZQ y SIN METAL (mejor caso)

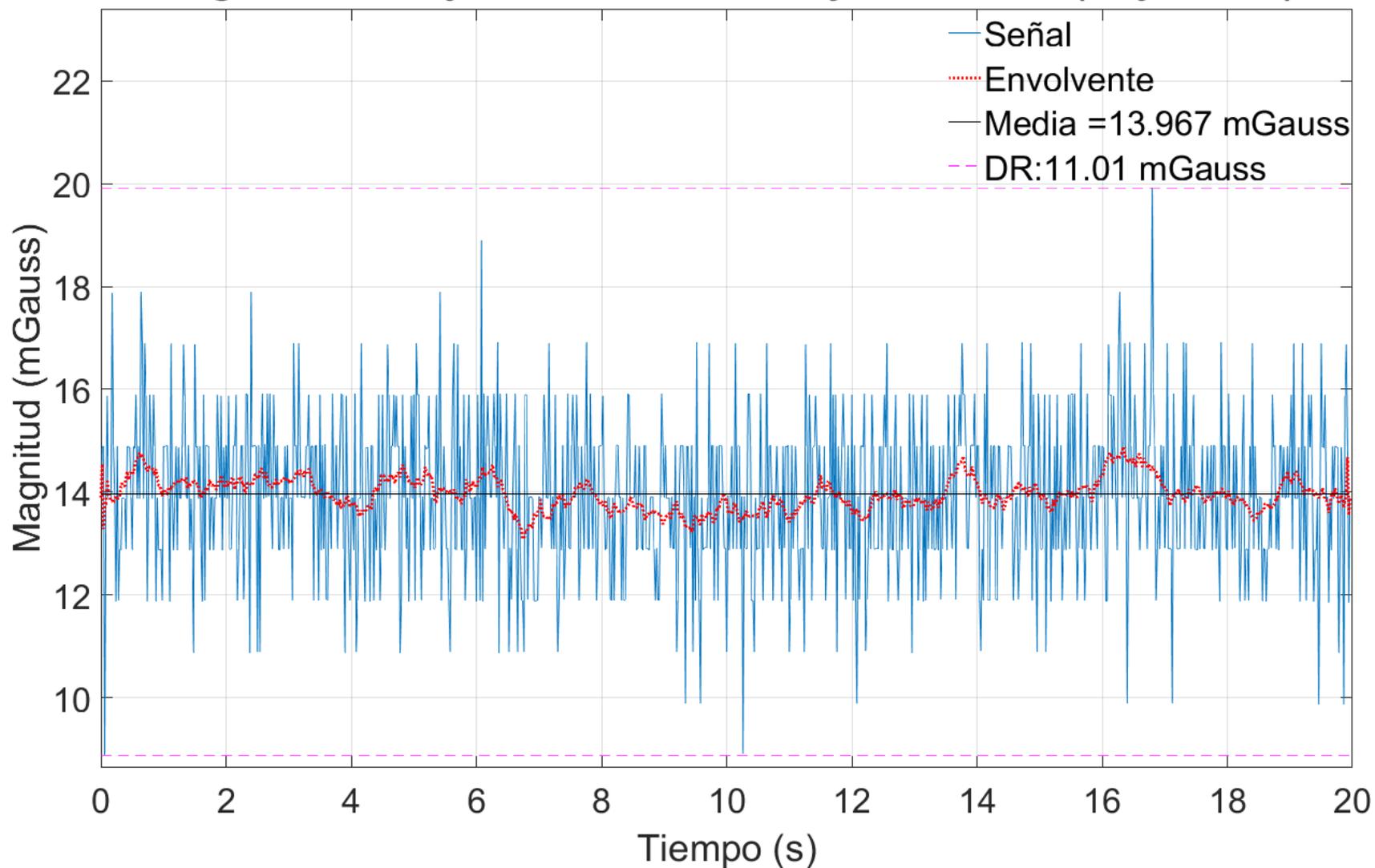


Figura C.98. Medida magnética en eje X sin metal (mejor caso)

