

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA  
DEPARTAMENTO DE INFORMÁTICA  
SANTIAGO - CHILE



“SEGUIMIENTO, TRAZADO Y OPTIMIZACIÓN DE ROBOT  
ROBOTRACER MEDIANTE VISIÓN COMPUTACIONAL Y  
APRENDIZAJE REFORZADO”

BENJAMÍN NICOLÁS ESPINOZA HUENUNGUIR

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL EN INFORMÁTICA

Profesor Guía: Ricardo Ñanculef  
Profesor Correferente: Andrés Bercovich

Diciembre - 2024

## **DEDICATORIA**

Considerando la importancia de este trabajo para los alumnos, este apartado es para que el autor entregue palabras personales para dedicar este documento. La extensión puede ser de máximo una hoja y se deben mantener este formato, tipo y tamaño de letra.

## **AGRADECIMIENTOS**

Considerando la importancia de este trabajo para los alumnos, este apartado se podrá incluir en el caso de que el autor desee agradecer a las personas que facilitaron alguna ayuda relevante en su trabajo para la realización de este documento. La extensión puede ser de máximo una hoja y se deben mantener este formato, tipo y tamaño de letra.

## RESUMEN

**Resumen**— El resumen y las palabras clave no deben superar la mitad de la página, donde debe precisarse brevemente: 1) lo que el autor ha hecho, 2) cómo lo hizo (sólo si es importante detallarlo), 3) los resultados principales, 4) la relevancia de los resultados. El resumen es una representación abreviada, pero comprensiva de la memoria y debe informar sobre el objetivo, la metodología y los resultados del trabajo realizado.

**Palabras Clave**— Cinco es el máximo de palabras clave para describir los temas tratados en la memoria, ponerlas separadas por punto y comas.

## ABSTRACT

**Abstract**— Corresponde a la traducción al idioma inglés del Resumen anterior. Sujeto a la misma regla de extensión del Resumen.

**Keywords**— Corresponde a la traducción al idioma inglés de Palabras Clave anteriores.

## **GLOSARIO**

DI: Departamento de Informática.

IMU: Inertial Measurement Units.

PRM: Probabilistics Roadmaps .

PID: Control proporcional, integral, derivativo.

UTFSM: Universidad Técnica Federico Santa María.

# ÍNDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN	IV
ABSTRACT	IV
GLOSARIO	V
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
ÍNDICE DE TABLAS	VII
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1: DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	2
1.1 Contexto . . . . .	2
1.2 Arquitectura Actual . . . . .	3
1.2.1 Seguimiento de línea . . . . .	3
1.2.2 Mapeo . . . . .	3
1.2.3 Optimización . . . . .	3
1.3 Información del problema . . . . .	4
1.4 Objetivos . . . . .	5
1.4.1 Objetivos Generales . . . . .	5
1.4.2 Objetivos específicos . . . . .	6
1.5 Árbol del problema . . . . .	7
CAPÍTULO 2: MARCO CONCEPTUAL	8
CAPÍTULO 3: PROPUESTA DE SOLUCIÓN	9
3.1 EJEMPLO DE COMO CITAR FIGURAS E ILUSTRACIONES . . . . .	9
CAPÍTULO 4: VALIDACIÓN DE LA SOLUCIÓN	10
4.1 EJEMPLO DE COMO CITAR TABLAS . . . . .	10
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES	11
ANEXOS	12
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	13

## ÍNDICE DE FIGURAS

1	Ejemplo de pista . . . . .	2
2	Ejemplo de marcas de curva . . . . .	4
3	Aplicación de PRM . . . . .	5
4	Árbol del problema . . . . .	7
5	Malla Curricular Ingeniería Civil Informática. . . . .	9
6	Minuta de reunion con profesor guía . . . . .	12

## ÍNDICE DE TABLAS

1	Coloquios del Ciclo de Charlas Informática. . . . .	10
---	---	----

## INTRODUCCIÓN

Debe proporcionar a un lector los antecedentes suficientes para poder contextualizar en general la situación tratada, a través de una descripción breve del área de trabajo y del tema particular abordado, siendo bueno especificar la naturaleza y alcance del problema; así como describir el tipo de propuesta de solución que se realiza, esbozar la metodología a ser empleada e introducir a la estructura del documento mismo de la memoria.

