



**Centro de Investigación y de Estudios
Avanzados del Instituto Politécnico Nacional**

Ingeniería Eléctrica
Sección de Electrónica del Estado Sólido



SISTEMA INALÁMBRICO NO INVASIVO BASADO EN SENSORES MEMS PARA EL SEGUIMIENTO Y EVALUACIÓN DE ACTIVIDAD PERSONAL

M. en C. Luis Sánchez Márquez

Asesores

Dr. Mario Alfredo Reyes Barranca
Dra. Griselda Stephany Abarca Jiménez

CONTENIDO

1. OBJETIVOS
2. JUSTIFICACIÓN
3. INTRODUCCIÓN
4. MÉTODOS DE LOCALIZACIÓN
5. ALGORITMO SO-TDOA
6. RED INALÁMBRICA DE SENSORES
7. OPTIMIZACIÓN DE LA RED DE SENSORES
8. RESULTADOS
9. CONCLUSIONES
10. TRABAJO A FUTURO
11. PRODUCTIVIDAD
12. REFERENCIAS

CONTENIDO

1. OBJETIVOS
2. JUSTIFICACIÓN
3. INTRODUCCIÓN
4. MÉTODOS DE LOCALIZACIÓN
5. ALGORITMO SO-TDOA
6. RED INALÁMBRICA DE SENSORES
7. OPTIMIZACIÓN DE LA RED DE SENSORES
8. RESULTADOS
9. CONCLUSIONES
10. TRABAJO A FUTURO
11. PRODUCTIVIDAD
12. REFERENCIAS

OBJETIVO

Diseñar un **sistema inalámbrico de bajo costo y no invasivo, basado en acelerómetros**, para adquirir las señales generadas por los impactos de los pies de una persona sobre un piso de concreto y determinar su ubicación en el interior de una habitación.

OBJETIVOS PARTICULARES

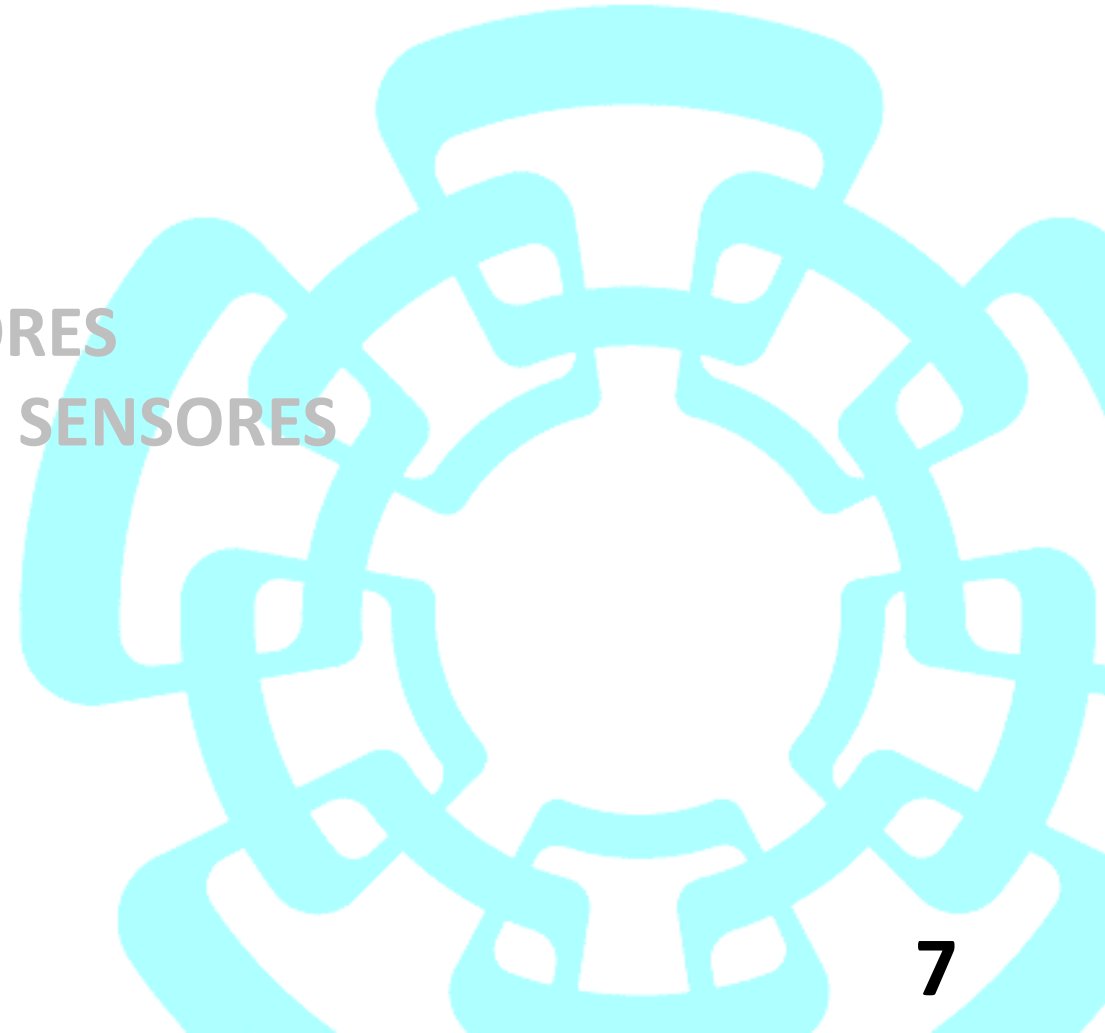
- Identificar un acelerómetro de bajo costo que cumpla con los propósitos de detección de señales producidas por los impactos de los pies de una persona.
- Proponer una red inalámbrica de sensores no invasiva para obtener las vibraciones en el piso de concreto de una habitación, producidas por los impactos de los pies de una persona.
- Implementar un algoritmo que permita identificar la trayectoria seguida por el sujeto bajo estudio en un entorno cotidiano.

OBJETIVOS PARTICULARES

- Realizar un estudio del error de localización en función del número de sensores utilizados.
- Optimizar la ubicación de los sensores dentro de una habitación para minimizar el error de localización de las pisadas hechas por un individuo.
- Establecer una base sólida mediante el diseño de la red para facilitar futuras investigaciones centradas en la medición y análisis de caminatas reales.

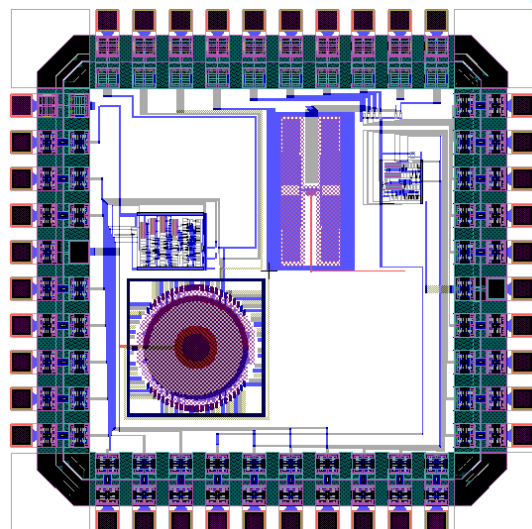
CONTENIDO

1. OBJETIVOS
2. **JUSTIFICACIÓN**
3. INTRODUCCIÓN
4. MÉTODOS DE LOCALIZACIÓN
5. ALGORITMO SO-TDOA
6. RED INALÁMBRICA DE SENSORES
7. OPTIMIZACIÓN DE LA RED DE SENSORES
8. RESULTADOS
9. CONCLUSIONES
10. TRABAJO A FUTURO
11. PRODUCTIVIDAD
12. REFERENCIAS



JUSTIFICACIÓN

El grupo de investigación del laboratorio de VLSI de la SEES Cinvestav-Zacatenco tiene **experiencia diseñando sistemas micro electro mecánicos (MEMS)** empleados como **sensores y actuadores**; sin embargo, no se ha trabajado en aplicaciones específicas para este tipo de dispositivos.



JUSTIFICACIÓN

El rastreo de una persona en el interior de un edificio tiene múltiples aplicaciones.

- Salud: Monitorear la actividad diaria para estimar el gasto del nivel energético y con esto prevenir, retrasar o controlar algunas enfermedades crónicas (diabetes, padecimientos cardiovasculares y respiratorios, obesidad)

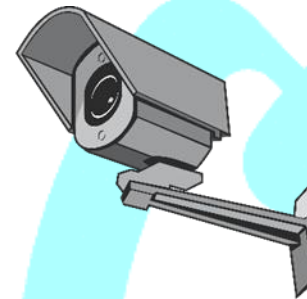
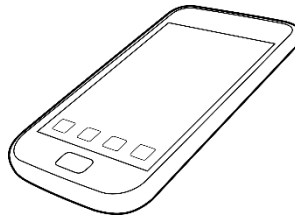
JUSTIFICACIÓN

Otras aplicaciones de la localización de pisadas (personas) en el interior de un edificio:

- Emergencias: Durante un escenario de rescate/evacuación, los socorristas pueden localizar a los ocupantes en peligro.
- Seguridad: Rastreo intrusos
- Reducción de consumo de energía en casas inteligentes

JUSTIFICACIÓN

Los sistemas de rastreo de personas en interiores ya han sido desarrollados; sin embargo, suelen ser invasivos o muy costosos.



Por lo cual se busca que el sistema sea de bajo costo y no invasivo.

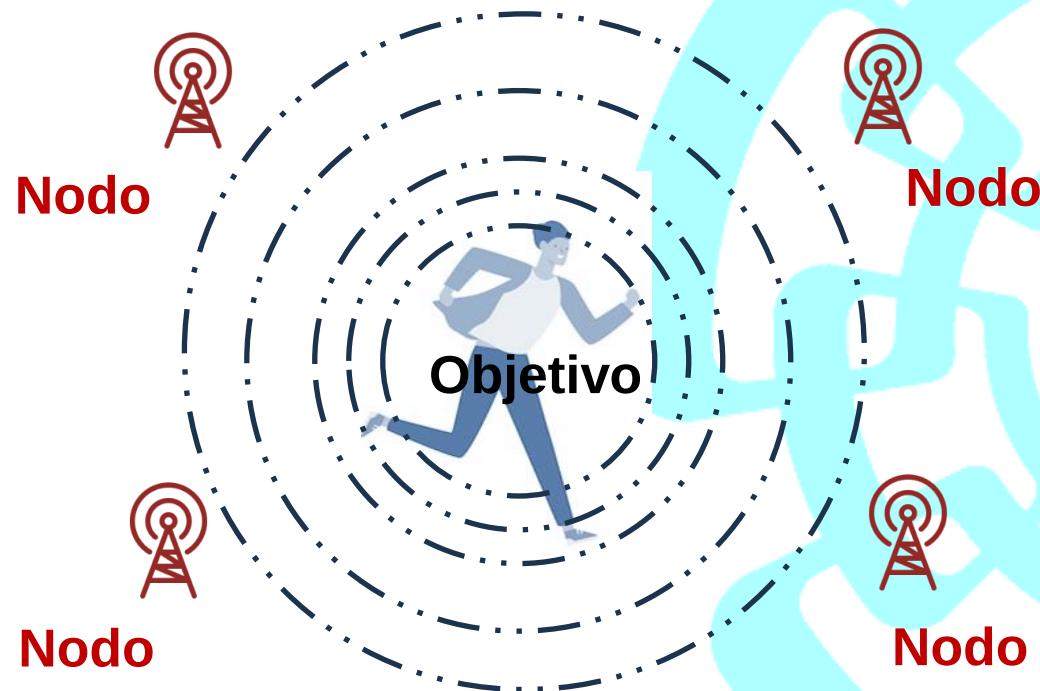
CONTENIDO

1. OBJETIVOS
2. JUSTIFICACIÓN
- 3. INTRODUCCIÓN**
4. MÉTODOS DE LOCALIZACIÓN
5. ALGORITMO SO-TDOA
6. RED INALÁMBRICA DE SENSORES
7. OPTIMIZACIÓN DE LA RED DE SENSORES
8. RESULTADOS
9. CONCLUSIONES
10. TRABAJO A FUTURO
11. PRODUCTIVIDAD
12. REFERENCIAS

Localización de objetivos

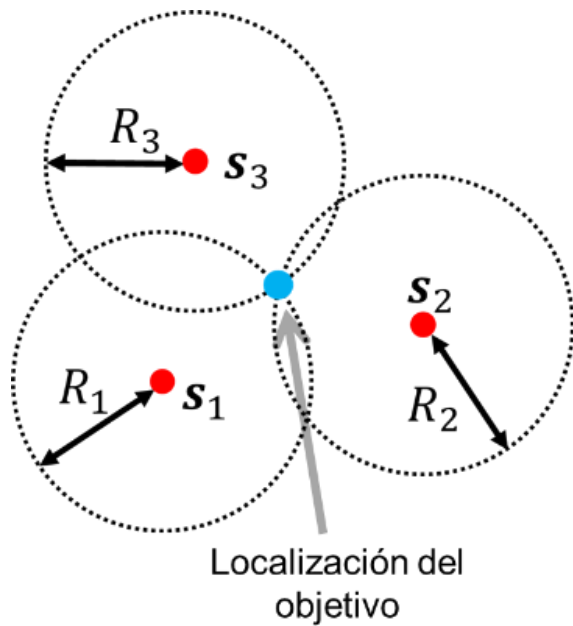
Para localizar a una persona u objeto (también llamados **objetivo**) se utiliza una **red de sensores** (también llamados **nodos**) capaces de medir alguna **excitación del medio** producida por el objetivo.

Luego se implementa un **algoritmo de localización** utilizando las señales recibidas en los nodos.