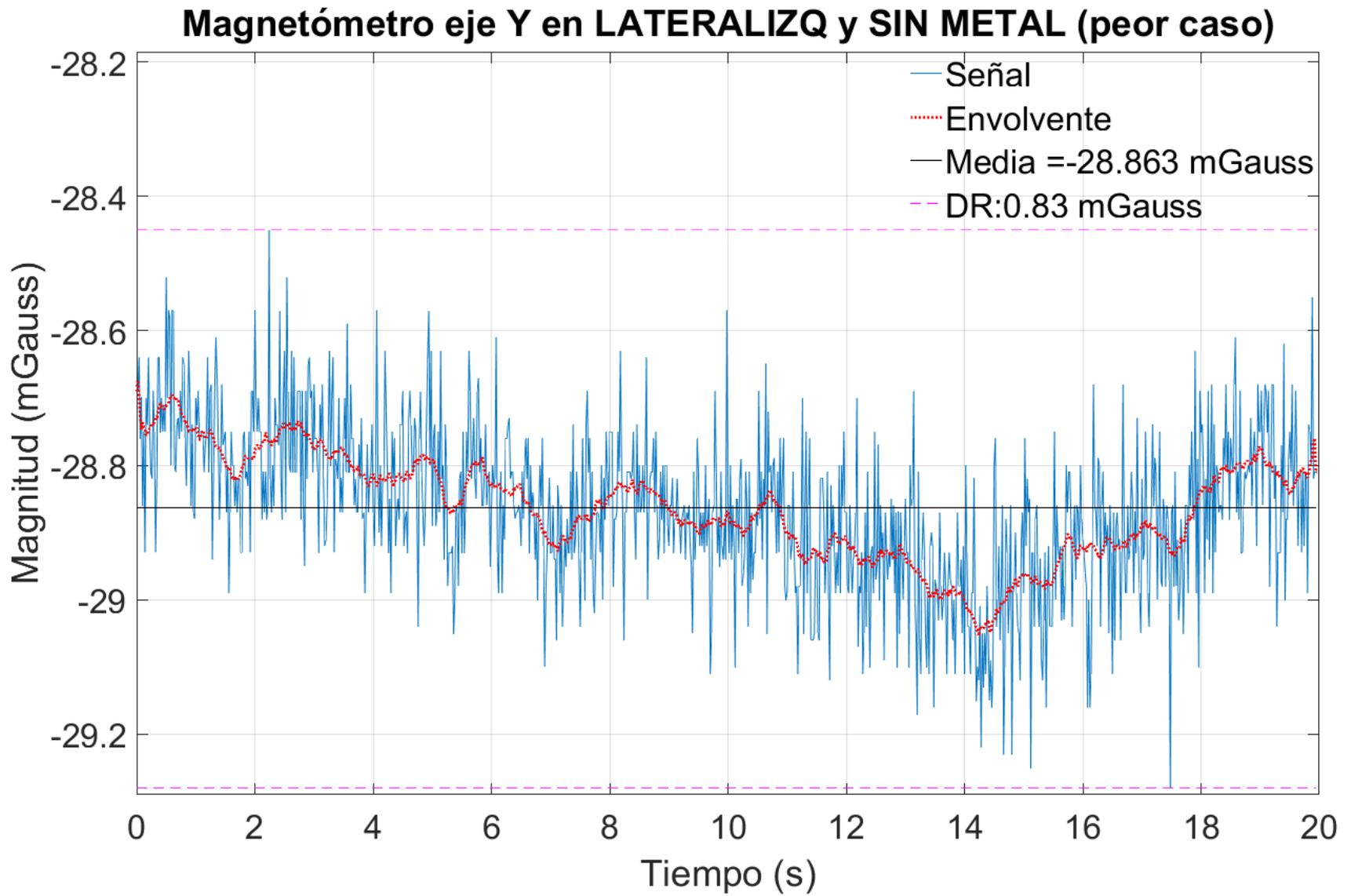


Figura C.99. Medida magnética en eje Y sin metal (peor caso)

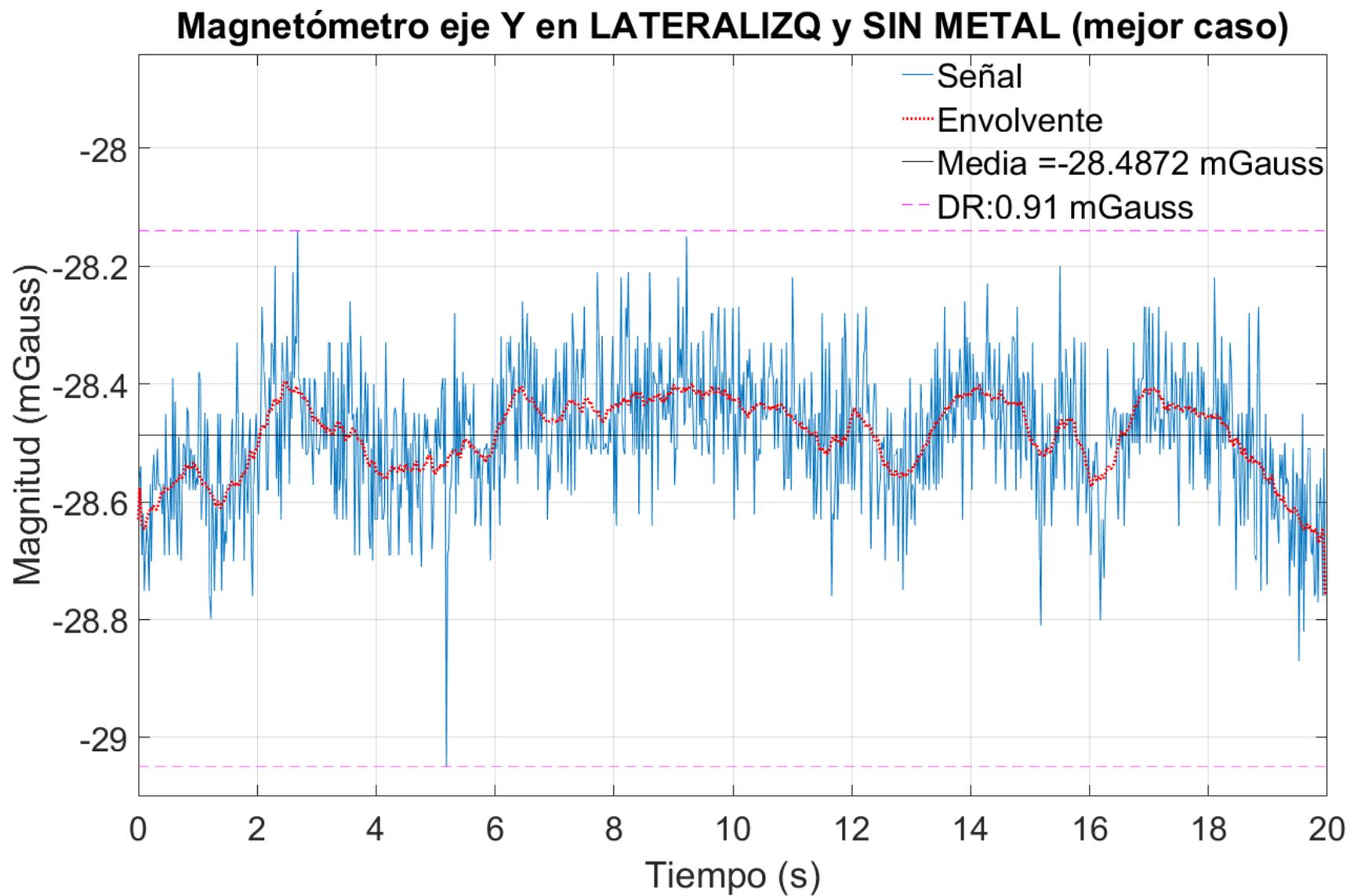


Figura C.100. Medida magnética en eje Y sin metal (mejor caso)

Magnetómetro eje Z en LATERALIZQ y SIN METAL (peor caso)

