

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	4
1.2.4 Menciones destacables	5
1.3 Información del problema	5
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
2.1 Estado del arte	8
2.1.1 Seguimiento de línea	8
2.1.2 Uso de aprendizaje reforzado	9
2.1.3 Mapeo de pista	9
CAPÍTULO 3: PROPUESTA DE SOLUCIÓN	10
3.1 EJEMPLO DE COMO CITAR FIGURAS E ILUSTRACIONES	10
CAPÍTULO 4: VALIDACIÓN DE LA SOLUCIÓN	11
4.1 EJEMPLO DE COMO CITAR TABLAS	11
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES	12
ANEXOS	13
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	14

ÍNDICE DE FIGURAS

1	Ejemplo de pista	2
2	Ejemplo de marcas de curva	3
3	Aplicación de PRM	4
4	Árbol del problema	7
5	Malla Curricular Ingeniería Civil Informática.	10
6	Minuta de reunion con profesor guía	13

ÍNDICE DE TABLAS

1	Coloquios del Ciclo de Charlas Informática.	11
---	---	----

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 Contest¹ con más de 40 años de trayectoria que consta de 2 categorías, Robotracer y Micromouse.

Esta competencia tiene dos principales objetivos. Por un lado busca ser un punto de encuentro para desarrolladores con una perspectiva educativa, ya que se llama a participar a diferentes escuelas y universidades. Por el otro, es ser una cuna para la innovación en la que distintas empresas entran a la competencia para poner a prueba nuevas tecnologías y evaluar su factibilidad y utilidad, para luego poder implementarse en aplicaciones de la vida real. El enfoque de este trabajo será en la categoría denominada Robotracer.

Las bases de la competencia en 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, o sea, que la proyección del robot no se salga de este, además debe 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.

Cada participante tiene 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 tratar de obtener vueltas válidas lo más rápido posible.

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



Figura 1: Ejemplo de pista
Fuente: Elaboración propia.

¹<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) utilizó C/C++ para el control de los robots, aplicando distintos algoritmos de MATLAB (más adelante se detalla) para la optimización de la pista. La ventaja de esto es que MATLAB genera scripts en C/C++, por lo que se pueden utilizar algoritmos preexistentes sin mayores complicaciones, apoyado de la inclusión de Simulink para una interacción más directa y simple entre MATLAB y el robot.

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).

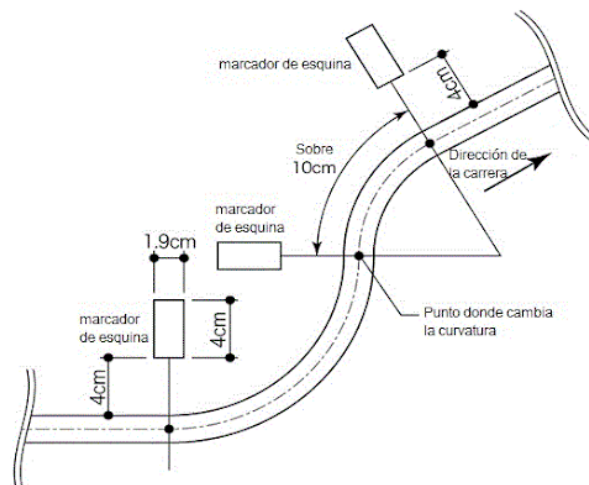


Figura 2: Ejemplo de marcas de curva
Fuente: All Chile Robot Contest.

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 óp-

tima): 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 PRM², 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).

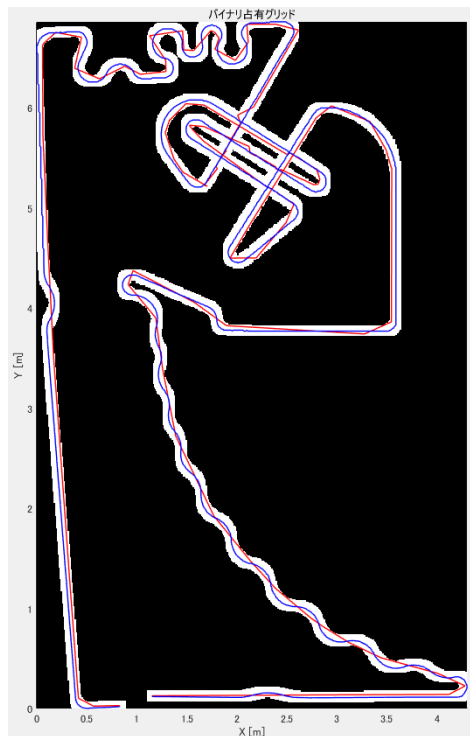


Figura 3: Aplicación de PRM
Fuente: Haruki Shimotori.

Con la ruta definida, mediante un algoritmo de seguimiento de rutas³, se le dan las instrucciones de movimiento al robot, donde en cada intento se varían las variables de velocidad,

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

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

aceleración y freno.