En el fondo, que el lector al leer la Introducción pueda tener una síntesis de cómo fue desarrollada la memoria, a diferencia del Resumen dónde se explicita más qué se hizo, no cómo se hizo.



## CAPÍTULO 1

### DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

#### 1.1. Contexto

En el mundo de la robótica existen diferentes categorías de competencias a lo largo del mundo. Una de las más antiguas es la All Japan Robotracer & micromouse Contest<sup>1</sup> con más de 40 años de trayectoria que consta de 2 categorías, Robotracer y Micromouse.

Los objetivos de esta competencia son, por un lado, un punto de encuentro para desarrolladores, con un enfoque educativo, ya que se llama a participar a diferentes escuelas y universidades, y por el otro, es ser un cuna para la innovación, ya que diferentes empresas compiten acá para poner a pruebas nuevas tecnologías, y así evaluar su factibilidad y utilidad para luego poder implementarlas en aplicaciones de la vida real. El enfoque de este trabajo va a ser en la categoría denominada Robotracer.

Las bases de la competencia de la categoría a trabajar son las siguientes: Se tiene una pista consistente de una línea blanca continua sobre fondo negro (Ver figura 1). El robot debe ser capaz de recorrer la totalidad del trazado de forma válida, es decir, que la proyección del robot no se salga de este, y además detenerse por su cuenta. Esta pista no es conocida hasta el momento de participar, por lo que no se puede hacer un pre mapeado de la pista.

Se tienen 5 intentos dentro de un periodo de 3 minutos para lograr el menor tiempo posible. Lo normal es utilizar el primer intento para mapear la pista y los otros 4 para lograr vueltas válidas lo más rápido posible.

Aquí se puede ver la ronda del campeón actual de la competencia. [NVS, 2024]



Figura 1: Ejemplo de pista  
Fuente: Elaboración propia.

---

<sup>1</sup><https://www.ntf.or.jp/>, Página oficial de la competencia

## 1.2. Arquitectura Actual

En la última competencia realizada, la gran mayoría (por no decir todos), programaba sus robots en C/C++, aplicando algoritmos de MATLAB (más adelante se detalla). La ventaja de esto es que MATLAB genera scripts en C/C++, por lo que se pueden usar algoritmos de optimización preexistentes sin mayores complicaciones.

### 1.2.1. Seguimiento de línea

El método actual para seguir la línea se basa principalmente en el uso de sensores infrarrojo para la obtención de la posición relativa del robot, y con esta información el uso de un PID para el control automático.

### 1.2.2. Mapeo

Para la primera vuelta, los robots deben ser capaces de las siguientes 2 características: identificar las marcas de curva que se encuentran en la pista en cada cambio de curvatura (Ver figura 2) y poder saber su posición actual en términos de coordenadas cartesianas (x,y).

Para la primera, se necesitan sensores infrarrojos capaces de identificar blanco vs negro posicionados de tal forma que siempre detecten las marcas correspondientes. Para la segunda se pueden utilizar 2 elementos de manera independiente o junta (esta última es la más óptima): Encoders en cada rueda (Odometría), lo cual permite saber la velocidad real de cada una. Y una IMU , que básicamente es un giroscopio+acelerómetro.

De esta forma se puede hacer una estimación relativamente precisa de la posición del robot en términos de (x,y), resultando en una nube de puntos que representan la pista. Usualmente esta información es guardada en un simple txt.

### 1.2.3. Optimización

Con la nube de puntos generada, se utiliza un algoritmo de MATLAB conocido como PRM<sup>2</sup>, en donde se define un mapa binario donde la ruta generada, más el ancho del robot, se define como espacio válido para desplazarse, y el resto como obstáculo. Luego se generan puntos aleatorios dentro de la zona donde el robot puede pasar y finalmente se juntan los que permiten la ruta más corta posible(Ver figura 3).

---

<sup>2</sup><https://la.mathworks.com/help/robotics/ug/probabilistic-roadmaps-prm.html> , PRM algorithm.