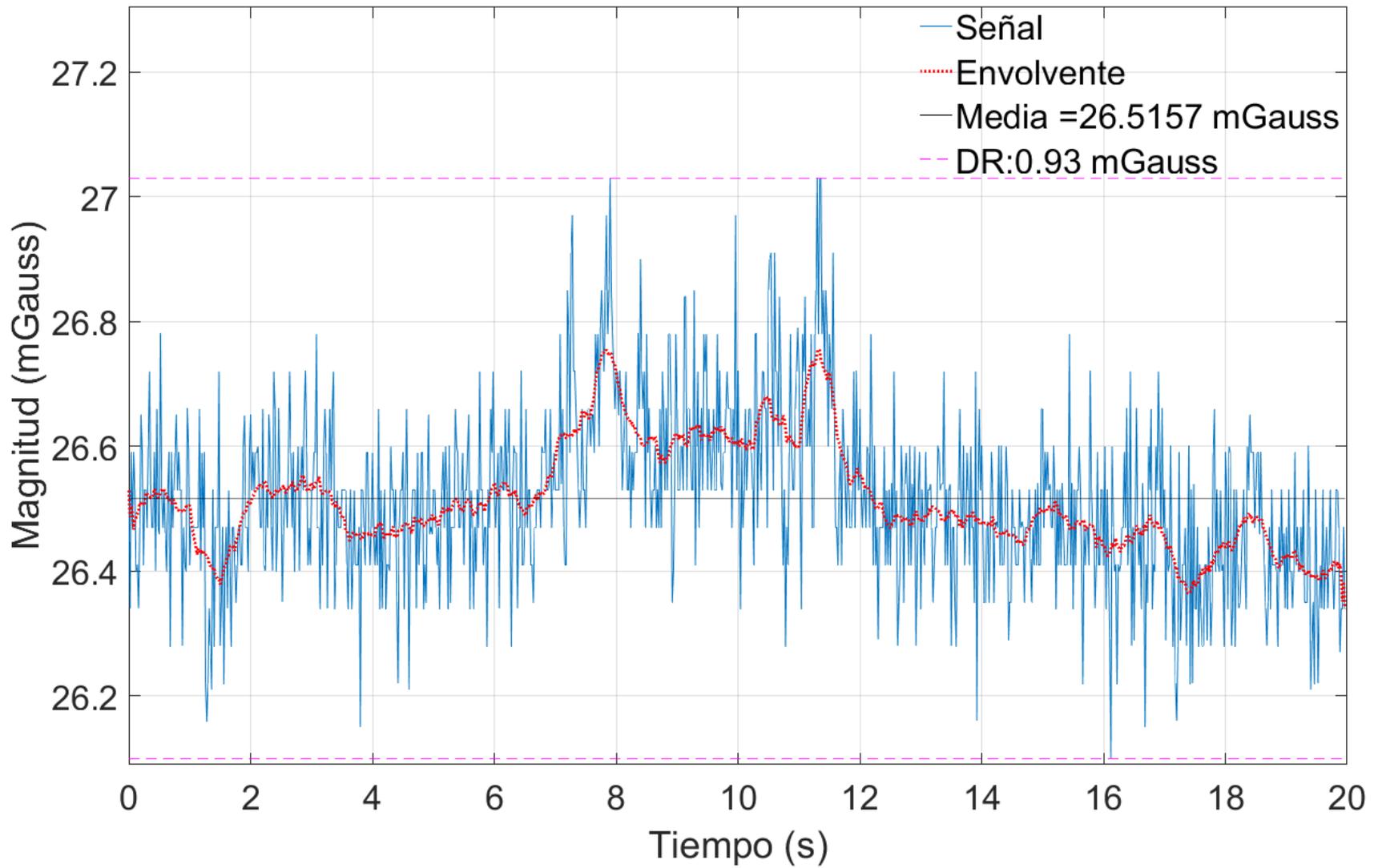


Figura C.101. Medida magnética en eje Z sin metal (peor caso)