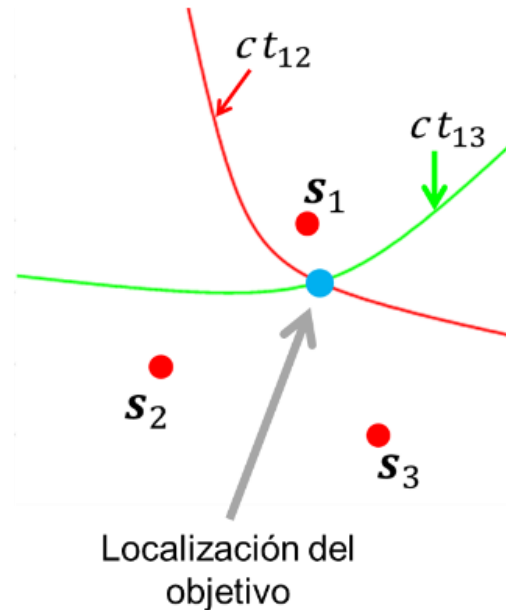


Métodos Clásicos de Localización de objetivos

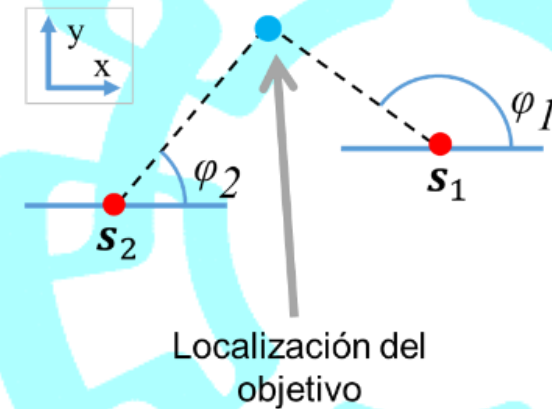
- Localización basada en **Tiempos de Llegada** (TOA)
- Localización basada en la **Fuerza de la Señal Recibida** (RSS)
- Localización basada en **Diferencias de Tiempo de Llegada** (TDOA)
- Localización basada en el **Ángulo de Llegada** (AOA)



TOA y RSS



TDOA



AOA

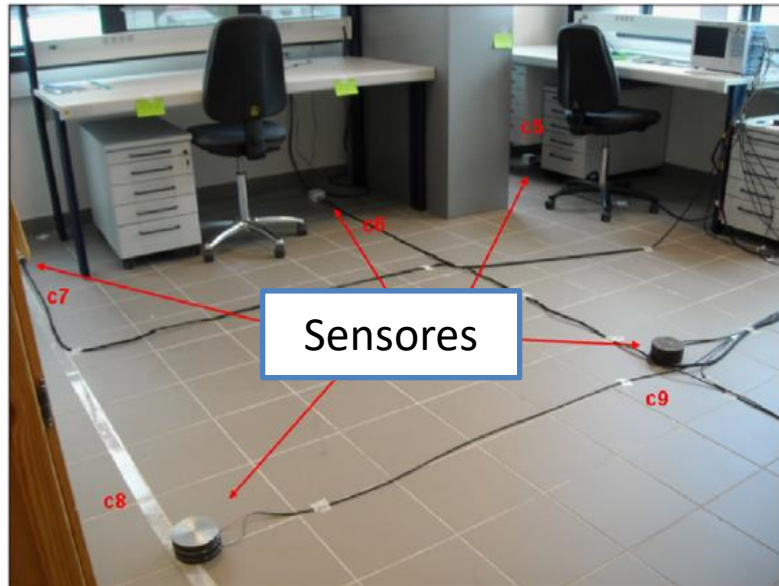
Métodos Clásicos de Localización de objetivos

Estos métodos clásicos de localización fueron diseñados para sistemas de **Radio Frecuencia (RF)** o **Wi-Fi**, donde las señales a estudiar se propagan por el aire y se considera que la **velocidad de propagación es constante**

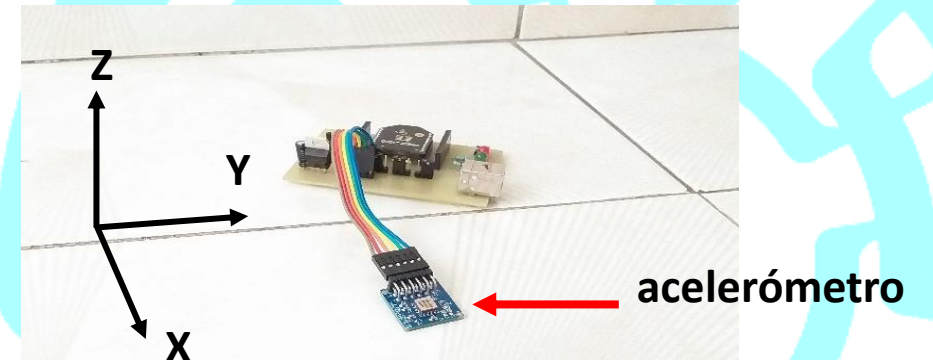


Acelerómetro como método no invasivo

Si se utiliza una red de **acelerómetros colocados en el piso** para obtener la localización de pisadas, se deben tener ciertas consideraciones

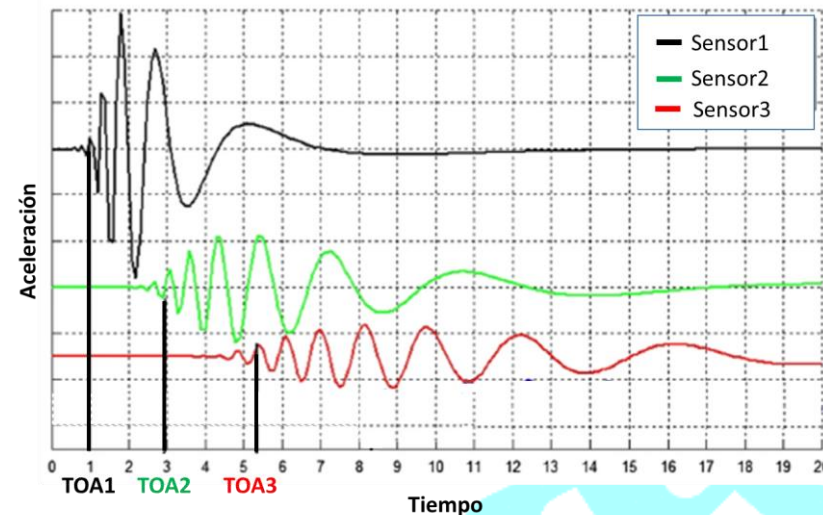
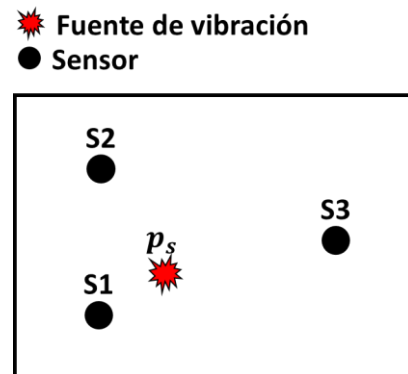


Bahroun R, et al, 2014



Vibraciones en el piso

- Cuando se realiza una pisada, se generan ondas mecánicas que viajan a través del piso de **concreto**
- En un medio **amortiguado y dispersivo** como lo es el concreto, estas ondas se ven deformadas a medida que viajan. Es decir, **la velocidad de propagación no es constante**



Bahroun R, et al, 2014

CONTENIDO

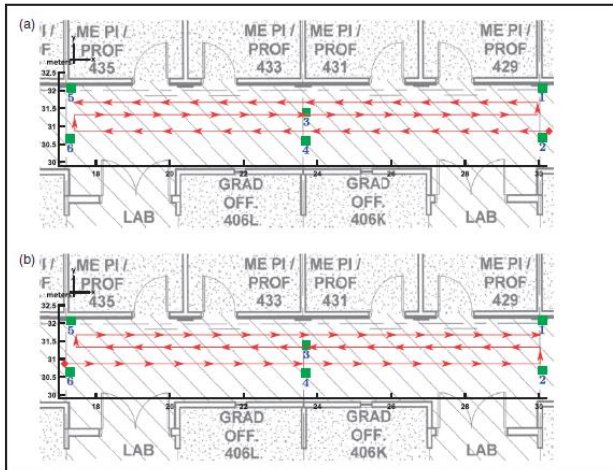
1. OBJETIVOS
2. JUSTIFICACIÓN
3. INTRODUCCIÓN
- 4. MÉTODOS DE LOCALIZACIÓN**
5. ALGORITMO SO-TDOA
6. RED INALÁMBRICA DE SENSORES
7. OPTIMIZACIÓN DE LA RED DE SENSORES
8. RESULTADOS
9. CONCLUSIONES
10. TRABAJO A FUTURO
11. PRODUCTIVIDAD
12. REFERENCIAS

Métodos de localización

Localización de pisadas

- Los algoritmos de localización de pisadas contemplan distintos niveles de **complejidad** y requisitos de **infraestructura**.
- Suelen probarse en habitaciones con pisos **altamente instrumentados** como **Goodwin Hall**
- En su defecto, se diseña una red de sensores **distribuidos uniformemente** sobre el piso de la habitación

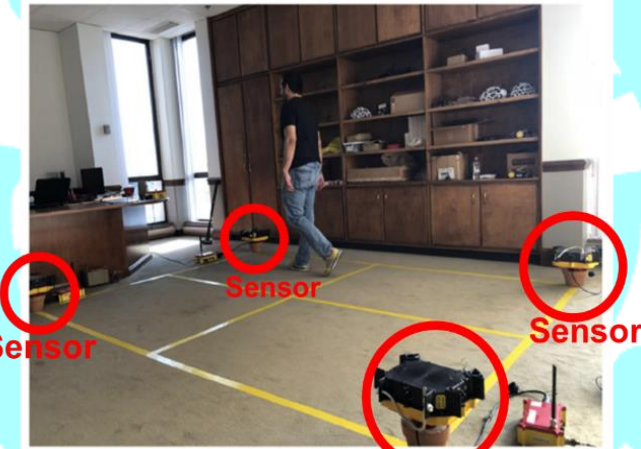
Goodwin Hall



Alajlouni S, et al, 2019



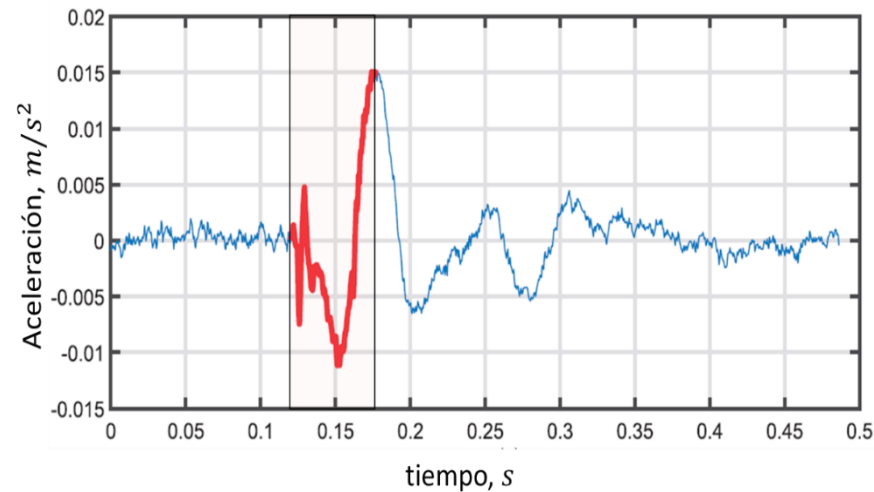
Hamilton J M, 2015



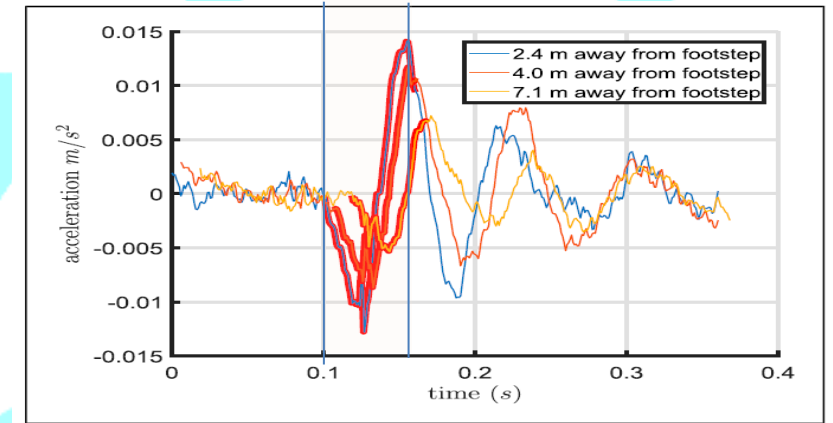
Li F, et al, 2020

Localización de personas

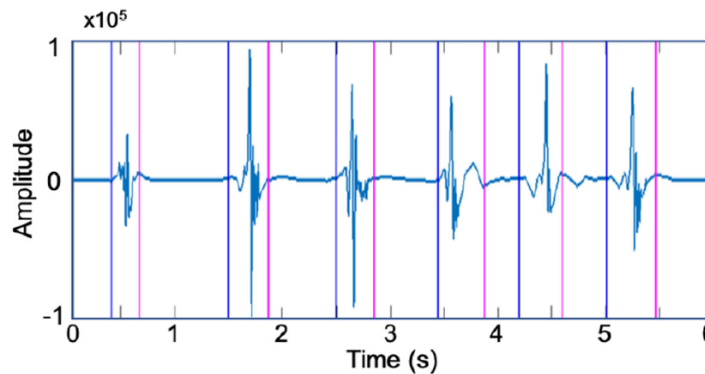
Algunos de estos métodos **almacenan** y **procesan** varias muestras de la señal (**una ventana de tiempo**) y utilizan métodos basados en **RSS**, **TDOA**, **AOA** o combinaciones de ellos para hacer la localización



Alajlouni S, et al, 2019



Alajlouni S, et al, 2020

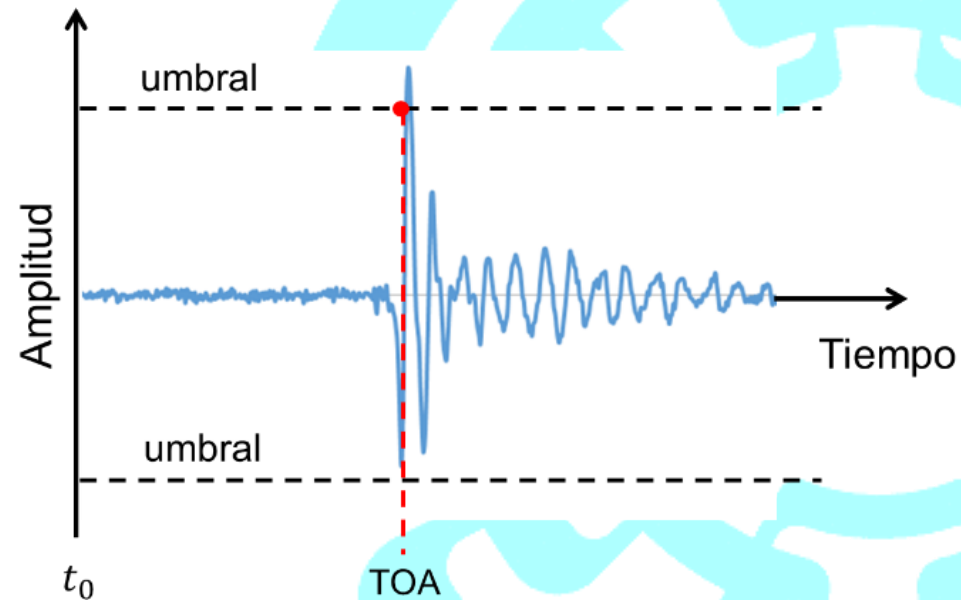
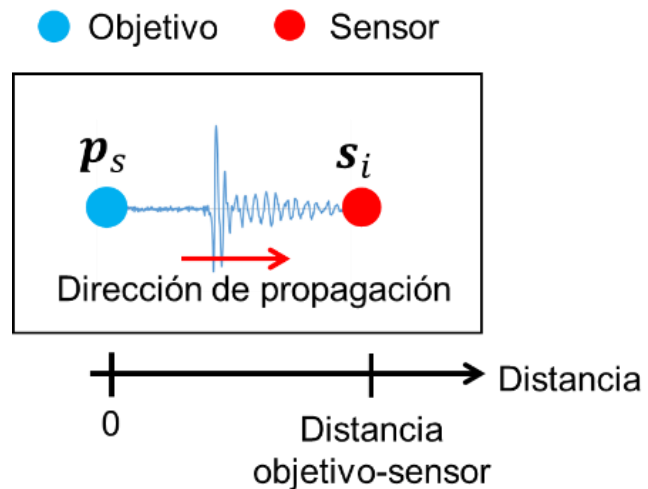