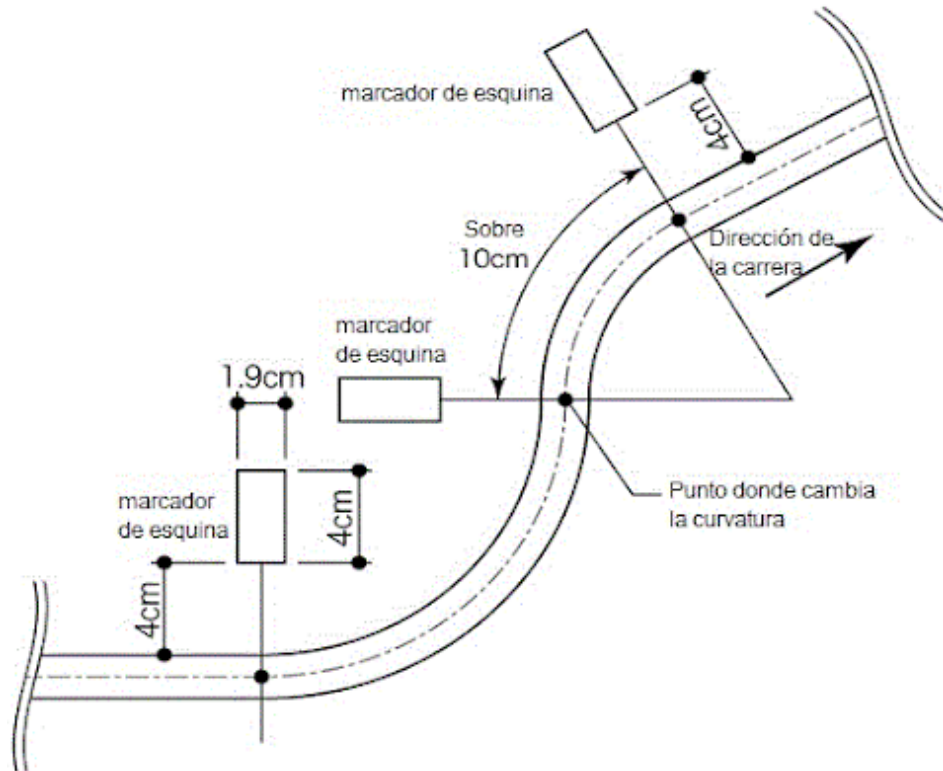


Figura 2: Ejemplo de marcas de curva  
Fuente: All Chile Robot Contest.

Con la ruta definida, mediante un algoritmo de seguimiento de rutas<sup>3</sup>, se le dan las instrucciones de movimiento al robot, donde en cada intento se varían las variables de velocidad, aceleración y freno.

Esta información fue basada en las publicaciones de Haruki Shimotori<sup>4</sup> y en el siguiente video se puede ver una idea similar en donde se utiliza Path Smoothing [hidejr1053, 2022]

### 1.3. Información del problema

Los últimos años todos los esfuerzos de mejora se han enfocado en la mecánica y electrónica del robot, dejando de lado el software. Estas mejoras van desde el uso de motores más potentes, más eficientes, sensores más precisos, mejoras en agarre y tracción del robot mediante turbinas, pero sin cambiar los algoritmos que hay por detrás.

<sup>3</sup><https://la.mathworks.com/help/robotics/ug/path-following-for-differential-drive-robot.html>, Path follower

<sup>4</sup><https://underbirdworks.blogspot.com/2020/12/matlabprm.html>, explicacion de Haruki Shimotori