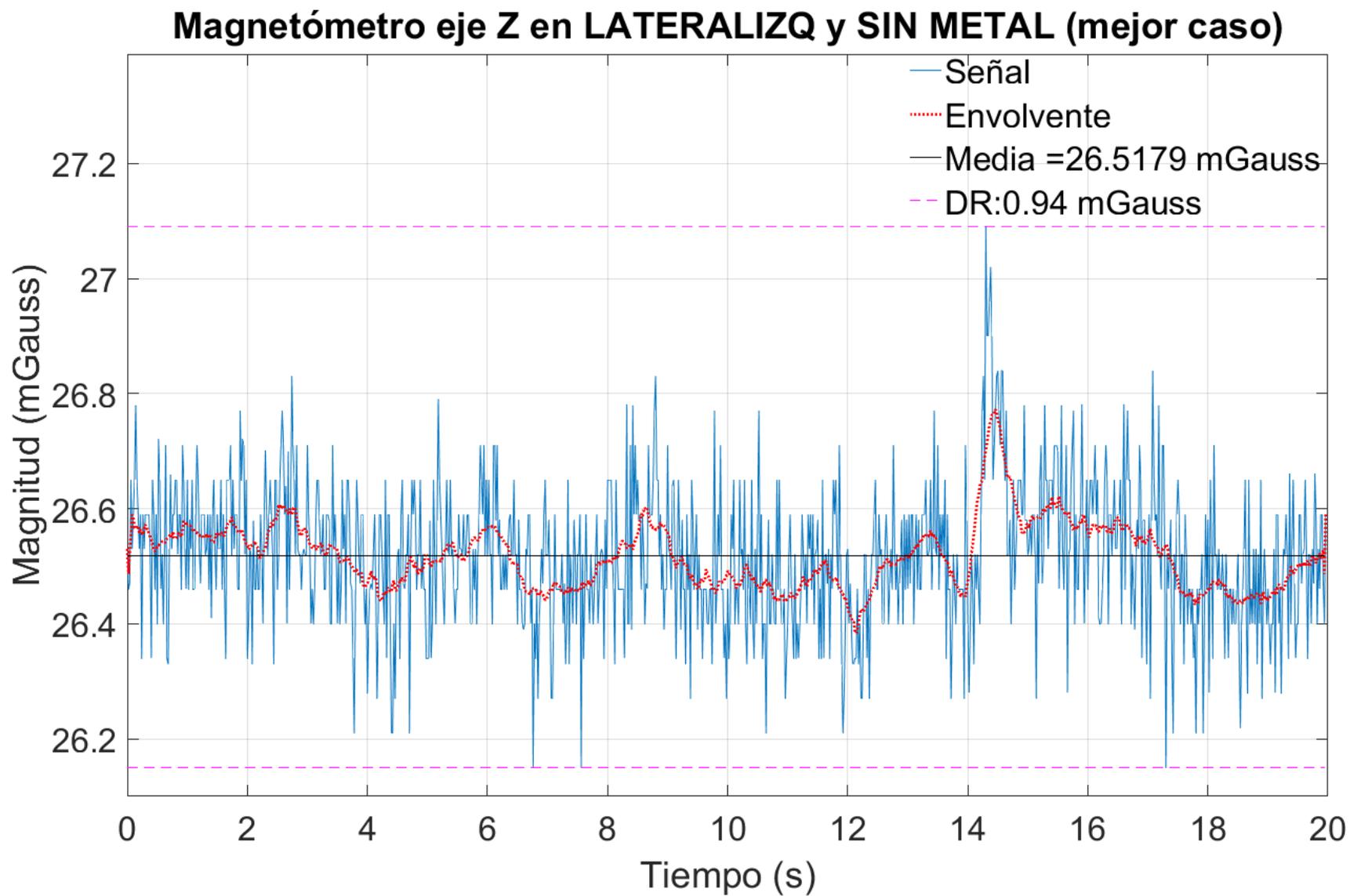


Figura C.102. Medida magnética en eje Z sin metal (mejor caso)

Magnetómetro eje X en LATERALIZQ y CON METAL (peor caso)

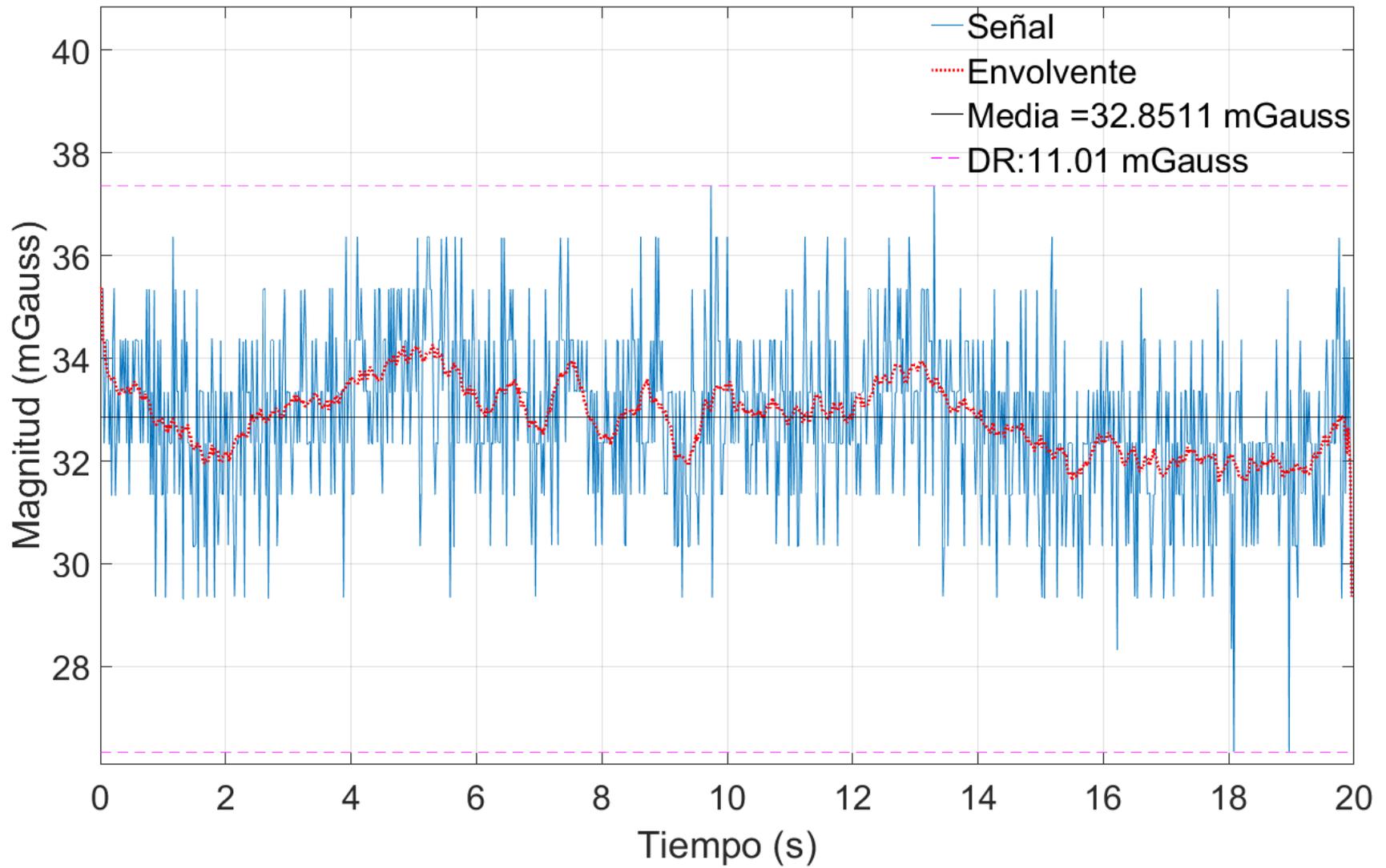


Figura C.103. Medida magnética en eje X con metal (peor caso)

