AEE
Asociación Empresarial Eólica

#SomosEolicos #OperativaEólica
@Aeeolica

14 OCTUBRE

WIND OPS

Tecnología, análisis y optimización del ciclo de vida de parques eólicos

VALLADOLID | 2026

Monitorización en continuo de precarga y flexión en pernos estructurales mediante sensores FBG instalados en el fondo de rosca

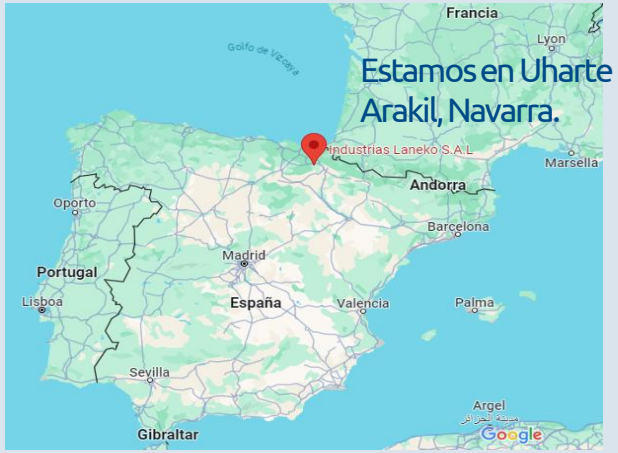
Presenta: D. José Félix Beregaña Arrizabalaga
Director general Industrias Laneko SAL.

Laneko MENDITECH

ORGANIZADOR AEE | REGIONAL PARTNER apecyl | PATROCINADORES VIP edp, ENGIE, HITACHI, Iberdrola, Naturgy, repsol, SIEMENS Gamesa, Vestas | COLABORADORES AERONES, DEKRA, GDES wind, res, Sika, UL Solutions

Laneko





70
Años de experiencia

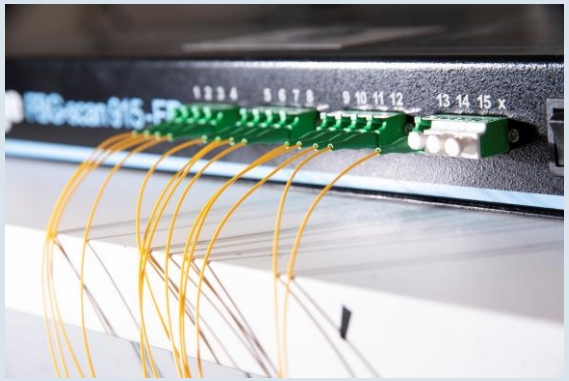
70
Empleados

Fundada en 1955
"Sociedad Anónima Laboral"
desde 1980

MENDITECH



Spin-off de la Universidad Pública de Navarra
20 años de experiencia en sensores de fibra óptica



