



# FACULTAD DE INGENIERIA

Universidad de Buenos Aires

## Captación del entorno y mapeo local

Presentación de plan de tesis de Ingeniería Electrónica

<b>Autor</b>	Tomás de Aguirre	103887	tdeaguirre@fi.uba.ar
<b>Tutor</b>	Ignacio Mas	206872	imas@fi.uba.ar
<b>Co-tutor</b>	Sergio Lew	128563	slew@fi.uba.ar

# Índice

<b>1. Modalidad del Trabajo</b>	<b>2</b>
<b>2. Objetivo</b>	<b>2</b>
2.1. Objetivo del proyecto . . . . .	2
2.2. Etapas del proyecto . . . . .	2
2.2.1. Captación del entorno y mapeo local . . . . .	2
2.2.2. Traducción del entorno a un mapa táctil . . . . .	3
2.3. Objetivo de tesis . . . . .	3
2.3.1. Objetivo técnico . . . . .	3
2.3.2. Métricas y criterios de evaluación . . . . .	3
<b>3. Contexto y motivación</b>	<b>4</b>
3.1. Problemática . . . . .	4
3.2. Estado del arte del proyecto . . . . .	4
3.3. Enfoque general del proyecto . . . . .	4
<b>4. Descripción de la Tesis</b>	<b>5</b>
4.1. Áreas Profesionales de Relevancia . . . . .	5
4.2. Arquitectura . . . . .	5
4.3. Adquisición y medición de profundidad . . . . .	5
4.3.1. Sistemas embebidos . . . . .	5
<b>5. Mejoras y Aportes al Proyecto</b>	<b>5</b>
<b>6. Estado del arte de la tesis</b>	<b>6</b>
<b>7. Plan de Trabajo y Entregables</b>	<b>6</b>
<b>8. Resultados esperados</b>	<b>6</b>
8.1. Resultados esperados del proyecto global . . . . .	6
8.2. Resultados esperados de la tesis . . . . .	7

# 1. Modalidad del Trabajo

El presente trabajo se encuadra en la modalidad **Tesis de Ingeniería Electrónica**. Este documento describe el plan de tesis correspondiente a la primera etapa de un proyecto de investigación y desarrollo de mayor alcance, estructurado en dos etapas complementarias e independientes.

A lo largo del texto, el término *proyecto* hará referencia al desarrollo integral del sistema completo, abarcando ambas etapas. En contraste, el término *tesis* se utilizará para referirse específicamente al trabajo de investigación y desarrollo correspondiente a la primera etapa.

## 2. Objetivo

### 2.1. Objetivo del proyecto

El objetivo final del proyecto es desarrollar un sistema portátil de asistencia sensorial que permita a personas con ceguera o baja visión percibir su entorno mediante estímulos táctiles, con el fin de mejorar su seguridad, autonomía y capacidad de desplazamiento independiente.

La base científica del proyecto se apoya en el principio de neuroplasticidad sensorial, según el cual el cerebro es capaz de reorganizarse para explotar de manera más eficiente los sentidos restantes cuando la visión está reducida o ausente. A partir de este principio, el proyecto busca diseñar una interfaz que traduzca información espacial visual en señales hápticas útiles, interpretables y funcionales para la navegación asistida.

El proyecto se estructura en dos etapas, que se abordarán en tesis separadas:

- Captación del entorno y mapeo local (esta tesis).
- Traducción del mapa a una interfaz háptica.

### 2.2. Etapas del proyecto

#### 2.2.1. Captación del entorno y mapeo local

Esta etapa se centra en la adquisición y procesamiento de información tridimensional del entorno en tiempo real, con el objetivo de construir una representación espacial simplificada del espacio inmediato frente al usuario.

El propósito de esta representación es condensar la información visual relevante en un formato estructurado y de baja dimensionalidad, adecuado para su posterior traducción a una interfaz háptica.