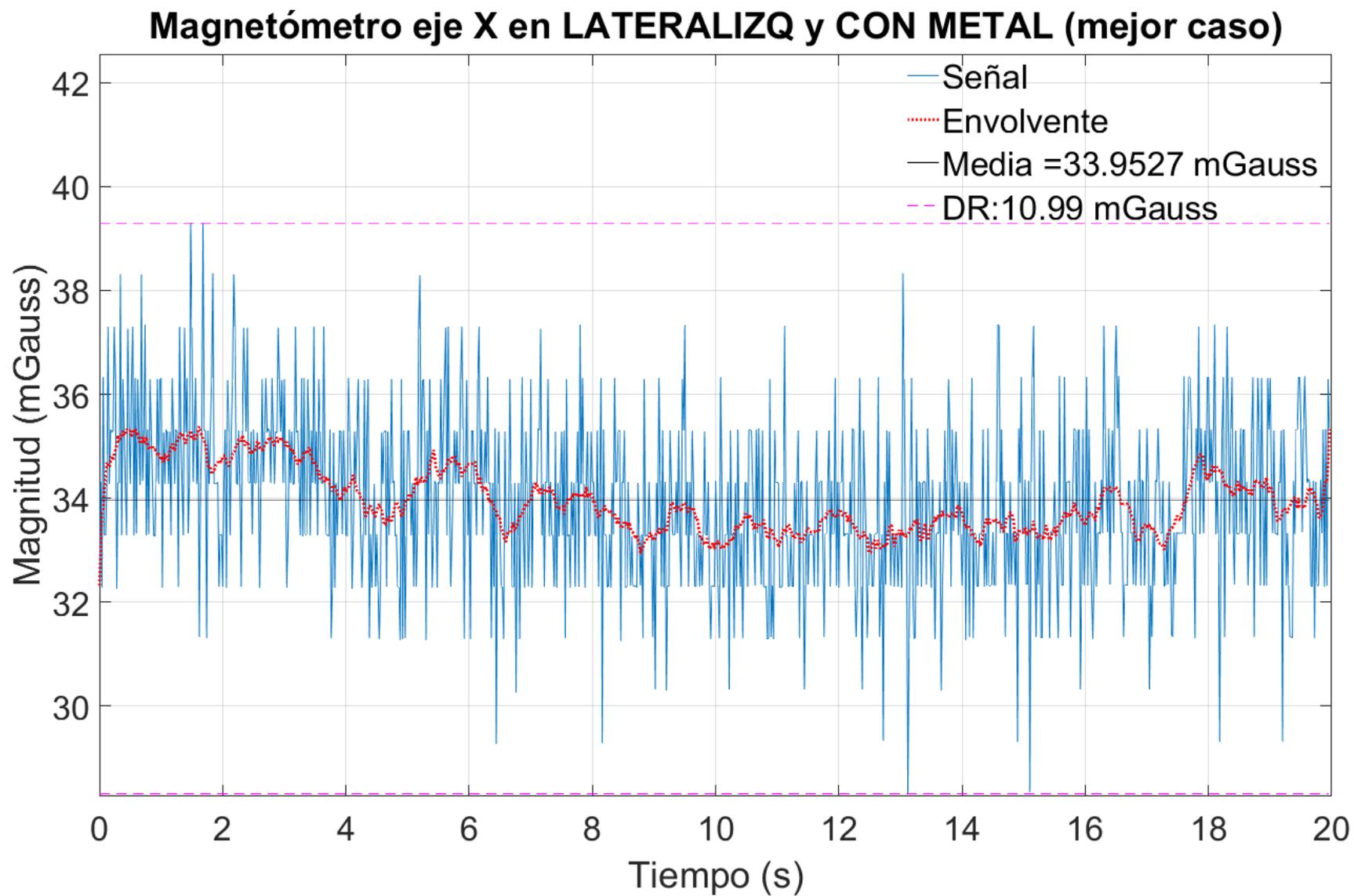


Figura C.104. Medida magnética en eje X con metal (mejor caso)

Magnetómetro eje Y en LATERALIZQ y CON METAL (peor caso)

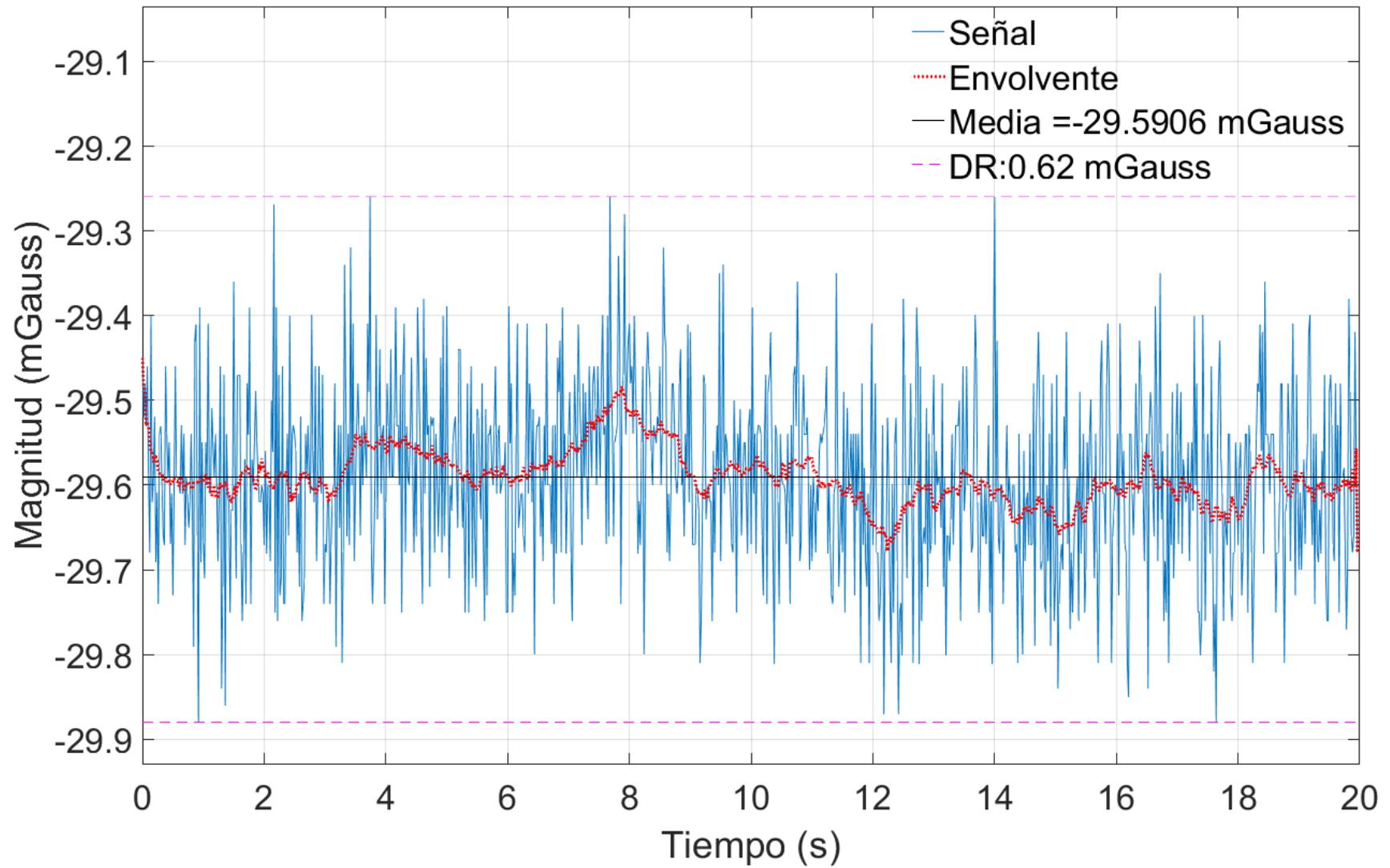


Figura C.105. Medida magnética en eje Y con metal (peor caso)