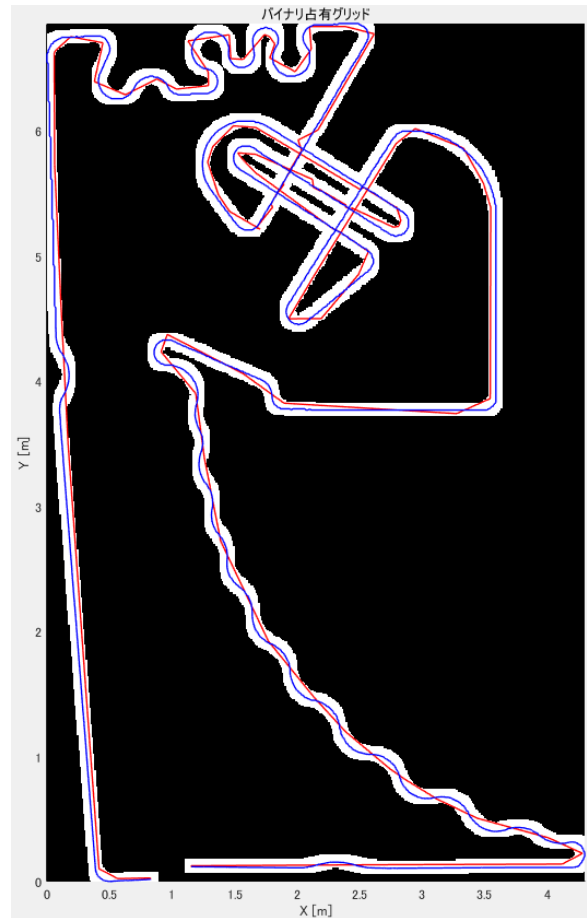


Figura 3: Aplicación de PRM  
Fuente: Haruki Shimotori.

Todas estas mejoras no se han considerado como innovaciones grandes, por lo que existe un espacio de investigación en el que el software pueda ser el protagonista. Es por este motivo que en la última versión no se ha otorgado el premio a la innovación a ningún participante, siendo su obtención uno de los objetivos de esta memoria.

## 1.4. Objetivos

### 1.4.1. Objetivos Generales

Implementar un método nuevo de seguimiento y mapeo de línea, para su posterior optimización enfocada en la maximización de la velocidad implementado en un robot sigue líneas, mediante el uso de redes neuronales, específicamente visión computacional y aprendizaje reforzado.

En primera instancia, se espera validar el trabajo mediante simuladores en diferentes disposiciones de pista, variando el nivel de dificultad, para eventualmente poder aplicar lo logrado con este trabajo en un robot real, que conste únicamente de un control diferencial de ruedas y una cámara, en la siguiente versión de la competencia All Japan para la verificación en un entorno competitivo de los métodos abordados.

#### **1.4.2. Objetivos específicos**

- Implementar un algoritmo de visión computacional para un seguimiento exitoso de la pista en tiempo real.
- Implementar un algoritmo de mapeo de la pista en tiempo real, utilizando únicamente visión computacional.
- Implementar un algoritmo de aprendizaje reforzado para mejorar los tiempos entre intentos, optimizando el recorrido y velocidad a tiempo real.
- Desarrollar un simulador para realizar un pre-entreno de las redes neuronales involucradas.
- Desarrollar un robot sigue líneas para implementar los modelos anteriores en un entorno real.