Durante esta etapa se analizarán distintas estrategias de reducción, agregación y estructuración de la información de profundidad, con el fin de preservar los elementos espaciales más relevantes para la detección y evasión de obstáculos, manteniendo al mismo tiempo baja latencia y estabilidad temporal.

En este contexto, el problema de ingeniería abordado en el marco de la tesis consiste en diseñar un sistema embebido capaz de adquirir información tridimensional del entorno, procesarla en tiempo real y generar una representación compacta, estable y de baja latencia, adecuada para ser utilizada como entrada de una interfaz háptica de asistencia a la movilidad.

### 2.2.2. Traducción del entorno a un mapa táctil

Consiste en representar la información espacial mediante estímulos hápticos. Estos pueden estar ubicados en distintas zonas del cuerpo y permitirán detectar proximidad u obstáculos a través de variaciones en intensidad, frecuencia o localización de la vibración.

Una vez desarrollados los módulos de percepción y salida háptica, se realizará la integración en un dispositivo portátil y autónomo que funcione en tiempo real.

## 2.3. Objetivo de tesis

Esta tesis se centra en la primera etapa: la captación del entorno y generación de un mapeo local compacto y estable en tiempo real.

### 2.3.1. Objetivo técnico

El objetivo técnico principal es desarrollar e implementar un módulo de percepción en ROS2 que, utilizando la cámara Intel RealSense D435i, genere en tiempo real una representación compacta del entorno a partir de información de profundidad, optimizada para su uso como entrada de una futura interfaz háptica de asistencia a la movilidad.

El módulo deberá procesar imágenes RGB-D en tiempo real mediante técnicas de filtrado espacial y temporal, aplicar estrategias de agregación y reducción de dimensionalidad, y producir como salida una matriz estructurada de baja resolución (por ejemplo,  $10 \times 5$ ) que represente una proyección compacta de la información de profundidad correspondiente al instante actual, preservando la información espacial relevante para la detección de obstáculos.

Asimismo, el sistema publicará los resultados en tópicos ROS2 estandarizados y proporcionará una interfaz serial para la transmisión eficiente de la matriz compacta hacia un microcontrolador encargado del control de los actuadores hápticos, cuya implementación corresponde a la segunda etapa del proyecto y no forma parte de esta tesis.

Adicionalmente, se implementará una capa de mapeo local de corto alcance, conceptualmente separada de la representación instantánea de profundidad, destinada a conservar información reciente de obstáculos y reutilizarla como mecanismo de protección frente a oclusiones temporales y cambios de orientación del sensor.

Para este propósito se incorporará información proveniente de una unidad de medición inercial (IMU), que permitirá estimar la orientación del sensor y compensar los cambios de pose durante la construcción y actualización del mapa local.

Los parámetros numéricos, umbrales y criterios de decisión serán determinados y refinados mediante una fase inicial de calibración y pruebas experimentales.

### 2.3.2. Métricas y criterios de evaluación

El desempeño del sistema será evaluado mediante métricas cuantitativas orientadas a caracterizar precisión, estabilidad y desempeño temporal, siguiendo criterios habituales en evaluación de sistemas de percepción visual y mapeo local [1].

En particular, se considerarán: (i) error de profundidad en escenarios controlados mediante referencias geométricas simples (p.ej., ajuste de plano y RMS error) [2], (ii) latencia end-to-end (captura  $\rightarrow$  procesamiento  $\rightarrow$  transmisión), (iii) desempeño en detección de obstáculos en escenarios controlados (precisión y recall bajo una definición operativa de obstáculo), (iv) estabilidad temporal del mapa local (variación temporal por celda), y (v) consumo de recursos computacionales (CPU y memoria) de la plataforma.

Estas métricas permitirán determinar la viabilidad del enfoque propuesto como módulo perceptual de un sistema de asistencia sensorial en tiempo real.