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

1.2.4. Menciones destacables

Si bien no se ha visto la implementación de redes neuronales en esta competencia, hay casos de uso de sensores similares a cámaras, solo que no se implementan algoritmos de visión computacional. Como el caso de David Otten ⁵, implementa un robot con una cámara en donde se obtiene los valores analógicos de este, para luego aplicar algoritmos mencionados anteriormente.

1.3. Información del problema

Los últimos años todos los esfuerzos de desarrollo 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, más agarre y tracción del robot mediante turbinas, pero sin cambiar los algoritmos que hay por detrás.

Todos estos cambios 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 aplicado en un robot que sigue líneas mediante el uso de redes neuronales, específicamente visión computacional y aprendizaje reforzado. Estas redes neuronales van a estar trabajando en sincronía para lograr el mejor control en competencia.

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

⁵<https://www.ntf.or.jp/mouse/micromouse2023/Robot/AllJapan/TechRT51.html>

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

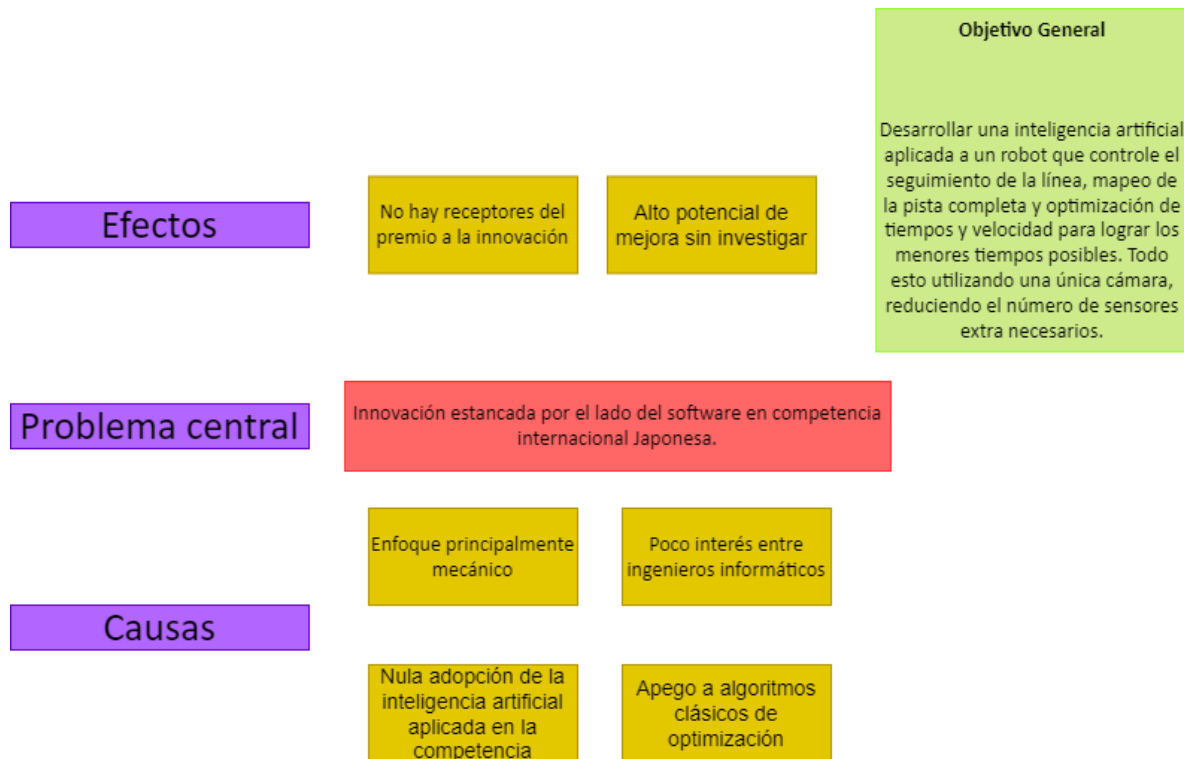


Figura 4: Árbol del problema
Fuente: Elaboración Propia.

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

Proximamente...

2.1. Estado del arte

2.1.1. Seguimiento de línea

Varios modelos se han definido en el marco de visión computacional para hacer seguimiento de líneas donde se han testeado diferentes tecnologías para ver su viabilidad, esto considerando que al ser robots compactos, el poder de procesamiento de imagen se ve altamente limitado al procesador utilizado. Un estudio comparativo [Gunawan Dewantoro, 2021] de las 2 placas más comunes para aplicaciones que requieren alto poder de cómputo, Raspberry Pi y Jetson Nano, demostró que mediante un algoritmo de detección de bordes, se logran resultados por sobre el 90 % de precisión en ambas placas. En esta instancia sólo se utilizó 3 posibles movimientos, avanzar recto, doblar izquierda y doblar derecha.