## 1.5. Árbol del problema

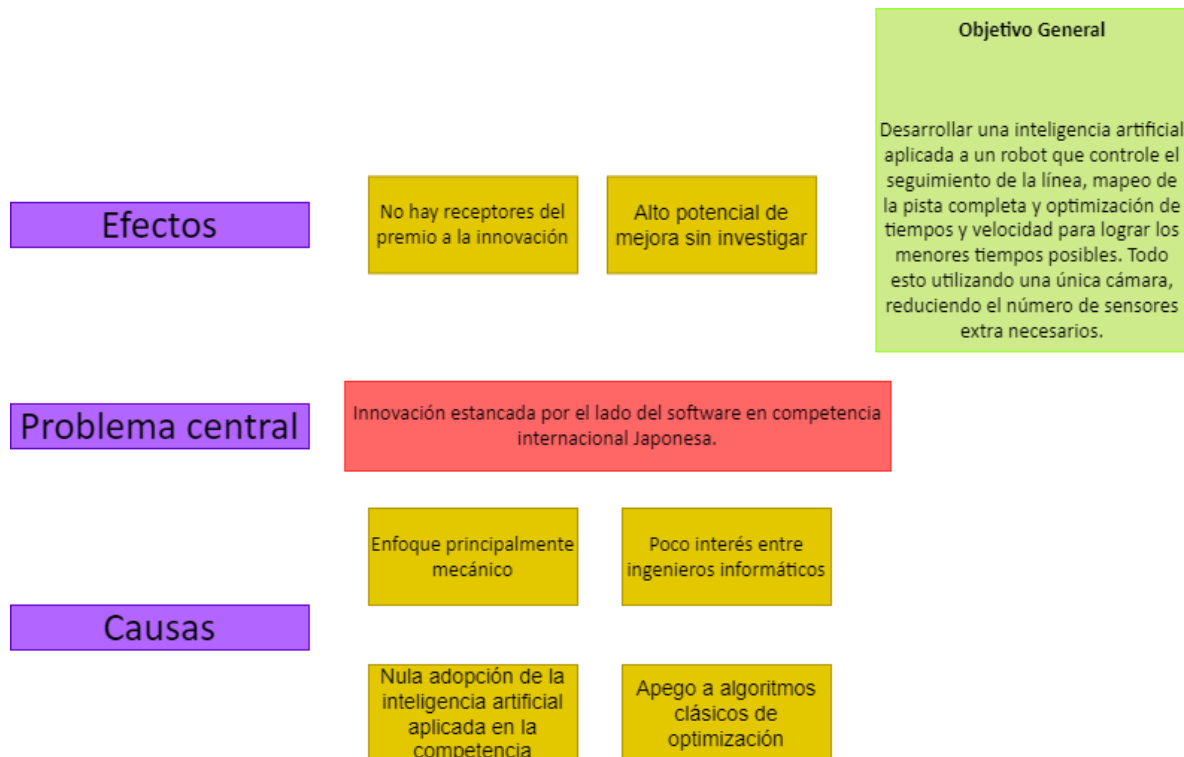


Figura 4: Árbol del problema  
Fuente: Elaboración Propia.

## **CAPÍTULO 2**

### **MARCO CONCEPTUAL**

Los fundamentos teóricos necesarios para fundamentar el aspecto de software consta de los siguientes elementos:

- Redes neuronales
- Redes convolucionales
- Visión computacional
- Aprendizaje reforzado

Por otro lado, si bien no es el enfoque de este trabajo, es necesario entender los siguientes conceptos complementarios:

- Raspberry Pi
- Robotic Operating System (ROS)
- Control diferencial de motores
- Simulador Webots

## CAPÍTULO 3

### PROPUESTA DE SOLUCIÓN

Se debe desarrollar la solución propuesta. Los subcapítulos por poner aquí son propios del autor. Se sugiere mencionar metodología usada. Es conveniente incorporar figuras y tablas para aclarar la solución, que deben indicar el número de la figura, su nombre y su autor o fuente (si las diseñas tú, la fuente es “Elaboración propia”). Ver ejemplos en esta página y en la siguiente.

Cabe mencionar que aquí está la esencia del trabajo en lo que se refiere al aporte creativo del memorista, es el momento de demostrar que usted es un destacado profesional que creó, diseñó y/o llevó a cabo la solución propuesta.

### 3.1. EJEMPLO DE COMO CITAR FIGURAS E ILUSTRACIONES

Se colocó una imagen que se puede referenciar también desde el texto (Ver figura 5).