Li F, et al, 2020

Localización de personas

Existen métodos como el **SO-TDOA** donde no es necesario almacenar toda la información de la pisada, ya que sólo se requiere conocer el **Tiempo de Llegada** de la señal (**TOA**)

El TOA puede ser obtenido por medio de un **criterio de umbral**



CONTENIDO

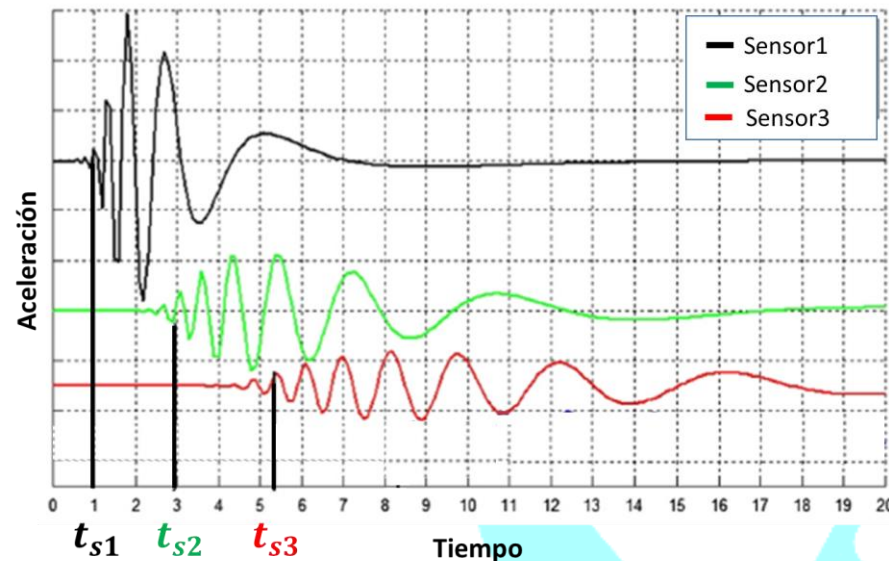
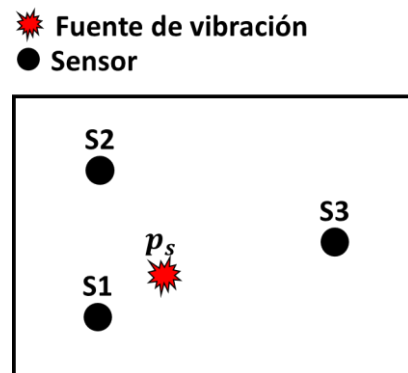
1. OBJETIVOS
2. JUSTIFICACIÓN
3. INTRODUCCIÓN
4. MÉTODOS DE LOCALIZACIÓN
- 5. ALGORITMO SO-TDOA**
6. RED INALÁMBRICA DE SENSORES
7. OPTIMIZACIÓN DE LA RED DE SENSORES
8. RESULTADOS
9. CONCLUSIONES
10. TRABAJO A FUTURO
11. PRODUCTIVIDAD
12. REFERENCIAS

Algoritmo SO-TDOA **(“Sign Of the *Time-Difference-Of-Arrival*”)**

Algoritmo SO-TDOA

- Se basa en los **signos** de las **diferencias de los tiempos de llegada** de una señal a un conjunto de sensores.
- Se mantiene el **orden de los tiempos de llegada**:

$$\text{sign}(t_{si} - t_{sj}) = \text{sign}(d_{si} - d_{sj})$$



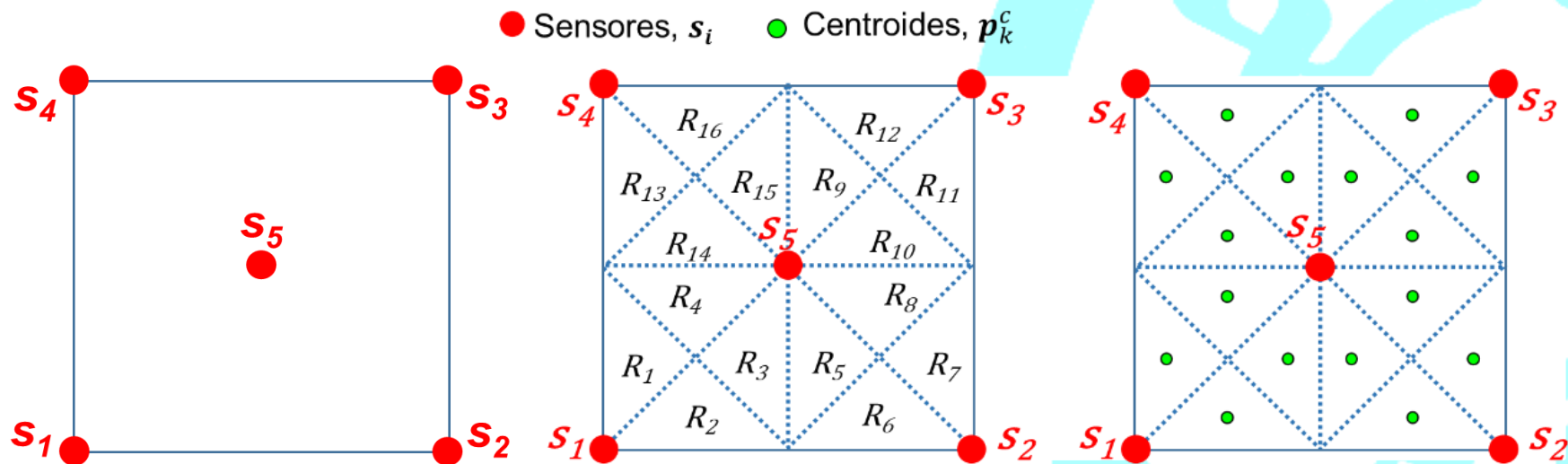
Algoritmo SO-TDOA

1. Etapa de segmentación:

1.1 Se selecciona la superficie de prueba y se colocan los sensores

1.2 Se divide la superficie en **regiones** (R_k) formadas por bisectrices perpendiculares a la línea que une a cada par de sensores

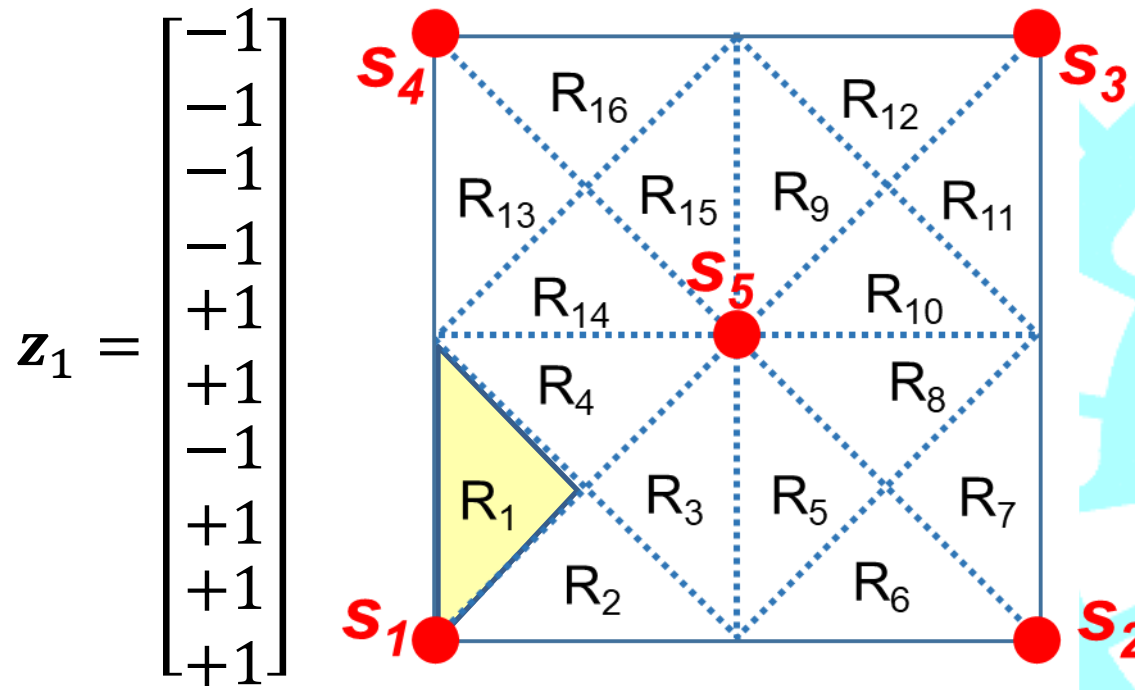
1.3 Se obtienen los **centroides** p_k^c de las regiones



Algoritmo SO-TDOA

1.4 Se calcula el **vector característico** $\mathbf{z}_k$ de cada región.

$$\mathbf{z}_k(l) = \text{sign}(d_{ki} - d_{kj}), \quad l = \frac{(j-2)(j-1)}{2} + i$$



Los elementos de $\mathbf{z}_k$ tienen valores en $\{+1, -1\}$.

Algoritmo SO-TDOA

2. Etapa de medición y localización:

2.1 Se mide el **tiempo de llegada** ($\hat{t}_{si}$) de la vibración desde el objetivo a cada sensor i .

2.2 Se calcula el **vector característico del objetivo**.

$$\mathbf{z}_s(l) = \text{sign}(\hat{t}_{si} - \hat{t}_{sj}), \quad l = \frac{(j-2)(j-1)}{2} + i$$

Los elementos de $\mathbf{z}_s$ tienen valores en $\{+1, -1\}$.

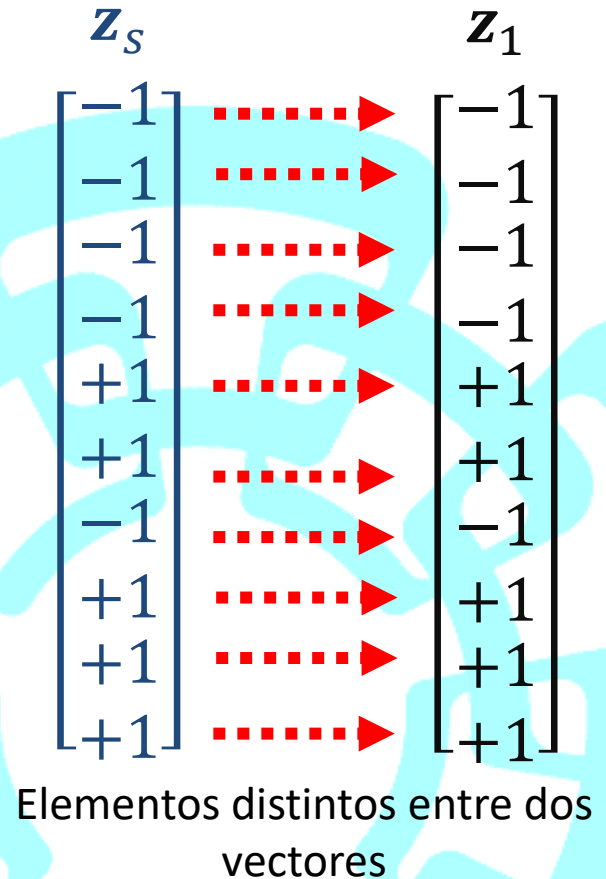
Algoritmo SO-TDOA

2.3 Se obtiene la **distancia de Hamming** (d_h) entre el vector medido $\mathbf{z}_s$ y cada vector característico $\mathbf{z}_k$ de las regiones R_k .

$$d_h(\mathbf{z}_s, \mathbf{z}_k) = \sum_{a=1}^{N(N-1)/2} (\mathbf{z}_s(a) \oplus \mathbf{z}_k(a))$$

Se obtiene el conjunto de regiones M_r que minimizan la distancia de Hamming.

$$M_r = \arg \min_{k \in [1 \dots Q]} d_h(\mathbf{z}_s, \mathbf{z}_k), \quad M_r \subset [1 \dots Q]$$



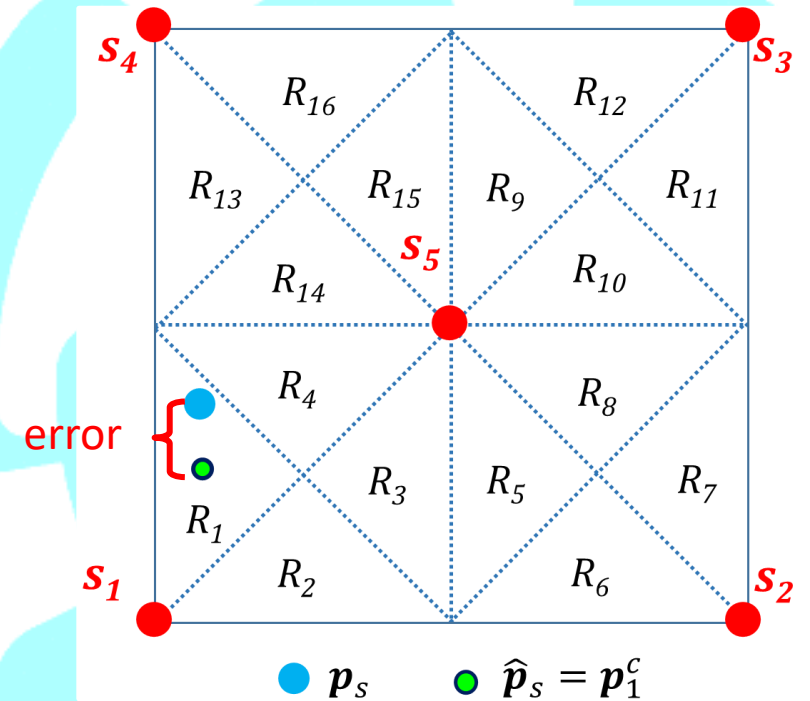
Algoritmo SO-TDOA

2.4 Estimación de la posición de la pisada $\hat{p}_s$

La posición de la pisada se estima **promediando los centroides** de todas las regiones r que minimizan la distancia de Hamming al vector medido $\mathbf{z}_s$.

$$\hat{p}_s = \frac{1}{|M_r|} \sum_{r \in M_r} p_r^c$$

Donde p_r^c es el centroide de la región r ($r \in M_r$).