### 3. Contexto y motivación

#### 3.1. Problemática

Las personas con ceguera o visión reducida enfrentan dificultades significativas al desplazarse por entornos desconocidos o dinámicos. Las herramientas de asistencia tradicionales, como el bastón blanco o los perros guía, presentan limitaciones en alcance, resolución espacial y capacidad de anticipación frente a obstáculos no detectables a corta distancia.

En los últimos años han surgido dispositivos electrónicos de asistencia que incorporan sensores activos, sin embargo, la mayoría de estas soluciones se basa en sensores puntuales de corto alcance, lo que restringe la cantidad y calidad de información espacial disponible para el usuario.

Considerando lo anterior, resulta relevante explorar el uso de sensores visuales de profundidad como medio para obtener representaciones espaciales más ricas del entorno inmediato, manteniendo al mismo tiempo portabilidad, baja latencia y simplicidad de interacción.

#### 3.2. Estado del arte del proyecto

Se analizaron trabajos previos relacionados con dispositivos de asistencia sensorial para personas con discapacidad visual, destacando algunas propuestas representativas:

1. **Chaleco vibrotáctil** [3]: utiliza arreglos de actuadores de vibración para transmitir patrones espaciales al usuario, requiriendo movimientos corporales activos para explorar el entorno.
2. **Bastón inteligente** [4]: detecta obstáculos mediante sensores de corto alcance, dependiendo del movimiento manual y proporcionando información limitada al punto de contacto.
3. **Pulsera ultrasónica** [5]: emite vibraciones al detectar objetos cercanos, con baja resolución espacial y fuerte dependencia de la orientación del brazo.

Estas propuestas evidencian la viabilidad de la retroalimentación háptica como canal sensorial alternativo, pero también ponen de manifiesto las limitaciones de las soluciones basadas en sensores puntuales y de baja resolución espacial.

#### 3.3. Enfoque general del proyecto

El proyecto propone utilizar percepción visual basada en profundidad para construir representaciones espaciales densas del entorno inmediato, que posteriormente puedan ser traducidas a estímulos hápticos.

El sistema se montará en la cabeza del usuario, aprovechando la dirección natural de la mirada como eje principal de exploración. Esta configuración permite una percepción frontal continua del entorno sin necesidad de utilizar las manos ni modificar el patrón natural de locomoción.

A diferencia de las soluciones existentes, el proyecto se enfoca en obtener un mapa denso de profundidad mediante visión estéreo, con el objetivo de proporcionar una representación espacial más rica y estructurada, adecuada para una futura traducción háptica.

## 4. Descripción de la Tesis

### 4.1. Áreas Profesionales de Relevancia

El trabajo se encuadra principalmente dentro del área de Automatización y Control, debido a su enfoque en el desarrollo de sistemas de percepción y procesamiento en tiempo real, basados en tecnologías habitualmente utilizadas en robótica y navegación asistida.

Asimismo, el desarrollo propuesto involucra otras áreas propias de la Ingeniería Electrónica, tales como Sistemas Embebidos y Procesamiento de Señales e Imágenes, en tanto requiere el diseño e integración de hardware y software bajo restricciones de tiempo real, consumo y portabilidad.

### 4.2. Arquitectura

La tesis se desarrollará sobre el framework ROS2, aprovechando su modelo de comunicación basado en tópicos, servicios y acciones, y su ecosistema de herramientas para sensado, procesamiento en tiempo real y experimentación reproducible. Esto permite modularizar el sistema en nodos con responsabilidades bien definidas, facilitar el registro y análisis de datos (*logging* y *rosbags*) y acelerar el prototipado mediante paquetes existentes de la comunidad.

### 4.3. Adquisición y medición de profundidad

Se utilizará la cámara **Intel RealSense D435i** [6] como sensor principal de profundidad. Este dispositivo provee medición de profundidad por visión estéreo y una IMU integrada.

La captura y publicación de datos se realizará mediante **librealsense** y el paquete de soporte en ROS2 provisto por Intel, que permite publicar en tópicos estandarizados las imágenes y la información asociada (calibración, *frames* y *timestamps*).