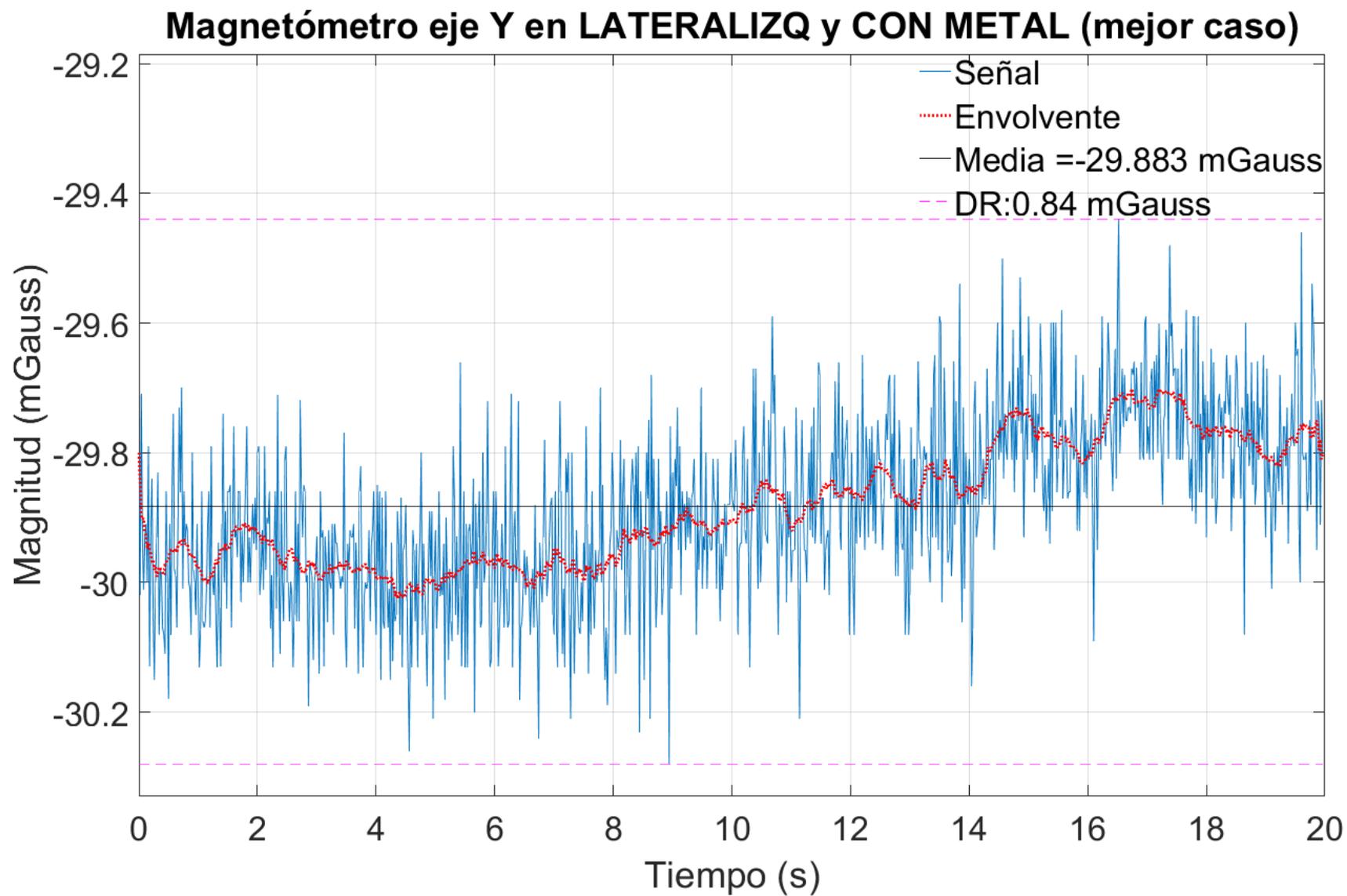


Figura C.106. Medida magnética en eje Y con metal (mejor caso)

Magnetómetro eje Z en LATERALIZQ y CON METAL (peor caso)