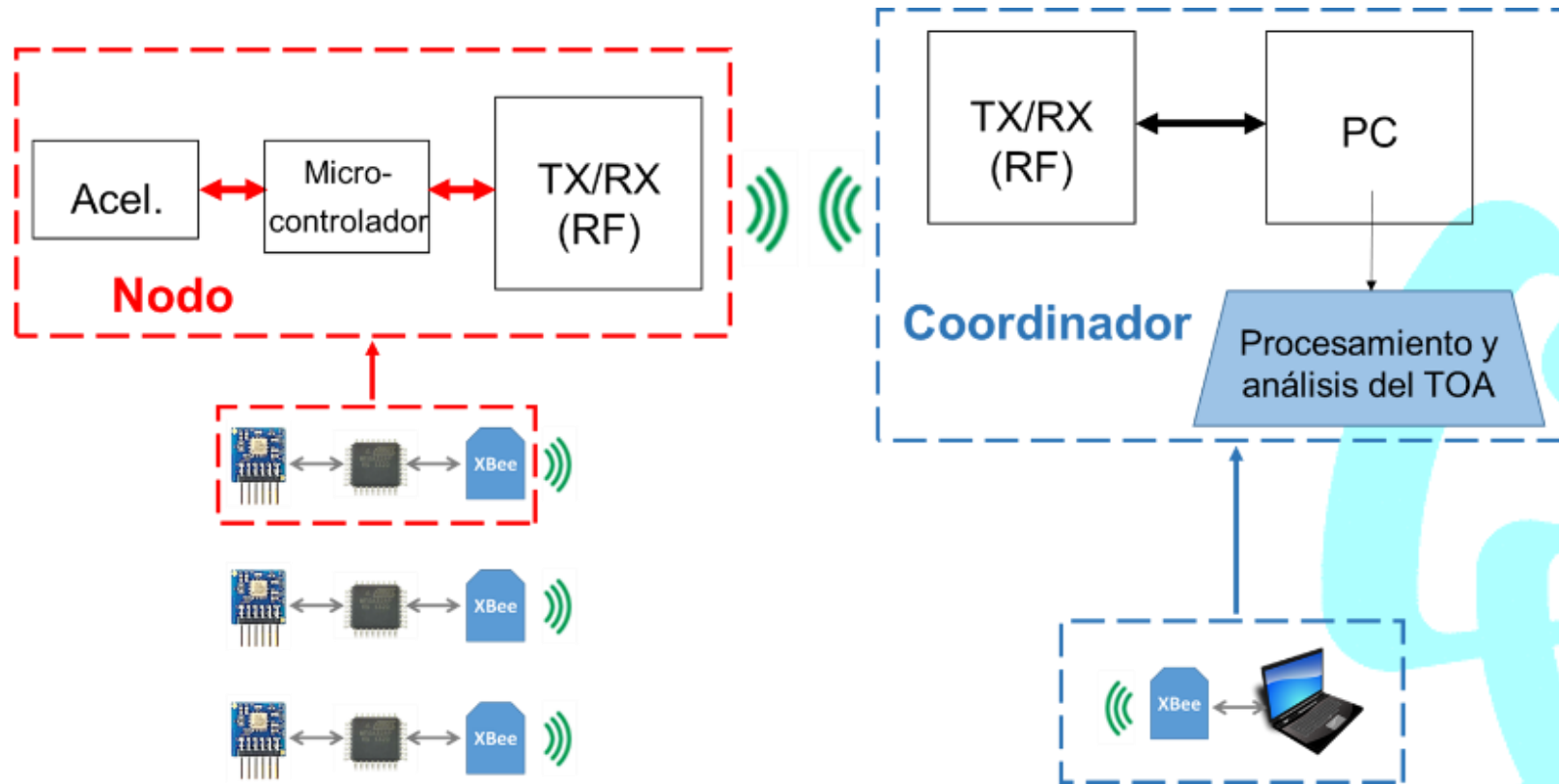


CONTENIDO

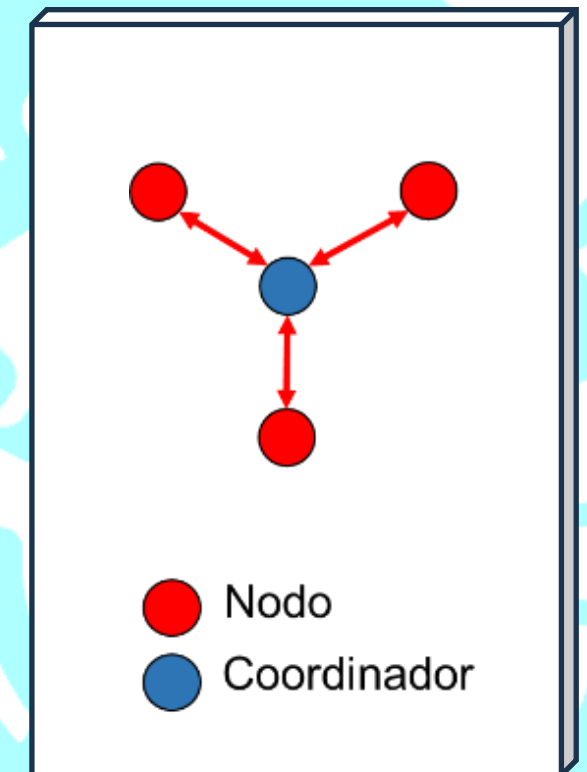
1. OBJETIVOS
2. JUSTIFICACIÓN
3. INTRODUCCIÓN
4. MÉTODOS DE LOCALIZACIÓN
5. ALGORITMO SO-TDOA
- 6. RED INALÁMBRICA DE SENSORES**
7. OPTIMIZACIÓN DE LA RED DE SENSORES
8. RESULTADOS
9. CONCLUSIONES
10. TRABAJO A FUTURO
11. PRODUCTIVIDAD
12. REFERENCIAS

Red Inalámbrica de Sensores

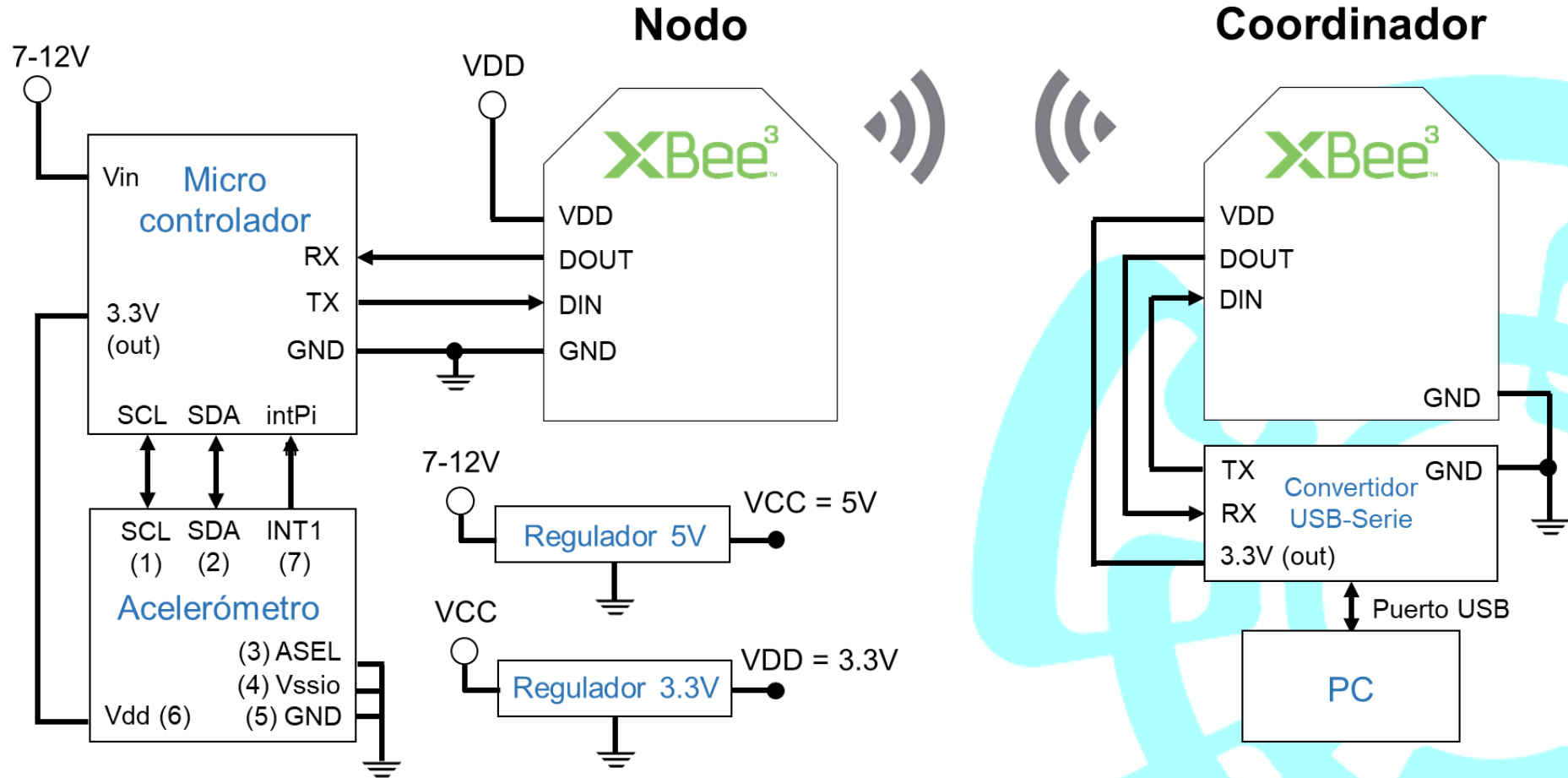
Diagrama a bloques del sistema



Topología punto-multipunto



Red Inalámbrica de Sensores



Acelerómetro Digital ADXL355

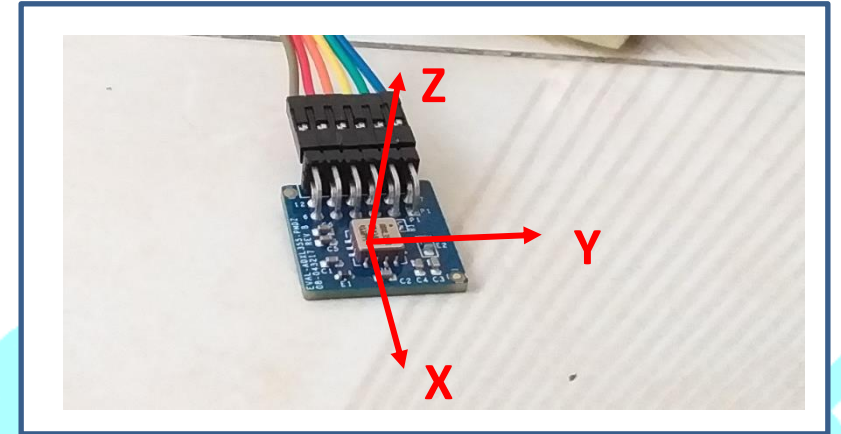
Características:

Mide en los tres ejes: X, Y, **Z**

Rangos de escalas seleccionables: **$\pm 2g$** , $\pm 4g$, $\pm 8g$

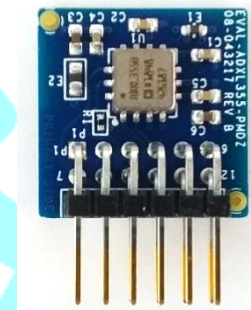
Sensitividad: 256,000 *LSB/g* (812 mV/g)