#### 4.3.1. Sistemas embebidos

La plataforma de referencia propuesta es una **Raspberry Pi** (modelo a determinar), por su bajo consumo, soporte Linux y compatibilidad con ROS2. No obstante, la elección final dependerá de las mediciones de rendimiento (CPU, memoria y latencia) durante la fase de prototipado: si el procesamiento en la Raspberry Pi no satisface los requisitos temporales, se considerará el uso de una plataforma más potente (p. ej. NVIDIA Jetson Nano).

La arquitectura prevista separa el módulo de percepción y el microcontrolador que gestiona los actuadores hápticos. El protocolo serial y el formato de datos se definirán tras las pruebas de rendimiento y ancho de banda.

## 5. Mejoras y Aportes al Proyecto

El aporte principal de esta tesis es la validación y adaptación de métodos de evasión de obstáculos y mapeo orientados a la robótica pero en contextos de asistencia a personas ciegas. Sienta las bases necesarias para integrar la percepción visual con módulos hápticos en futuras fases del proyecto.

## 6. Estado del arte de la tesis

En el ámbito de la robótica móvil y la navegación asistida, la percepción basada en profundidad mediante sensores RGB-D se ha consolidado como una herramienta fundamental para la construcción de representaciones espaciales locales del entorno.

Diversos trabajos han demostrado que, para aplicaciones de navegación reactiva y evitación de obstáculos en tiempo real, son suficientes y preferibles representaciones locales del entorno centradas en el robot (que responden rápidamente a cambios cercanos) frente a mapas globales consistentes, que requieren mayor procesamiento y pueden no ser necesarios para tareas inmediatas de reacción [7].

Asimismo, la disponibilidad de sensores estéreo compactos con IMU integrada ha permitido mejorar la estabilidad de las representaciones locales frente a movimientos rápidos y vibraciones, favoreciendo su uso en sistemas embarcados orientados a interacción directa con el entorno.

En este contexto, la presente tesis se inscribe en la línea de generación de representaciones espaciales locales de baja dimensionalidad a partir de información de profundidad, orientadas a aplicaciones de navegación asistida en tiempo real sobre plataformas embebidas.

## 7. Plan de Trabajo y Entregables

El plan de trabajo se organiza en las siguientes etapas, con una estimación aproximada de dedicación horaria para cada una:

- Relevamiento bibliográfico y definición de métricas (70–80 horas).
- Implementación del pipeline de percepción (130–150 horas).
- Desarrollo del mapeo local y memoria temporal (110–130 horas).
- Integración de información inercial y compensación de orientación (45–55 horas).
- Evaluación experimental y análisis de resultados (90–110 horas).
- Redacción final de la tesis (100–120 horas).

La planificación propuesta es tentativo y podrá ajustarse en función de los resultados obtenidos durante el desarrollo del trabajo.

## 8. Resultados esperados

### 8.1. Resultados esperados del proyecto global

Se espera desarrollar un sistema portátil de asistencia sensorial capaz de proporcionar retroalimentación táctil en tiempo real a partir de percepción visual, orientado a mejorar la seguridad, autonomía y capacidad de desplazamiento independiente de personas con ceguera o baja visión.

El sistema final integrará módulos de percepción, mapeo local y salida háptica en una plataforma compacta y autónoma, validada experimentalmente en escenarios representativos de uso cotidiano.