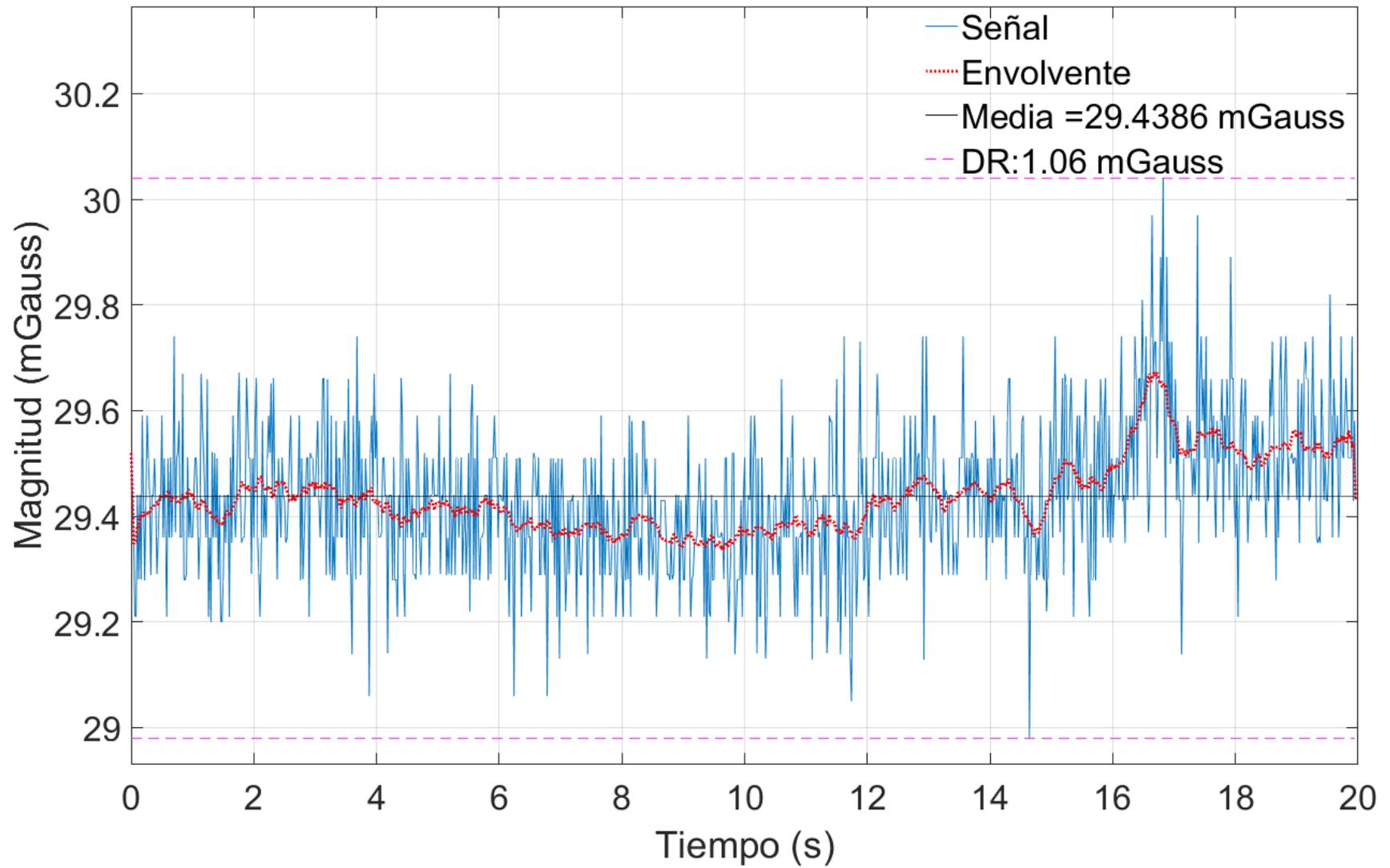


Figura C.107. Medida magnética en eje Z con metal (peor caso)

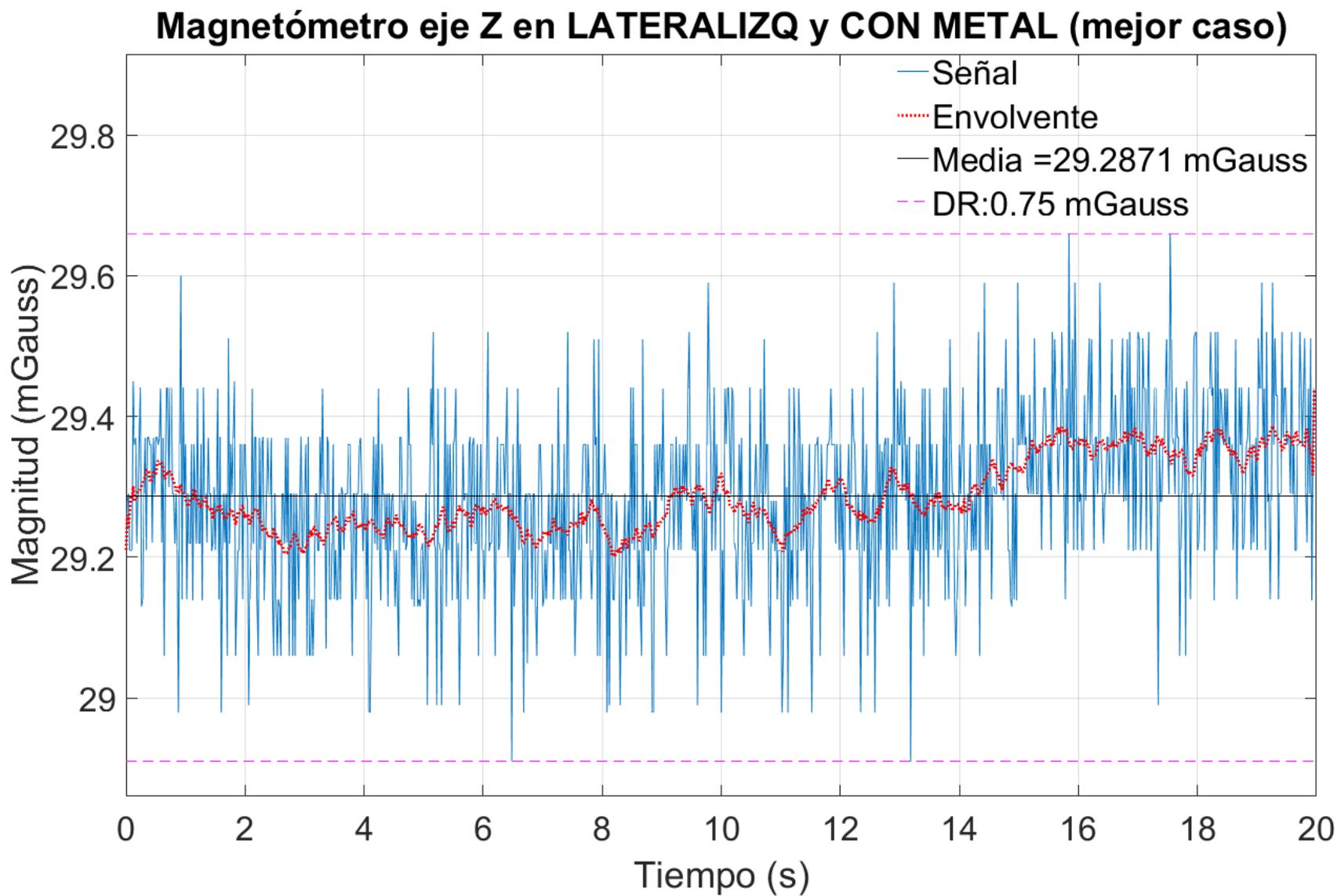
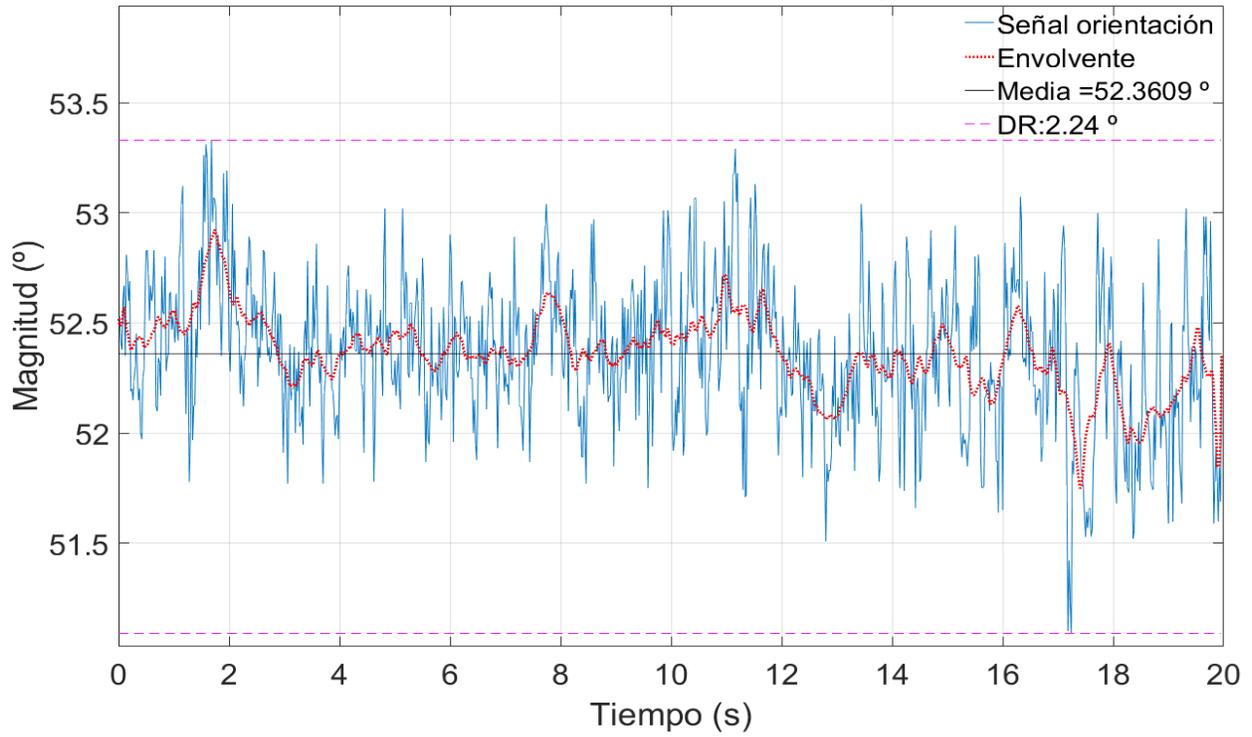