Ancho de banda: 1Hz - 1000 *Hz*



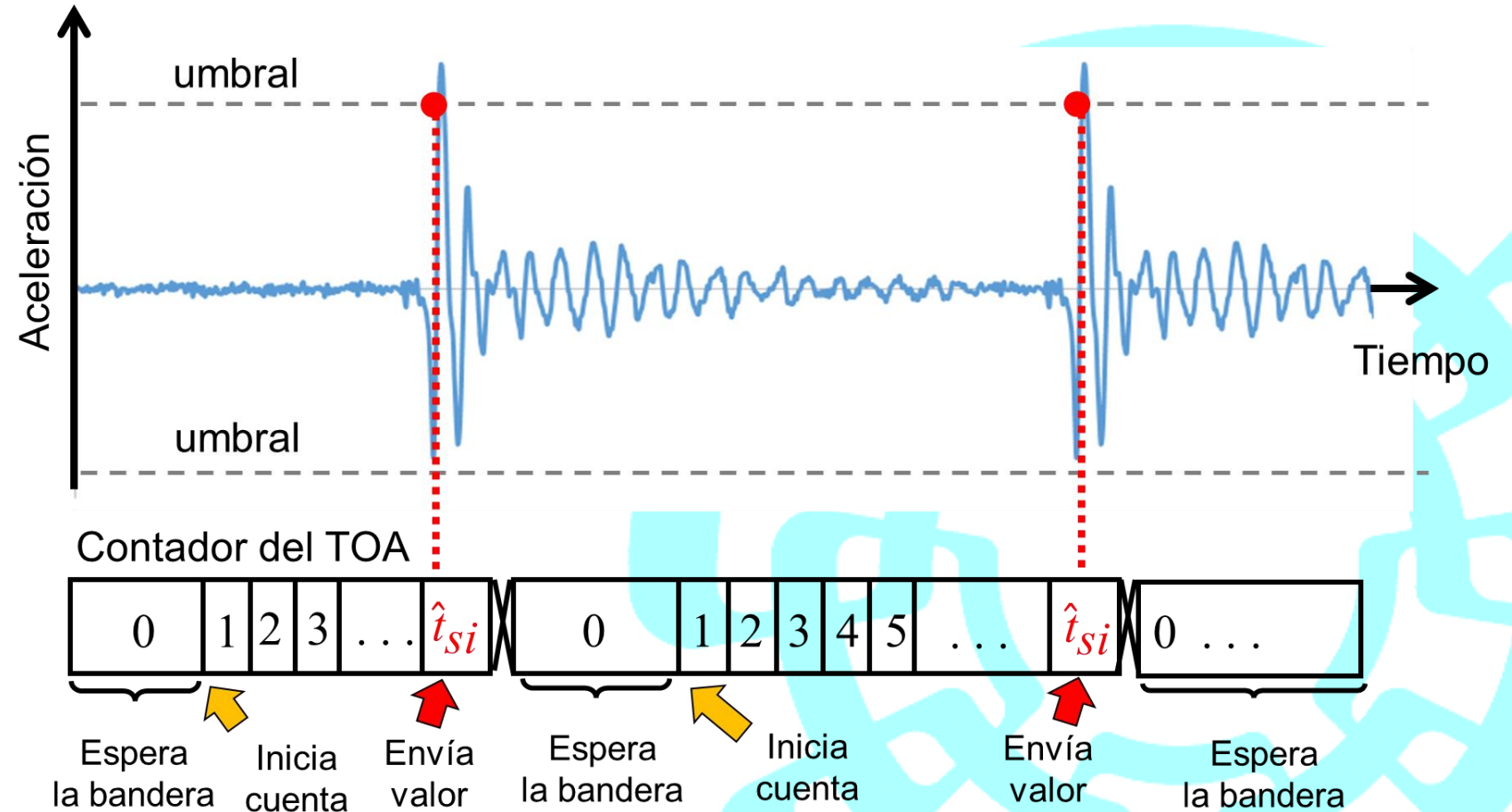
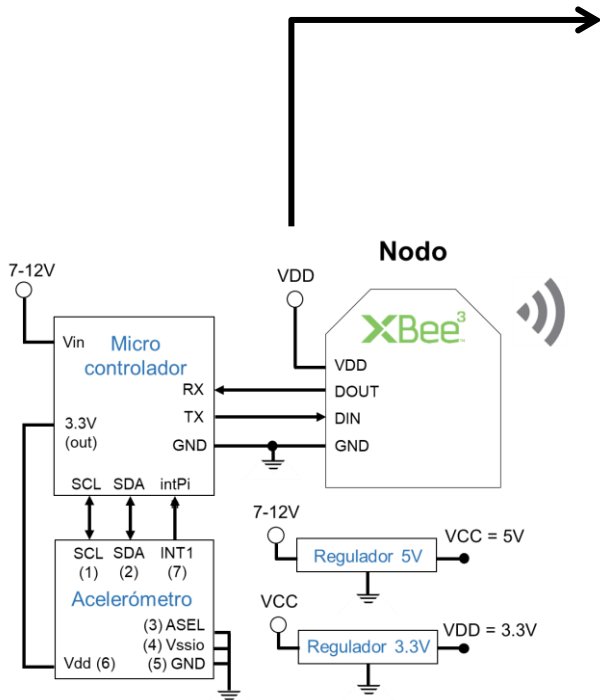
El acelerómetro digital ADXL355 cuenta con diferentes circuitos digitales:

- Cruce de umbral
- Ajuste de offset
- Interrupciones



Red Inalámbrica de Sensores

Medición Tiempo de Llegada (TOA) en los Nodos



Red Inalámbrica de Sensores

- La red está diseñada para trabajar a **bajas tasas de transmisión/recepción** de datos
- La red realiza la detección de **cruce de umbral** directamente en los nodos
- La red está diseñada para **determinar el tiempo de llegada** (TOA) sin necesidad de almacenar una gran cantidad de datos para cada paso

CONTENIDO

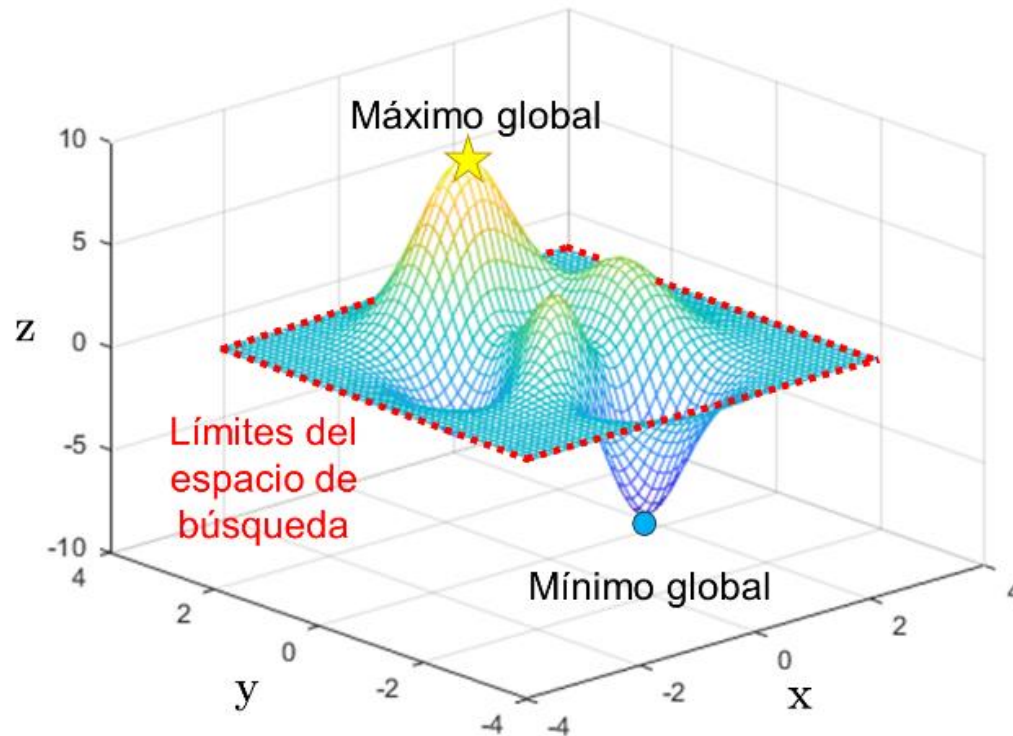
1. OBJETIVOS
2. JUSTIFICACIÓN
3. INTRODUCCIÓN
4. MÉTODOS DE LOCALIZACIÓN
5. ALGORITMO SO-TDOA
6. RED INALÁMBRICA DE SENSORES
- 7. OPTIMIZACIÓN DE LA RED DE SENSORES**
8. RESULTADOS
9. CONCLUSIONES
10. TRABAJO A FUTURO
11. PRODUCTIVIDAD
12. REFERENCIAS

Optimización de la Red de Sensores

Optimización

La optimización es el proceso en el que se busca el **mínimo** o **máximo** de una función.

A esta función se le conoce como **Función Objetivo**.



Optimización

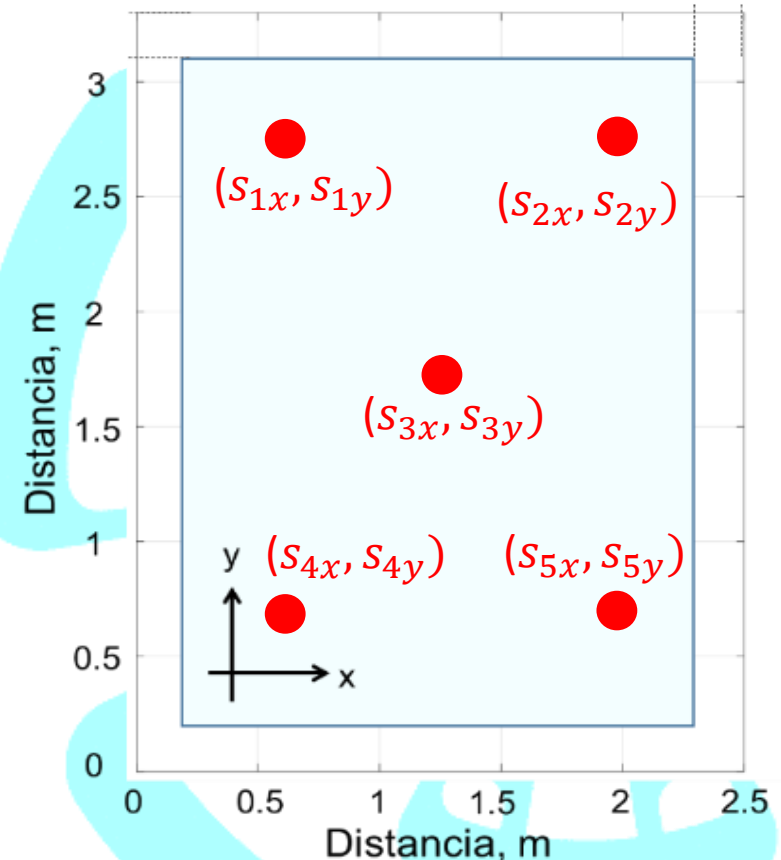
Buscamos **minimizar el error de localización de las pisadas**

- Optimizar el **número de sensores**
- Optimizar la **ubicación de los sensores** dentro de la habitación

Debemos **definir la Función Objetivo**

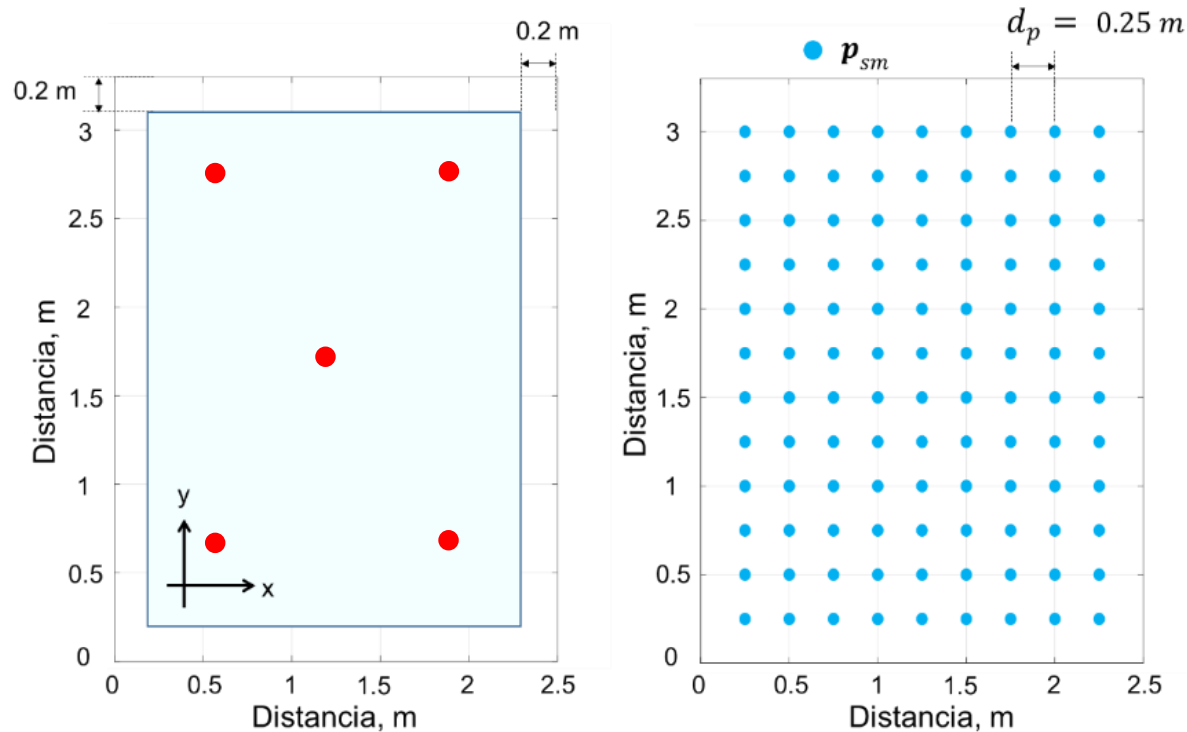
Supongamos que S contiene las coordenadas (x, y) de los sensores

$$S = [s_{1x} \ s_{1y} \ s_{2x} \ s_{2y} \ \dots \ s_{Nx} \ s_{Ny}]$$



Optimización

Encontrar la **ubicación de los sensores** que **minimicen el error cuadrático medio (MSE)** de la localización de las pisadas



Encontrar

$$\mathbf{S} = [s_{1x} \ s_{1y} \ s_{2x} \ s_{2y} \ \dots \ s_{Nx} \ s_{Ny}]$$

Que minimice

$$MSE = \frac{1}{N_p} \sum_{m=1}^{N_p} (error_m)^2$$

$$error_m = |\mathbf{p}_{sm} - \hat{\mathbf{p}}_{sm}|$$

SO-TDOA

**Función
Objetivo**

$$MSE = \frac{1}{N_p} \sum_{m=1}^{N_p} \left| \mathbf{p}_{sm} - \frac{1}{\left| \arg \min_{k \in [1 \dots Q]} \sum_{a=1}^{N(N-1)/2} (\mathbf{z}_{sm}(a) \oplus \mathbf{z}_k(a)) \right|} \sum_{r \in M_{rm}} \mathbf{p}_{rm}^c \right|^2$$