Malla Curricular Ingeniería Civil Informática												Plan 73 13																																	
AÑO 1				AÑO 2				AÑO 3				AÑO 4		AÑO 5		AÑO 5 1/2																													
SEMESTRE I		SEMESTRE II		SEMESTRE III		SEMESTRE IV		SEMESTRE V		SEMESTRE VI		SEMESTRE VII		SEMESTRE VIII		SEMESTRE IX		SEMESTRE X		SEMESTRE XI																									
IWI-131 1		QUI-010 4		INF-134 12		INF-253 11		INF-239 25		INF-236 20		INF-225 25		INF-322 21		INF-302 21																													
Programación		Química y Sociedad		Estructuras de Datos		Lenguajes de Programación		Bases de Datos		Análisis y Diseño de Software		Ingeniería de Software		Diseño Interfaces Usables		Electivo Informática II																													
3 5		3 5		1 3 5		12 3 5		12 3 5		10 3 5		10 3 5		3 5		3 5																													
MAT-021 2		MAT-022 7		MAT-023 11		MAT-024 11		INF-245 25		INF-246 11		INF-256 17		INF-343 11		INF-303 21		INF-304 21																											
Matemáticas I		Matemáticas II		Matemáticas III		Matemáticas IV		Arquitectura y Organización de Computadores		Sistemas Operativos		Redes de Computadores		Sistemas Distribuidos		Electivo Informática III		Electivo Informática IV																											
5 8		2 5 7		7 11		4 7 11		12 3 5		10 3 5		11 3 5		11 3 5		3 5		3 5																											
FIS-100 3		FIS-110 4		FIS-130 11		FIS-120 20		FIS-140 25		INF-276 21		ICN-270 21		INF-301 21		INF-311 21		INF-313 21																											
Introducción a la Física		Física General I		Física General III		Física General II		Física General IV		Ingeniería Informática y Sociedad		Información y Matemáticas Financieras		Electivo Informática I		Electivo I		Electivo II																											
3 6		2 4 5 8		7 10 4 8		7 10 4 8		14 25		3 5		10 3 5		3 5		3 5		3 5																											
IRW-101 2		INF-152 15		INF-155 21				INF-280 27		INF-221 21		INF-285 27		INF-295 21		INF-312 21		INF-314 21																											
Introducción a la Ingeniería		Estructuras Discretas		Informática Teórica				Estadística Computacional		Algoritmos y Complejidad		Computación Científica		Inteligencia Artificial		Electivo II		Electivo IV																											
2 3		1 15		12 15 3 5				1 10 3 5		10 15 3 5		10 15 3 5		14 15 3 5		3 5		3 5																											
HRW-132 4		HRW-133 10		INF-260 16		IRW-170 21		INF-270 25		INF-292 25		INF-293 25		INF-266 21		INF-360 21		INF-228 21																											
Humanístico I		Humanístico II		Teoría de Sistemas		Economía IA		Organizaciones y Sistemas de Información		Optimización		Investigación de Operaciones		Sistemas de Gestión		Gestión de Proyectos de Informática		Taller Desarrollo de Proyecto de Informática																											
2 3		2 3		9 16 3 5		11 3 5		10 3 5		13 3 5		14 3 5		13 3 5		14 16 3 5		15 21																											
DEW-100 5		DEW-101 11		INF-1 17		INF-2 21		INF-3 25		INF-4 15		INF-5 21		INF-6 21		INF-7 21		INF-309 21		INF-310 21																									
Educación Física I		Educación Física II		Libre/Actividad co-curricular		Libre/Actividad co-curricular		Libre/Actividad co-curricular		Libre/Actividad co-curricular		Libre/Actividad co-curricular		Libre/Actividad co-curricular		Libre/Actividad co-curricular		Trabajo de Título 1		Trabajo de Título 2																									
1 2		5 11		1 2		1 2		1 2		1 2		1 2		1 2		1 2		26 32 1 2		27 33 12 20																									
14 24				18 28				18 32				18 31				17 30				16 27				16 28				16 27				16 27				12 20									
BACHILLER EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA																						LICENCIADO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA																							
<div><div>Código asignatura</div><div>FIS-110 0</div><div>Pre Requisito (25) 5 11</div><div>Créditos USM SCT</div><div>Número asignatura</div><div>Nombre asignatura</div></div>																						<div><div>Matemáticas, Física y Química</div><div>Transversal y de Integración</div><div>Humanidades, Educación Física y Libres</div><div>Industrial y Comercial</div><div>Fundamentos de Informática</div><div>Sistemas de Información y de Decisión</div><div>Ingeniería de Software y Datos</div><div>Infraestructura TIC</div><div>Computación Aplicada en Ciencia e Ingeniería</div><div>Electivos Informática y Electivos</div></div>																						<div><div>i</div><div>Al reverso perfil de egreso, inglés, prácticas, titulación, otros</div></div>	
<div><div>Departamento de Informática</div><div>Universidad Técnica Federico Santa María</div></div>																																													

Figura 5: Malla Curricular Ingeniería Civil Informática.  
Fuente: Departamento de Informática.