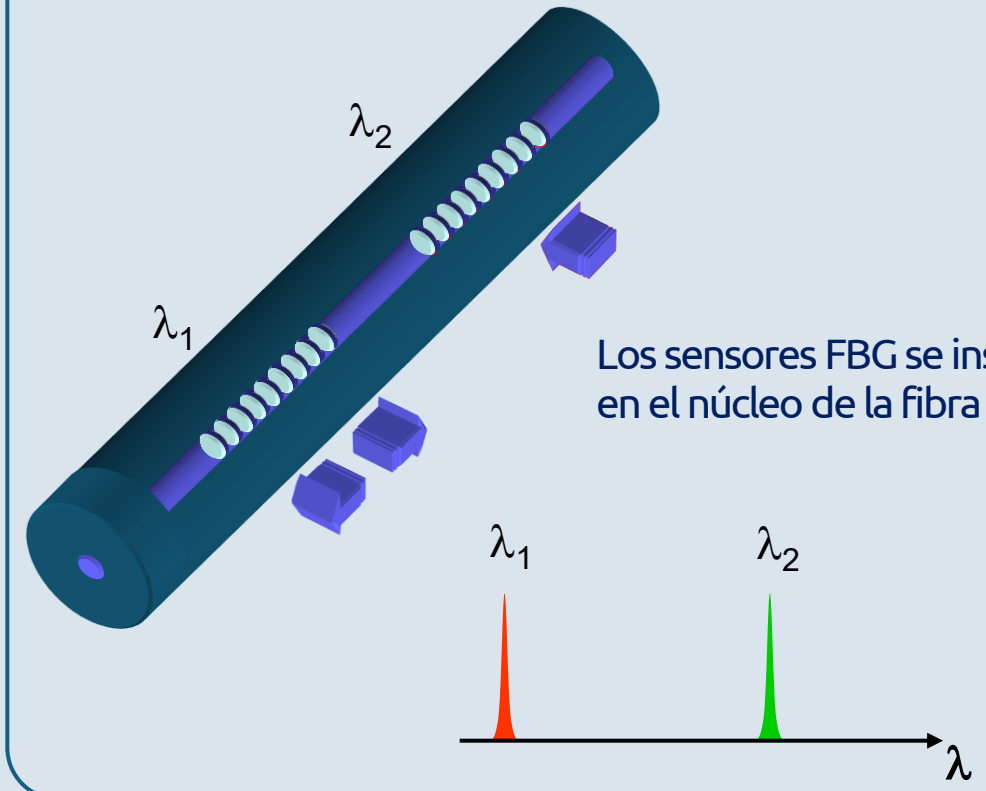
Basado en el conocimiento y la investigación.
50% de la plantilla doctorada



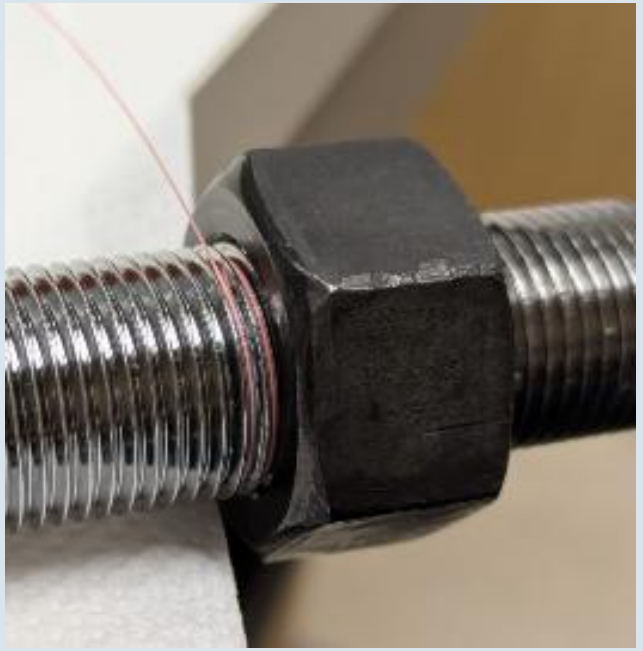
Soluciones de monitorización avanzadas para estructuras

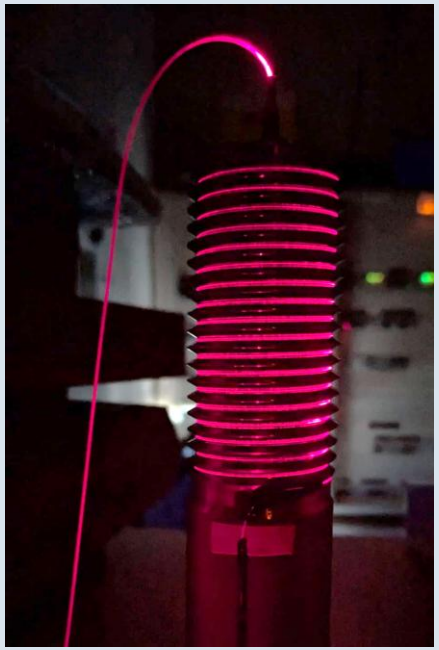
Sensores de fibra óptica

La fibra óptica es un cable de silice de 125 µm de diámetro
donde se propaga luz (e información en ella)