Optimización

Metaheurísticas Bio-Inspiradas



**Particle Swarm
Optimization**



**Grey Wolf
Optimization**

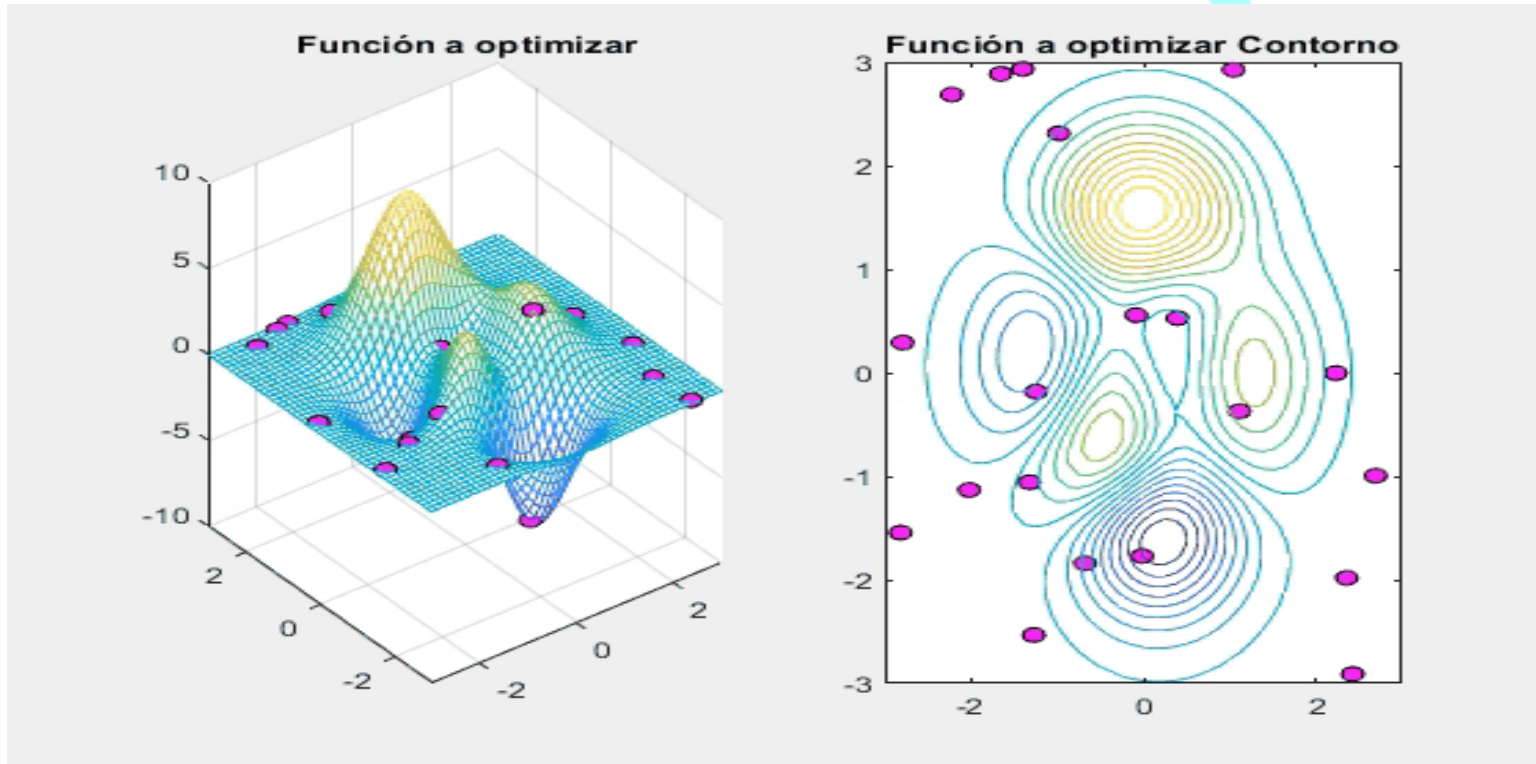


Artificial Bee Colony

Optimización

Se busca el mínimo de la función mediante la **evaluación y movimiento de individuos** en el espacio de búsqueda.

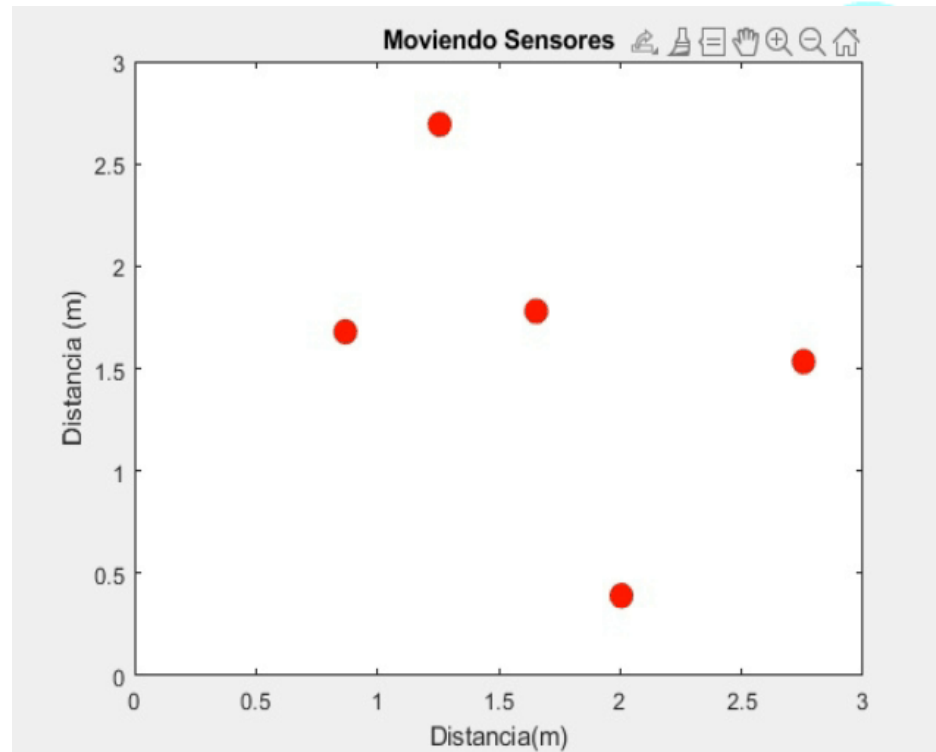
Cada individuo es **una posible solución** al problema de optimización



Optimización

En cada iteración **se actualiza la posición de los sensores** y se almacena la ubicación de los que entregan el mínimo MSE.

La optimización se realiza **20 veces** para cada algoritmo



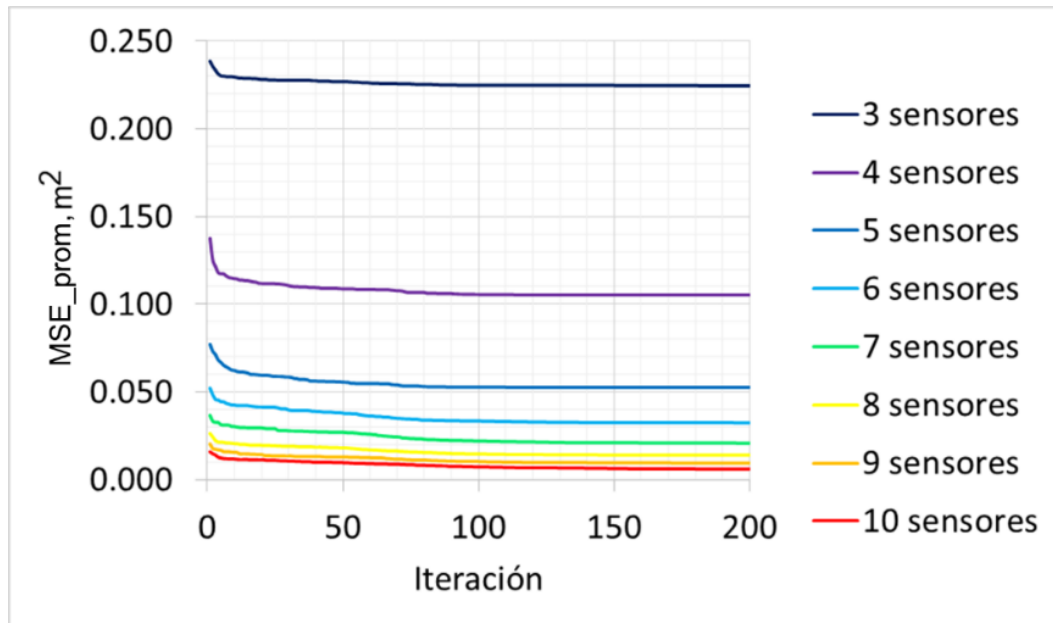
Optimización del Número de Sensores

Se analizan de **3 a 10 sensores**

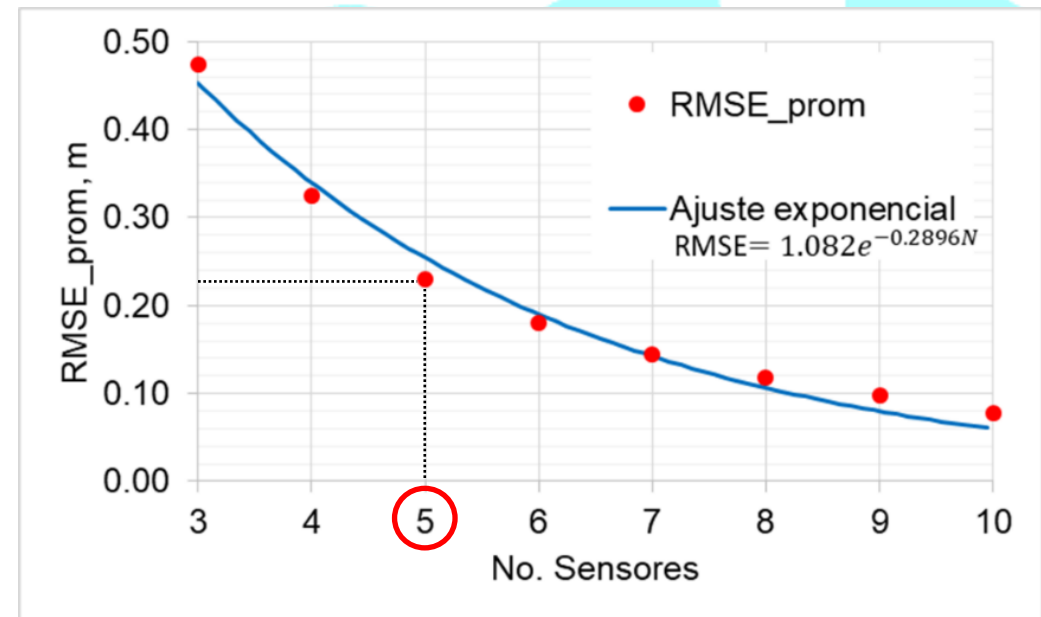
La optimización del **número de sensores** muestra un comportamiento **exponencial**

$$RMSE_prom = 1.082e^{-0.2896N}$$

Convergencia de la optimización



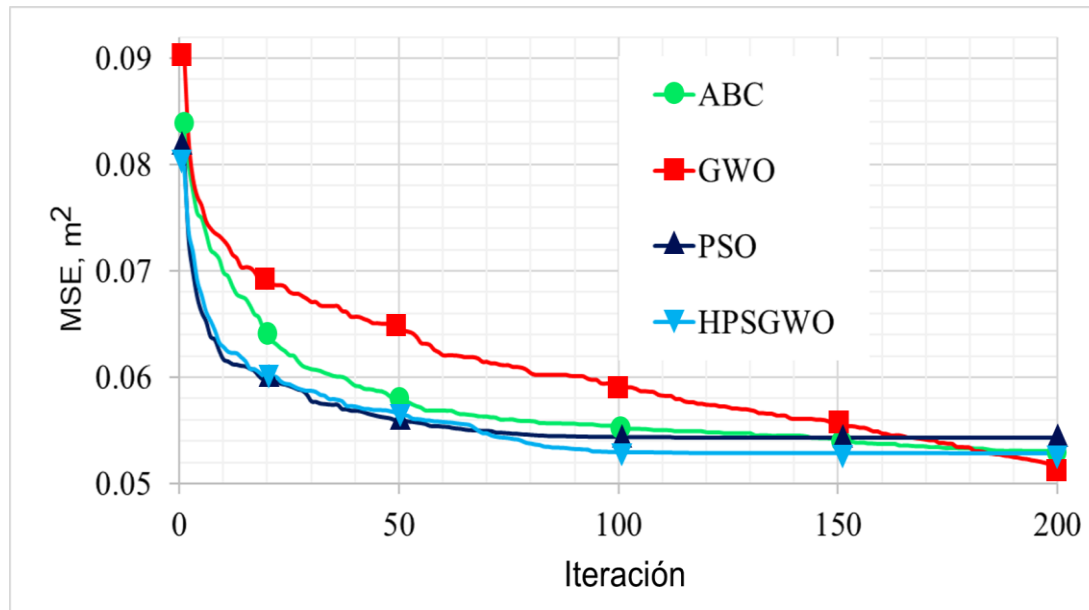
RMSE en función del No. de sensores



Optimización usando el algoritmo HPSGWO

Optimización de la Ubicación de los Sensores

La optimización de la **ubicación de los sensores** redujo el RMSE en un **27.9%** para toda la habitación



ABC: Colonia de Abejas

GWO: Lobos Grises

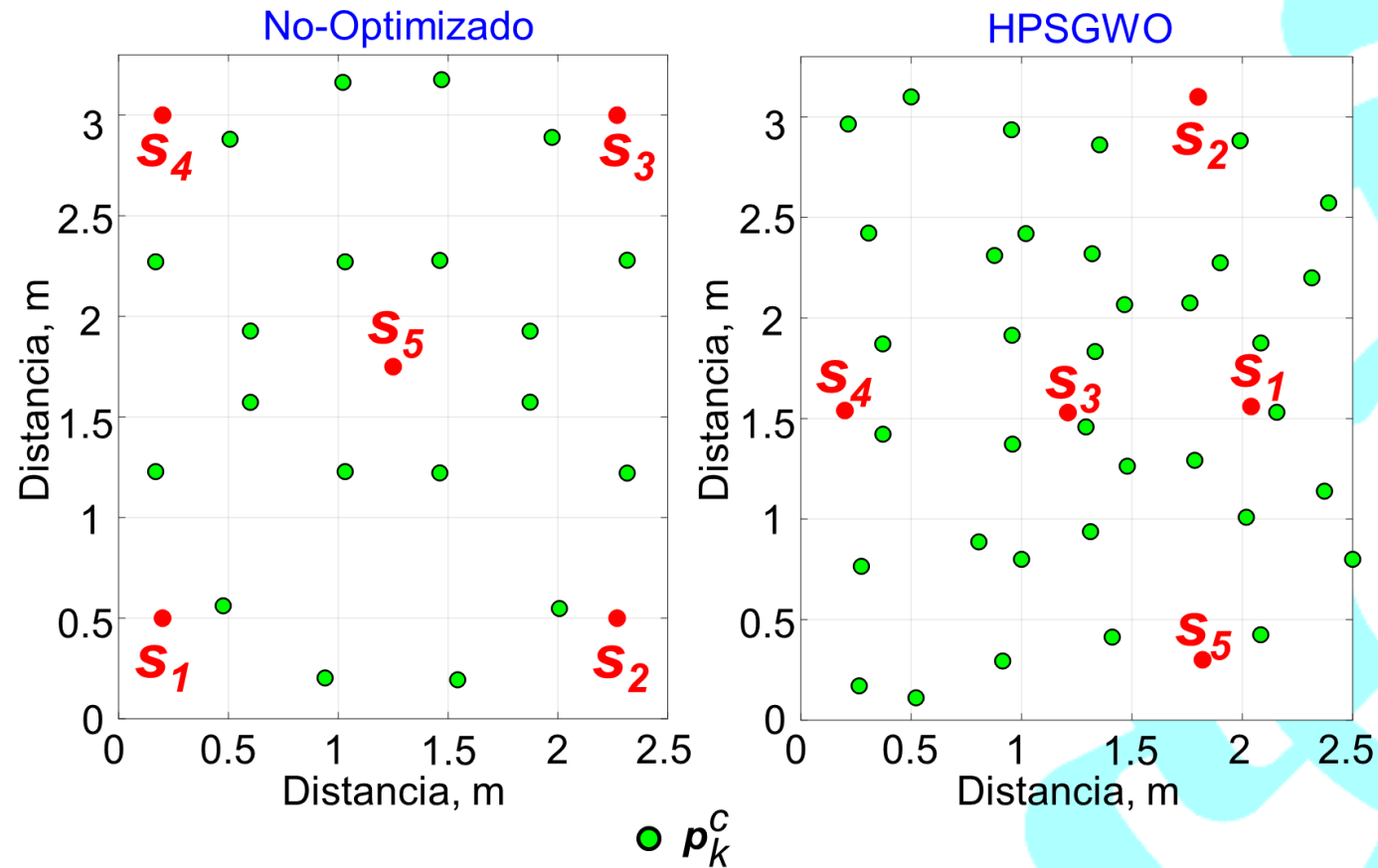
PSO: Enjambre de Partículas

HPSGWO: Híbrido PSO y GWO

Algoritmo de Optimización	MSE Mín. (m²)	MSE Máx. (m²)	DE (m²)
No Optimizado	0.091	0.091	0
ABC	0.048	0.055	0.0017
GWO	0.048	0.059	0.0033
PSO	0.050	0.063	0.0028
HPSGWO	0.047	0.058	0.0027