## 8.2. Resultados esperados de la tesis

Como resultado de esta tesis se espera obtener:

- Un módulo de percepción visual capaz de generar, en tiempo real, una representación compacta y de baja dimensionalidad del entorno inmediato a partir de información de profundidad obtenida mediante sensores RGB-D.
- Un mecanismo de mapeo local de corto alcance que permita mantener una memoria espacial estable de obstáculos recientemente observados, mejorando la consistencia temporal de la representación frente a oclusiones y variaciones en la orientación del sensor.
- Un conjunto de estrategias de filtrado, agregación y compactación de información de profundidad, diseñadas y validadas experimentalmente con el objetivo de lograr baja latencia y estabilidad temporal.
- Una interfaz de salida claramente definida y documentada para la transmisión eficiente de la representación compacta instantánea y de la información asociada al mapa local hacia módulos externos.
- La integración de todos los desarrollos previos en una arquitectura modular basada en ROS2, orientada a su reutilización y extensión en futuros trabajos.



## Referencias

- [1] J. Sturm, N. Engelhard, F. Endres, W. Burgard y D. Cremers, «A Benchmark for the Evaluation of RGB-D SLAM Systems,» en *Proc. of the International Conference on Intelligent Robot Systems (IROS)*, oct. de 2012. dirección: <https://cvg.cit.tum.de/data/datasets/rgbd-dataset>.
- [2] Intel Corporation, *Tuning Intel RealSense Depth Cameras for Best Performance*, <https://dev.realsenseai.com/docs/tuning-depth-cameras-for-best-performance>, Accessed: 2026, 2020.
- [3] S. D. Novich y D. M. Eagleman, «Using space and time to encode vibrotactile information: toward an estimate of the skin's achievable throughput,» *Experimental Brain Research*, vol. 233, n.º 10, págs. 2777-2788, 2015. DOI: [10.1007/s00221-015-4346-1](https://doi.org/10.1007/s00221-015-4346-1). dirección: [https://eagleman.com/papers/novich\\_eagleman\\_2015.pdf](https://eagleman.com/papers/novich_eagleman_2015.pdf).
- [4] V. Santos, R. B. Medeiros, M. T. Rocha y col., «Wearable Haptic Device as Mobility Aid for Blind People: Electronic Cane - Wearable Device for Mobility of Blind People,» *ResearchGate*, 2023. dirección: [https://www.researchgate.net/profile/Vagner-Dos-Santos-3/publication/367149471\\_Wearable\\_Haptic\\_Device\\_as\\_Mobility\\_Aid\\_for\\_Blind\\_People\\_Electronic\\_Cane\\_-\\_Wearable\\_Device\\_for\\_Mobility\\_of\\_Blind\\_People/links/63ceccf66fe15d6a57426662/Wearable-Haptic-Device-as-Mobility-Aid-for-Blind-People-Electronic-Cane-Wearable-Device-for-Mobility-of-Blind-People.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Vagner-Dos-Santos-3/publication/367149471_Wearable_Haptic_Device_as_Mobility_Aid_for_Blind_People_Electronic_Cane_-_Wearable_Device_for_Mobility_of_Blind_People/links/63ceccf66fe15d6a57426662/Wearable-Haptic-Device-as-Mobility-Aid-for-Blind-People-Electronic-Cane-Wearable-Device-for-Mobility-of-Blind-People.pdf).
- [5] A. L. Petsiuk y J. M. Pearce, «Low-Cost Open Source Ultrasound-Sensing Based Navigational Support for the Visually Impaired,» *Sensors*, vol. 19, n.º 17, pág. 3783, 2019. DOI: [10.3390/s19173783](https://doi.org/10.3390/s19173783). dirección: <https://www.mdpi.com/1424-8220/19/17/3783>.
- [6] I. RealSenseTM, *Intel® RealSenseTM Product Family D457 -Datasheet*, [Link](#), March 2024.
- [7] O. Brock y O. Khatib, «High-Speed Navigation Using the Global Dynamic Window Approach,» en *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 1999, págs. 341-346. DOI: [10.1109/ROBOT.1999.770002](https://doi.org/10.1109/ROBOT.1999.770002). dirección: [https://khatib.stanford.edu/publications/pdfs/Brock\\_1999\\_ICRA.pdf](https://khatib.stanford.edu/publications/pdfs/Brock_1999_ICRA.pdf).