Figura C.108. Medida magnética en eje Z con metal (mejor caso)

Yaw en LATERALIZQ y SIN METAL (peor caso)



Yaw en LATERALIZQ y CON METAL (peor caso)

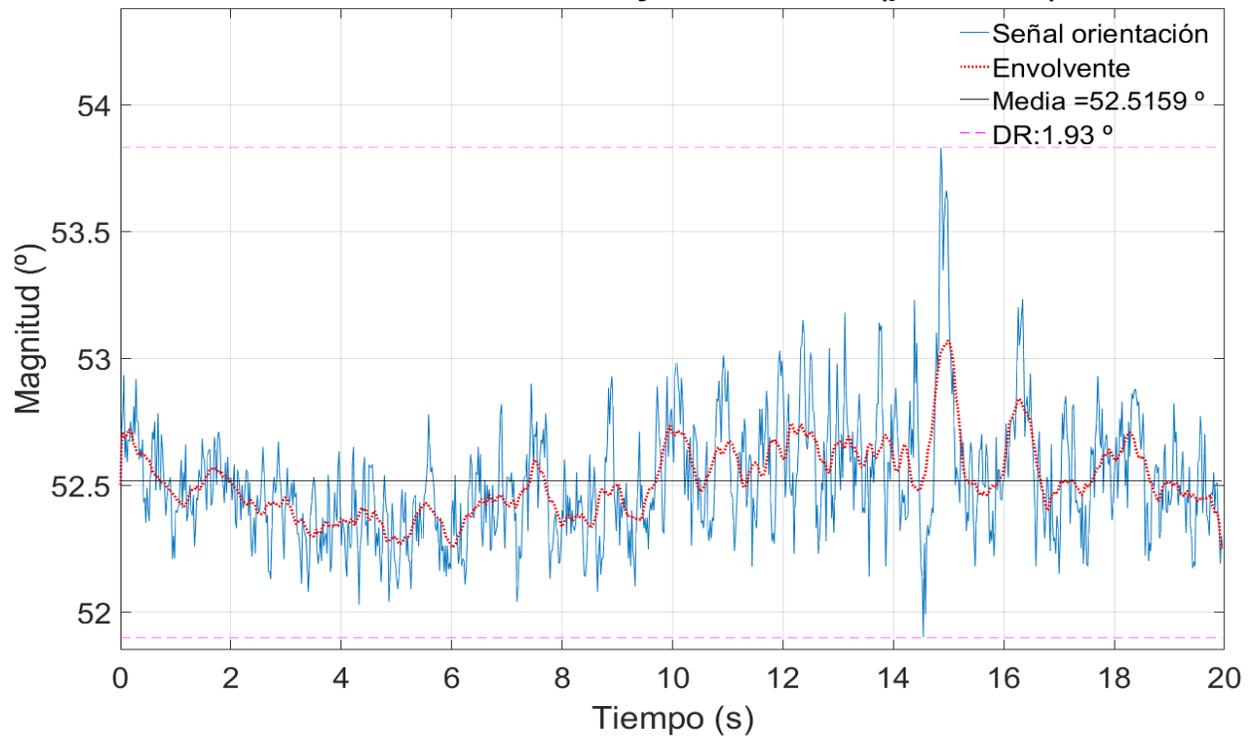


Figura C.109. Yaw medido (peor caso)