Los sensores FBG se inscriben
en el núcleo de la fibra



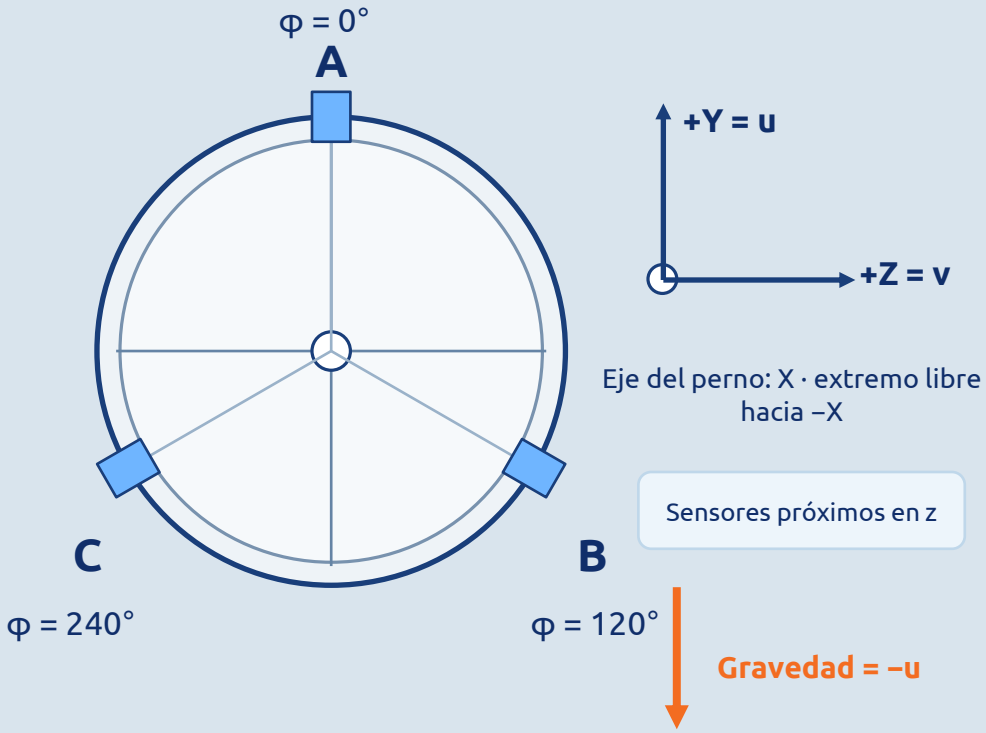


DESARROLLO DE UN MÉTODO DE INTEGRACIÓN DE
SENSORES FBG EN EL FONDO DE ROSCA
(PENDIENTE DE PATENTE)

Modelo de flexión basado en tres sensores FBG

Descomposición armónica de primer orden en la sección del perno

1 Geometría e instrumentación



2 Modelo matemático

$$\lambda_i = c + a\cos\varphi i + b\sin\varphi i \qquad \varphi A = 0° \cdot \varphi B = 120° \cdot \varphi C = 240°$$

$$c = (\lambda_A + \lambda_B + \lambda_C)/3 \qquad B = \sqrt{(a^2 + b^2)} \qquad \theta s = \operatorname{atan2}(b, a)$$

c	componente común → asociada a tracción axial (y temperatura si no se compensa)
a, b	primer armónico → describen la flexión transversal
B, θs	magnitud y dirección del bending en el frame del sensor

$$\theta_F = s_\theta \cdot \theta_s + \theta_0$$

Tras la calibración de orientación, el ángulo pasa al sistema físico de fuerzas

Idea clave

FBG filtradas y compensadas → Separación en c, a, b → c → carga axial → a,b → fuerza/deformación transversal