Optimización y algoritmo SO-TDOA

La optimización de la **ubicación de los sensores aumenta el número de centroides** y con esto **reduce el error de localización**



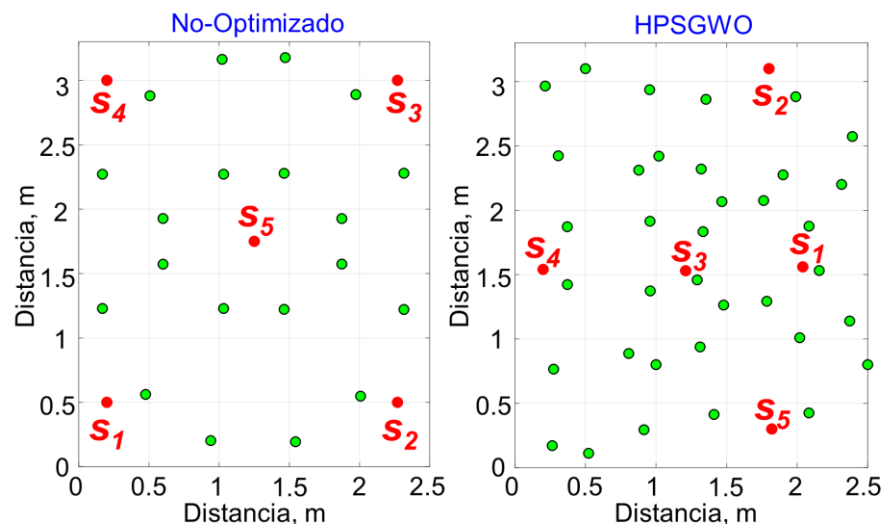
CONTENIDO

1. OBJETIVOS
2. JUSTIFICACIÓN
3. INTRODUCCIÓN
4. MÉTODOS DE LOCALIZACIÓN
5. ALGORITMO SO-TDOA
6. RED INALÁMBRICA DE SENSORES
7. OPTIMIZACIÓN DE LA RED DE SENSORES
- 8. RESULTADOS**
9. CONCLUSIONES
10. TRABAJO A FUTURO
11. PRODUCTIVIDAD
12. REFERENCIAS

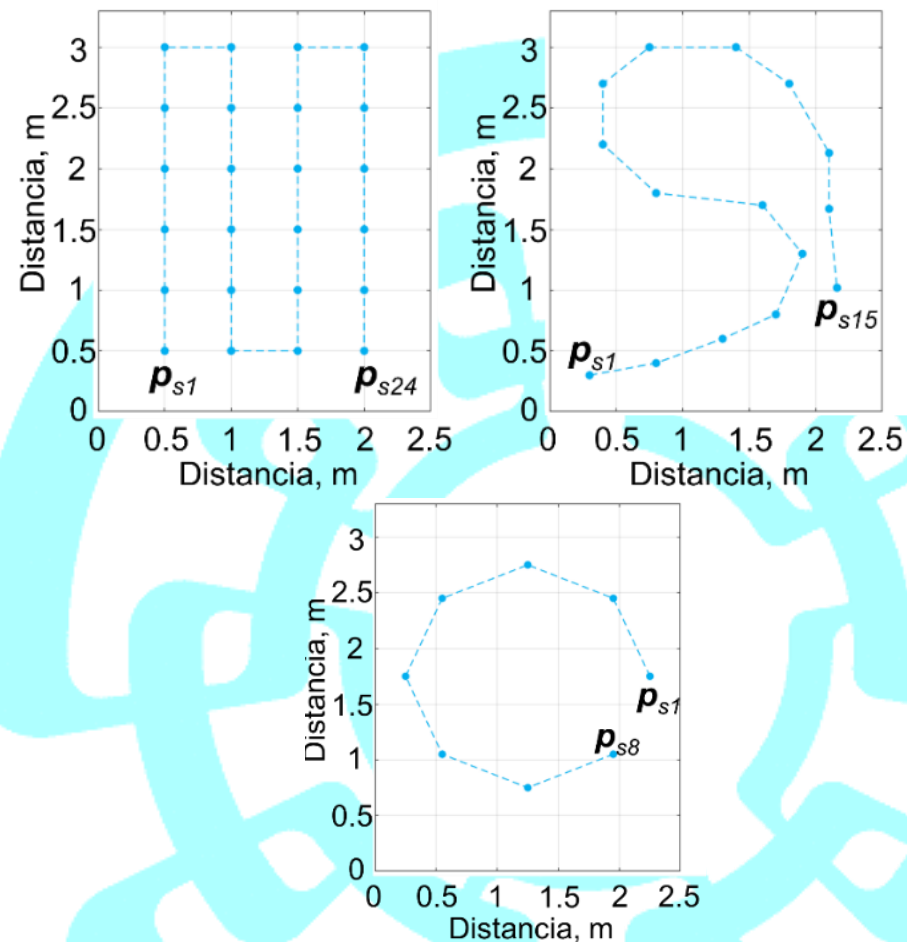
Localización de pisadas

Habitación de Pruebas

Piso de Concreto
11 cm de espesor
2.5m x 3.3m

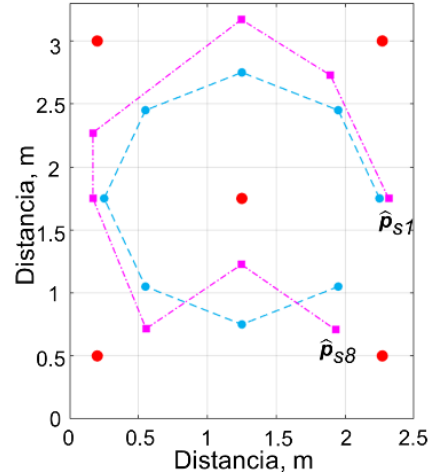
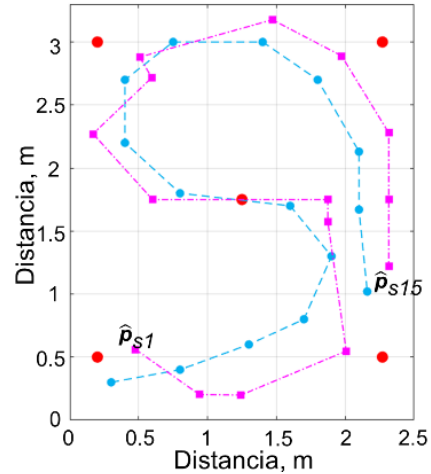
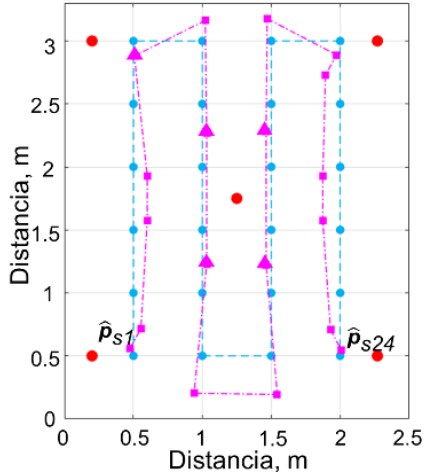


Trayectorias Propuestas

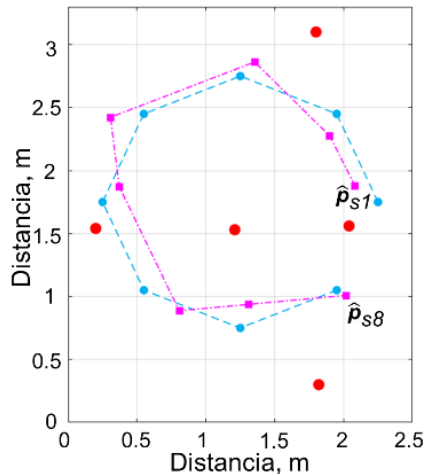
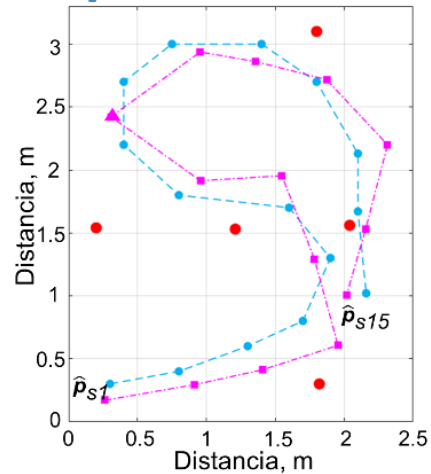
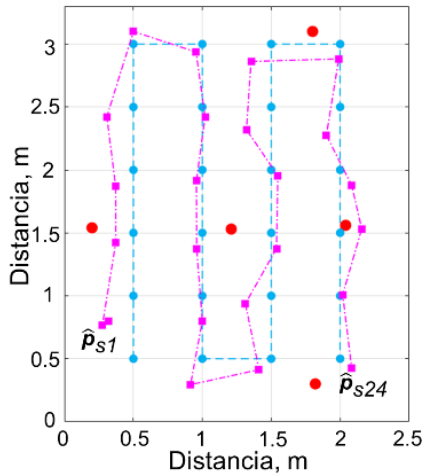


Localización de pisadas

No-Optimizada



Optimizada



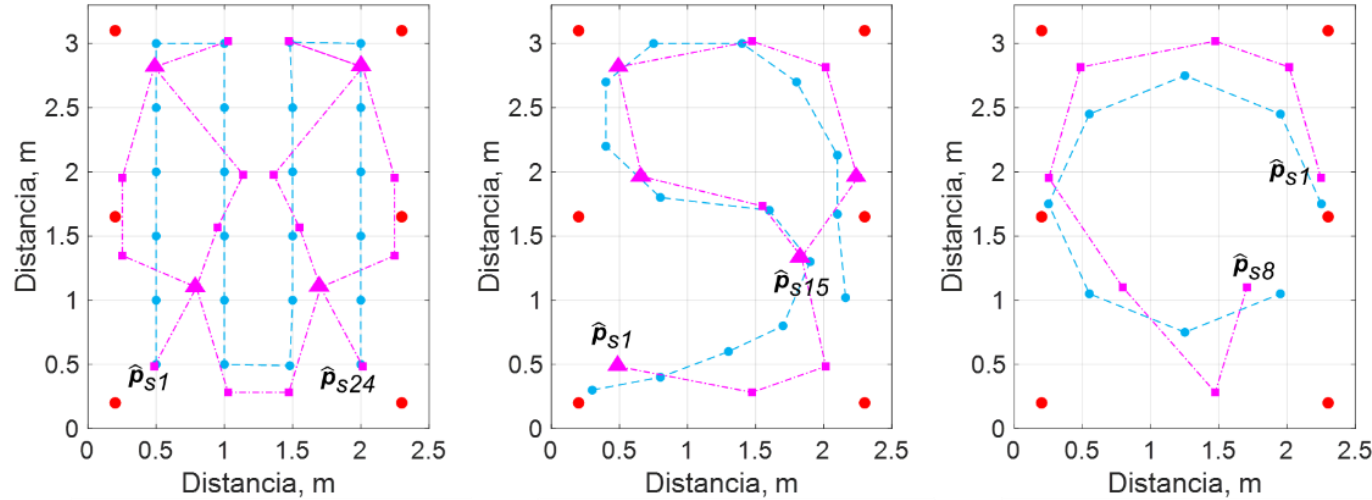
RMSE

	Trayectoria 1	Trayectoria 2	Trayectoria 3
	RMSE (m)	RMSE (m)	RMSE (m)
No-Optimizada	0.259	0.285	0.389
Optimizada (HPSGWO)	0.211	0.233	0.207
Reducción del Error	18.53%	18.24%	46.78%

Después de la optimización, el RMSE se reduce entre **18.24%** y **46.78%** para las tres trayectorias propuestas.