## CAPÍTULO 4

### VALIDACIÓN DE LA SOLUCIÓN

Se debe validar la solución propuesta. Esto significa probar o demostrar que la solución propuesta es válida para el entorno donde fue planteada.

Tradicionalmente es una etapa crítica, pues debe comprobarse por algún medio que vuestra propuesta es básicamente válida. En el caso de un desarrollo de software es la construcción y sus pruebas; en el caso de propuestas de modelos, guías o metodologías podrían ser desde la aplicación a un caso real hasta encuestas o entrevistas con especialistas; en el caso de mejoras de procesos u optimizaciones, podría ser comparar la situación actual (previa a la memoria) con la situación final (cuando la memoria está ya implementada) en base a un conjunto cuantitativo de indicadores o criterios.

#### 4.1. EJEMPLO DE COMO CITAR TABLAS

Se colocó una tabla que se puede referenciar también desde el texto (Ver tabla 1).

Tabla 1: Coloquios del Ciclo de Charlas Informática.  
Fuente: Elaboración Propia.

Título Coloquio	Presentador, País
"Sensible, invisible, sometimes tolerant, heterogeneous, decentralized and interoperable... and we still need to assure its quality..."	Guilherme Horta Travassos, Brasil.
"Dispersed Multiphase Flow Modeling: From Environmental to Industrial Applications"	Orlando Ayala, EE.UU.
"Líneas de Producto Software Dinámicas para Sistemas atentos el Contexto"	Rafael Capilla, España.
...	...

## **CAPÍTULO 5**

### **CONCLUSIONES**

Las Conclusiones son, según algunos especialistas, el aspecto principal de una memoria, ya que reflejan el aprendizaje final del autor del documento. En ellas se tiende a considerar los alcances y limitaciones de la propuesta de solución, establecer de forma simple y directa los resultados, discutir respecto a la validez de los objetivos formulados, identificar las principales contribuciones y aplicaciones del trabajo realizado, así como su impacto o aporte a la organización o a los actores involucrados. Otro aspecto que tiende a incluirse son recomendaciones para quienes se sientan motivados por el tema y deseen profundizarlo, o lineamientos de una futura ampliación del trabajo.

Todo esto debe sintetizarse en al menos 5 páginas.

## ANEXOS

### ACTA (MINUTA) DE REUNION #1 (autor: profesor Luis Hevia)

#### 0. A TENER PRESENTE:

*El Objetivo de esta actividad es internalizar el necesario proceso profesional de documentación.*

#### 1. INFORMACIÓN GENERAL

Fecha, Hora Inicio y Término	19-04-2024, 16:00, 16:30
Lugar (o zoom? o mail's?)	Sala F405
Participantes	Benjamín Espinoza, Ricardo Nanculef

#### 2. OBJETIVO DE LA REUNION

Explicación y definición de tema e investigación del estado del arte
--

#### 3. RESUMEN DE CONTENIDOS DE TEMAS TRATADOS

a	Explicación de contexto de la competencia de Japón y lo que se quiere hacer
b	Definición del problema
c	Conversa sobre tecnologías actuales.

#### 4. COMPROMISOS (QUÉ, QUIÉN, CUÁNDO, ....)

x	Qué: Investigar 3 papers que aborden alguna de las funcionalidades que se quiere abordar. Quién: Benjamín Espinoza. Cuando: Viernes 26-04-2024
z	PRÓXIMA REUNION será: Viernes 26-04-2024

5. Tiemp- pos SCT realistas	Planificación	Búsqueda Inf.	Realización	Análisis	Edición	Total
	10 min	60 min	30 min	10 min	10 min	2Hhr 0min

Figura 6: Minuta de reunion con profesor guía  
Fuente: Elaboración propia.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[hidejr1053, 2022] hidejr1053 (2022). ロボトレース進捗、より高度化したショートカットテスト.

[NVS, 2024] NVS (2024). ロボトレース第 44 回全日本マイクロマウス大会 micromouse 2023 robotrace.