Calibración axial

1 Observable y ajuste principal

$$c = (\Delta\lambda_A + \Delta\lambda_B + \Delta\lambda_C) / 3$$

Componente común axial, tras compensación térmica

Ajuste lineal (rampa ascendente, referencia 20 bar)

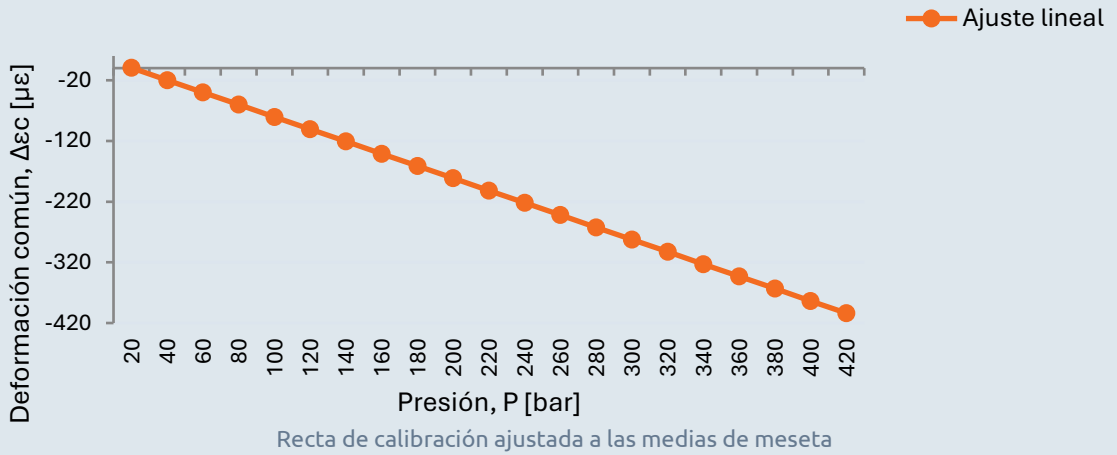
$\Delta\lambda c\ [pm] = (0.64 \pm 2.0) - (1.2127 \pm 0.0104) \cdot (P - 20)$

$\Delta\varepsilon c\ [\mu\varepsilon] = (0.53 \pm 2.03) - (1.0106 \pm 0.0087) \cdot (P - 20)$

$P\ [bar] = 20.59 - 0.9892 \cdot \Delta\varepsilon_c\ [\mu\varepsilon]$

- $R^2 = 0.99968$
- **$\sigma P \approx 2.28$ bar (1σ)**
- **Intervalo de predicción 95% ≈ ±5 bar**