Localización de pisadas

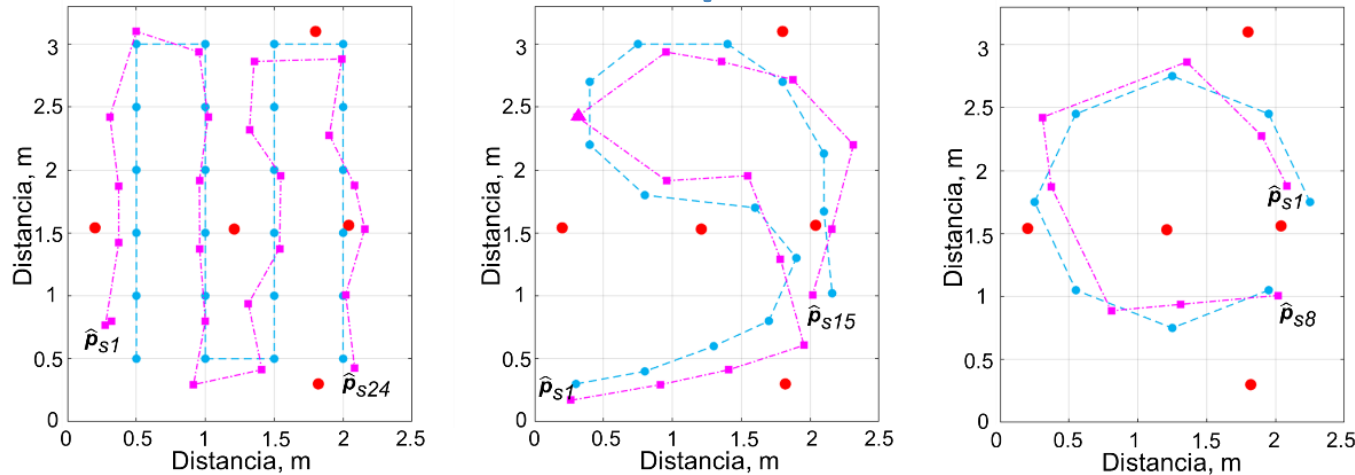
6 Sensores No-Optimizada



RMSE

	Trayectoria 1	Trayectoria 2	Trayectoria 3
6 sensores No-Optimizada	0.2691 m	0.2867 m	0.3304 m
5 sensores Optimizada	0.211 m	0.233 m	0.207 m
Reducción del Error	21.59%	18.73%	37.34%

5 Sensores Optimizada



La optimizada reduce el error de localización entre **18.73%** y **37.34%** para las tres trayectorias propuestas, aun cuando se tiene un sensor menos.

CONTENIDO

1. OBJETIVOS
2. JUSTIFICACIÓN
3. INTRODUCCIÓN
4. MÉTODOS DE LOCALIZACIÓN
5. ALGORITMO SO-TDOA
6. RED INALÁMBRICA DE SENSORES
7. OPTIMIZACIÓN DE LA RED DE SENSORES
8. RESULTADOS
- 9. CONCLUSIONES**
10. TRABAJO A FUTURO
11. PRODUCTIVIDAD
12. REFERENCIAS

CONCLUSIONES

- **Métodos de Localización:** Se investigaron métodos invasivos y no invasivos, optando por uno no invasivo basado en vibraciones en el piso.
- **Algoritmo SO-TDOA:** Se seleccionó el algoritmo de localización SO-TDOA que utiliza los tiempos de llegada de la señal a los sensores para la localización.
- **Red Inalámbrica:** Se propuso una red inalámbrica de sensores que no requiere enviar y procesar gran cantidad de información.
- **Optimización de Sensores:** Se optimizó el número y la ubicación de los sensores para minimizar el error de localización en toda la habitación.

CONCLUSIONES

- **Metaheurísticas Bio-inspiradas:** Se utilizaron metaheurísticas como ABC, PSO, GWO y HPSGWO, reduciendo el error de localización en más del 25%.
- **Número de Sensores:** Aumentar el número de sensores disminuye el error de localización de manera exponencial.
- **Desempeño Mejorado:** Se demostró que la optimización de la ubicación de los sensores puede mejorar el desempeño del algoritmo de localización SO-TDOA.
- **Pruebas Experimentales:** Las pruebas mostraron una disminución del RMSE entre 18.25% y 46.78% tras la optimización.

CONCLUSIONES

- Red Optimizada:** Una red optimizada de 5 sensores tuvo un error menor que una red no optimizada de 6 sensores, con una reducción del RMSE entre 18.73% y 37.34%.

- Recomendación:** Optimizar el número y la ubicación de los sensores antes de implementar un algoritmo de localización para mejorar el seguimiento de la trayectoria y reducir costos.

Los resultados de este trabajo indican que el sistema propuesto puede servir como base para el análisis de caminatas reales. Sin embargo, se necesitan pruebas adicionales para su aplicación debido a factores como la variabilidad en la marcha de diferentes personas, interferencias ambientales como muebles en la habitación, y la complejidad de procesar pisadas más rápidas y más frecuentes en comparación con los impactos aislados utilizados en las pruebas del sistema actual.

CONTENIDO

1. OBJETIVOS
2. JUSTIFICACIÓN
3. INTRODUCCIÓN
4. MÉTODOS DE LOCALIZACIÓN
5. ALGORITMO SO-TDOA
6. RED INALÁMBRICA DE SENSORES
7. OPTIMIZACIÓN DE LA RED DE SENSORES
8. RESULTADOS
9. CONCLUSIONES
- 10. TRABAJO A FUTURO**
11. PRODUCTIVIDAD
12. REFERENCIAS

Trabajo a Futuro

- Realizar experimentos en habitaciones con obstáculos (muebles) y con caminatas reales.
- Mejorar el sistema para localizar a una persona en tiempo real, incluyendo una interfaz amigable para el usuario.
- Realizar un estudio para localizar a más de una persona dentro de la habitación.
- Proponer un sistema de bajo costo en el que los sensores se encuentren montados bajo el piso de la habitación para evitar que sean un obstáculo para los ocupantes.

CONTENIDO

1. OBJETIVOS
2. JUSTIFICACIÓN
3. INTRODUCCIÓN
4. MÉTODOS DE LOCALIZACIÓN
5. ALGORITMO SO-TDOA
6. RED INALÁMBRICA DE SENSORES
7. OPTIMIZACIÓN DE LA RED DE SENSORES
8. RESULTADOS
9. CONCLUSIONES
10. TRABAJO A FUTURO
- 11. PRODUCTIVIDAD**
12. REFERENCIAS

PRODUCTIVIDAD

Producto de esta tesis:

- 1 artículo en la revista **Measurement Science and Technology – IOPscience**

Producto de otras investigaciones:

- 2 artículos en la revista **Microsystem Technologies**
- 1 artículo en la revista **Measurement Science and Technology – IOPscience**
- 5 artículos en la **International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control (CCE)**

CONTENIDO

1. OBJETIVOS
2. JUSTIFICACIÓN
3. INTRODUCCIÓN
4. MÉTODOS DE LOCALIZACIÓN
5. ALGORITMO SO-TDOA
6. RED INALÁMBRICA DE SENSORES
7. OPTIMIZACIÓN DE LA RED DE SENSORES
8. RESULTADOS
9. CONCLUSIONES
10. TRABAJO A FUTURO
11. PRODUCTIVIDAD
- 12. REFERENCIAS**

REFERENCIAS

- [1] J. D. Poston, R. M. Buehrer, and P. A. Tarazaga, "Indoor footstep localization from structural dynamics instrumentation," *Mech Syst Signal Process*, vol. 88, pp. 224–239, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2016.11.023>.
- [2] H. Lee, J. W. Park, and A. Helal, "Estimation of Indoor Physical Activity Level Based on Footstep Vibration Signal Measured by MEMS Accelerometer for Personal Health Care Under Smart Home Environments," *Mobile Entity Localization and Tracking in GPS-less Environments*, vol. 5801, pp. 148–162, 2009.
- [3] S. A. Zekavat (Reza) and R. M. Buehrer, *Handbook of Position Location Theory, Practice, and Advances*, 1st ed. John Wiley & Sons, 2019.
- [4] S. Drira and I. F. C. Smith, "A framework for occupancy detection and tracking using floor-vibration signals," *Mech Syst Signal Process*, vol. 168, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2021.108472>.
- [5] C. Liu, L. Xiey, C. Wangy, J. Wu, and S. Luy, "Track Your Foot Step: Anchor-Free Indoor Localization Based on Sensing Users' Foot Steps," in *2016 IEEE 13th International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems*, 2016, pp. 201–209.
- [6] S. Alajlouni, M. Albakri, and P. Tarazaga, "Impact localization in dispersive waveguides based on energy-attenuation of waves with the traveled distance," *Mech Syst Signal Process*, vol. 105, pp. 361–376, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2017.12.007>.
- [7] S. Alajlouni and P. Tarazaga, "A new fast and calibration-free method for footstep impact localization in an instrumented floor," *Journal of Vibration and Control*, vol. 25, no. 10, pp. 1–10, 2019, doi: <https://doi.org/10.1177/1077546319829943>.
- [8] S. Alajlouni and P. Tarazaga, "A passive energy-based method for footstep impact localization, using an underfloor accelerometer sensor network with Kalman filtering," *Journal of Vibration and Control*, vol. 26, no. 11–12, pp. 941–951, 2020, doi: <https://doi.org/10.1177/1077546319890520>.

REFERENCIAS

- [9] R. Bahroun, O. Michel, F. Frassati, M. Carmona, and J. L. Lacoume, “New algorithm for footstep localization using seismic sensors in an indoor environment,” *J Sound Vib*, vol. 333, no. 3, pp. 1046–1066, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2013.10.004>.
- [10] F. Li, J. Clemente, M. Valero, Z. Tse, S. Li, and W. Z. Song, “Smart Home Monitoring System via Footstep-Induced Vibrations,” *IEEE Syst J*, vol. 14, no. 3, pp. 3383–3389, 2020, doi: <https://doi.org/10.1109/JSYST.2019.2937960>.
- [11] S. M. Ziola and M. R. Gorman, “Source location in thin plates using cross-correlation,” *Journal of Acoustical Society of America*, no. 90, pp. 2551–2556, 1991.
- [12] J. M. Hamilton, “Design and Implementation of Vibration Data Acquisition in Goodwin Hall for Structural Health Monitoring, Human Motion, and Energy Harvesting Research,” Blacksburg, 2015.
- [13] PCB Piezotronics, “Model 352B. Installation and Operating Manual,” NY, 2002.
- [14] S. S. Rao, *Engineering optimization: Theory and Practice*, 5th ed. John Wiley & Sons, 2020.
- [15] K.-L. Du and M. Swamy, *Search and Optimization by Metaheuristics Techniques and Algorithms Inspired by Nature*, 1st ed. Birkhäuser Cham, 2016. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-41192-7>.
- [16] L. Liberti and N. Maculan, Eds., *Global Optimization. From Theory to Implementation*, 1st ed. Springer New York, NY, 2006. doi: <https://doi.org/10.1007/0-387-30528-9>.
- [17] E.-G. Talbi, *Metaheuristics: from design to implementation*. John Wiley & Sons, 2009.
- [18] F. Rothlauf, *Design of Modern Heuristics. Principles and Application*. Springer Berlin, Heidelberg, 2011. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-540-72962-4>.
- [19] M. Cavazzuti, *Optimization methods. From Theory to Design Scientific and Technological Aspects in Mechanics*, 1st ed. Springer Berlin Heidelberg, 2013. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-31187-1>.

REFERENCIAS

- [20] S. Mirjalili, S. M. Mirjalili, and A. Lewis, “Grey Wolf Optimizer,” *Advances in Engineering Software*, vol. 69, pp. 46–61, 2014, doi: 10.1016/j.advengsoft.2013.12.007.
- [21] I. M. El-Hasnony, S. I. Barakat, and R. R. Mostafa, “Optimized ANFIS Model Using Hybrid Metaheuristic Algorithms for Parkinson’s Disease Prediction in IoT Environment,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 119252–119270, 2020, doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3005614>.
- [22] D. Halliday and R. Resnick, *Physics. Parts 1 and 2*,. John Wiley and Sons, 1978.
- [23] F. Ciampa and M. Meo, “Acoustic emission source localization and velocity determination of the fundamental mode A0 using wavelet analysis and a Newton-based optimization technique,” *Smart Mater Struct*, vol. 19, no. 4, 2010, doi: <https://doi.org/10.1088/0964-1726/19/4/045027>.
- [24] W. Zhao, L. Wang, and Z. Zhang, *New optimization algorithms and their applications*, 1st ed. Elsevier, 2021.
- [25] F. A. Şenel, F. Gökçe, A. S. Yüksel, and T. Yiğit, “A novel hybrid PSO–GWO algorithm for optimization problems,” *Eng Comput*, vol. 35, no. 4, pp. 1359–1373, 2019, doi: <https://doi.org/10.1007/s00366-018-0668-5>.
- [26] D. H. Wolpert and W. G. Macready, “No Free Lunch Theorems for Optimization,” *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 1, no. 1, pp. 67–82, 1997, doi: <https://doi.org/10.1109/4235.585893>.
- [27] J. Kennedy and R. Eberhart, “Particle swarm optimization,” in *Proceedings of ICNN’95 - International Conference on Neural Networks*, IEEE, 1995, pp. 1942–1948. doi: <https://doi.org/10.1109/ICNN.1995.488968>.
- [28] D. Karaboga and B. Basturk, “A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: Artificial bee colony (ABC) algorithm,” *Journal of Global Optimization*, vol. 39, no. 3, pp. 459–471, 2007, doi: <https://doi.org/10.1007/s10898-007-9149-x>.

REFERENCIAS

- [29] D. Cekus and D. Skrobek, "The influence of inertia weight on the Particle Swarm Optimization algorithm," *Journal of Applied Mathematics and Computational Mechanics*, vol. 17, no. 4, pp. 5–11, 2018, doi: <http://dx.doi.org/10.17512/jamcm.2018.4.01>.
- [30] R. C. Eberhart and Y. Shi, "Comparing Inertia Weights and Constriction Factors in Particle Swarm Optimization," in *Proceedings of the 2000 Congress on Evolutionary Computation. CEC00 (Cat. No.00TH8512)*, 2000, pp. 84–88. doi: <https://doi.org/10.1109/CEC.2000.870279>.
- [31] Analog Devices, "Low Noise, Low Drift, Low Power, 3-Axis MEMS Accelerometers. ADXL354/ADXL355 datasheet," 2020. Accessed: Jan. 01, 2023. [Online]. Available: https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/adxl354_adxl355.pdf
- [32] DIGI, "DIGI XBEE3 ZIGBEE 3.0, Easy-to-add connectivity in a compact, low-power, low-profile footprint." Accessed: Jan. 01, 2023. [Online]. Available: <https://www.digi.com/products/embedded-systems/digi-xbee/rf-modules/2-4-ghz-rf-modules/xbee3-zigbee-3#specifications>
- [33] Arduino, "Arduino Store." Accessed: Jan. 01, 2023. [Online]. Available: <https://store.arduino.cc/products/arduino-nano>
- [34] B. Akay and D. Karaboga, "Parameter Tuning for the Artificial Bee Colony Algorithm," in *International Conference on Computational Collective Intelligence. ICCCI 2009: Computational Collective Intelligence. Semantic Web, Social Networks and Multiagent Systems*, 2009, pp. 608–619. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-642-04441-0_53.

GRACIAS