Para un control más preciso se puede utilizar un algoritmo que transforme la imagen a algo interpretable como un sensor análogo, y así poder emplear técnicas clásicas de control, como lo es el PID. En este caso [Pujara *et al.*, 2023], el algoritmo utilizado no resultó ser más eficiente que un sensor análogo tradicional.

Proximamente...

2.1.2. Uso de aprendizaje reforzado

Si bien la aplicación del aprendizaje reforzado está altamente utilizada en el mundo de la robótica, las aplicaciones específicas al problema de seguimiento de línea no son muchas. Un trabajo reciente [Saadatmand *et al.*, 2020] consiste en entrenar a un agente para que controle un robot siguelineas, el cual encuentra equipado con sensores análogos clásicos. En este se recalca la necesidad de hacer un entrenamiento completo antes de la puesta en práctica para lograr los mejores resultados posibles. Si bien se explica que el método no es completamente preciso debido a la incertidumbre de entorno, resultó tener un gran grado de éxito en el recorrido de pistas de diferente dificultad.

De acá se puede rescatar la base del método y aplicarlo a un sistema con visión computacional, además de no sólo basarse en un entrenamiento previo, si no que debido al contexto de este trabajo, permitir al agente seguir aprendiendo en tiempo real.

2.1.3. Mapeo de pista

Proximamente...

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																																																			
INF-131	1	QUI-010	6	INF-134	4	INF-253	10	INF-239	20	INF-236	20	INF-225	20	INF-322	20	INF-302	20																																																						
Programación		Química y Sociedad		Estructuras de Datos		Lenguajes de Programación		Bases de Datos		Análisis y Diseño de Software		Ingeniería de Software		Diseño Interfaces Usarias		Electivo Informática II																																																							
3 5		3 5		1 3 5		12 3 5		12 3 5		3 5		3 5		3 5		3 5																																																							
MAT-021	2	MAT-022	7	MAT-023	5	MAT-024	10	INF-245	25	INF-246	11	INF-256	7	INF-343	20	INF-303	20	INF-304	20																																																				
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 9		4 7		12 3 5		25 3 5		11 3 5		9 7 3 5		3 5		3 5																																																					
FIS-100	3	FIS-110	4	FIS-130	6	FIS-120	20	FIS-140	20	INF-276	22	ICN-270	20	INF-301	20	INF-311	20	INF-313	20																																																				
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 III																																																					
3 6		2 3 5 8		7 9 4		7 8		14 20 4 8		3 5		20 3 5		3 5		3 5		3 5																																																					
IRW-101	4	INF-152	20	INF-155	20	INF-280	27	INF-221	21	INF-285	20	INF-295	20	INF-312	20	INF-314	20																																																						
Introducción a la Ingeniería		Estructuras Discretas		Informática Teórica		Estadística Computacional		Algoritmos y Complejidad		Computación Científica		Inteligencia Artificial		Electivo II		Electivo IV																																																							
2 3		1 2 3		12 15		12 15		15 16 3 5		16 18 3 5		14 18 3 5		3 5		3 5																																																							
HRW-132	5	HRW-133	10	INF-260	16	INF-170	22	INF-270	20	INF-292	20	INF-293	20	INF-266	20	INF-360	20	INF-228	27																																																				
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 Ingeniería		Taller Desarrollo de Proyecto de Ingeniería																																																					
2 3		2 3		1 3 5		16 3 5		15 3 5		16 3 5		14 3 6		16 3 5		14 16 3 5		3 5 6 10																																																					
DEW-100	6	DEW-101	11	INF-1	1	INF-2	2	INF-3	2	INF-4	2	INF-5	2	INF-6	2	INF-7	2	INF-309	2	INF-310	2																																																		
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		1 2		1 2		1 2		1 2		1 2		1 2		1 2		1 2		2 3 5		6 7 8 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</div><div>Número asignatura</div><div>110</div><div>Nombre asignatura</div><div>Física General I</div><div>Pre Requisito</div><div>(230) 5 11</div><div>Créditos USM SCT</div><div>1 1</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>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

- [Gunawan Dewantoro, 2021] Gunawan Dewantoro, Jamil Mansuri, F. D. S. (2021). Comparative study of computer vision based line followers using raspberry pi and jetson nano. *Jurnal Rekayasa Elektrika*, 17(4).
- [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.
- [Pujara et al., 2023] Pujara, D., Naik, P., Gautam, R., y Mecwan, A. (2023). Incorporating visual intelligence in line following robots. *2023 IEEE International Symposium on Smart Electronic Systems (iSES)*, pp. 389–392.
- [Saadatmand et al., 2020] Saadatmand, S., Azizi, S., Kavousi, M., y Wunsch, D. (2020). Autonomous control of a line follower robot using a q-learning controller. pp. 0556–0561. IEEE.