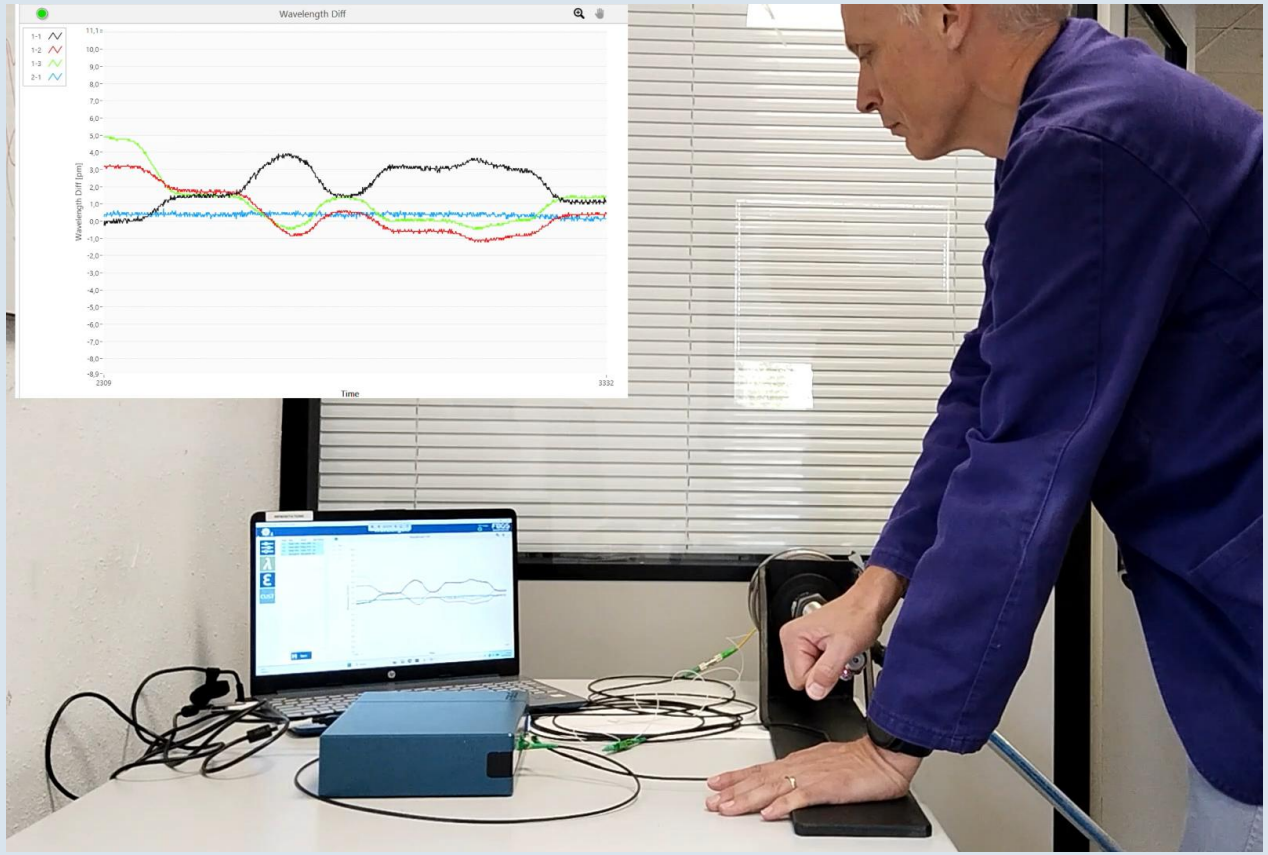
2 Resultados clave



Recta de calibración ajustada a las medias de meseta

Señal	Sensibilidad [pm/bar]	R^2
FBG A	−0.909	0.99696
FBG B	−1.368	0.99930
FBG C	−1.362	0.99933
Común	**−1.213**	**0.99968**

Validación de la prueba de concepto



Magnitud	Tracción axial	Flexión / carga transversal
Variable óptica utilizada	Componente común \(c=(A+B+C)/3\)	Primer armónico \(B=\sqrt{a^2+b^2}\)
Sensibilidad medida	−1.213 pm/bar	1.989 pm/kN
Equivalente en strain*	−1.011 με/bar	1.658 με/kN
Ganancia inversa	0.824 bar/pm	502.8 N/pm
Resolución interrogador asumida	0.8 pm	0.8 pm
Resolución equivalente	0.66 bar	0.40 kN
Resolución equivalente en strain	0.67 με	0.67 με
Rango experimental calibrado	20–420 bar	284–382 N
R^2 calibración	0.99968	≈0.968
Incertidumbre pendiente, 95 %	±0.010 pm/bar (~0.9 %)	≈±18 N/pm (~3.5 %)
Incertidumbre (**σ**)	**≈2.3 bar**	**≈7.6 N**
Confianza 99.7% **(3σ)**	**≈±7 bar**	—


Laneko
Leader in production of
bolts and fasteners



By Laneko & MENDITECH

www.industriaslaneko.com
T +34 948 567103

www.menditech.com
T +34 644 399906