

**Jorge Salvador Ierache**

**Modelo de ciclo de vida  
para el aprendizaje  
basado en compartición  
de conocimientos en sistemas  
autónomos de robots**

**TESIS DOCTORAL EN CIENCIAS INFORMÁTICAS  
PREMIO DR. RAÚL GALLARD | Año 2011**

# Índice

## **CAPÍTULO 1 - Introducción**

1.1 Contexto de la tesis	21
1.2 Objetivos de la tesis	22
1.3 Visión general de la tesis	23
1.4 Producción científica derivada de resultados parciales de la tesis	24

## **CAPÍTULO 2 - Estado de la cuestión**

2.1 Introducción a los Robots Autónomos	27
2.2 Propuestas de Sistemas Inteligentes para Robots Autónomos	37
2.2.1 Sistema Inteligente Autónomo	37
2.2.2 Sistema Inteligente Autónomo con aprendizaje basado en formación y ponderación de teorías	39
2.2.3 Sistema Inteligente Autónomo con aprendizaje basado en intercambio de teorías	41
2.3 Robots operando en ambientes aéreos, marítimos y terrestres	42
2.3.1 Robots voladores	43
2.3.2 Robots acuáticos	45
2.3.3 Robots terrestres	47
2.3.4 Robots de exploración extraterrestre	50

## **CAPÍTULO 3 - Descripción del problema**

3.1 Introducción	51
3.2 Sistema Autónomo de Robot (SAR)	53
3.3 Colaboración entre Sistemas Autónomos Robots	53
3.4 Modelo y arquitectura para múltiples Sistemas Autónomos de Robots	54
3.5 Estadísticas de aprendizaje y métricas asociadas a la actuación del Sistema Autónomo de Robots	54
3.5.1 Cuestiones relevantes en relación a la colaboración del SAR	55
3.5.2 Cuestiones relevantes en relación a la arquitectura del SAR	56

## **CAPÍTULO 4 - Solución propuesta**

4.1. Sistema Autónomo de Robot (SAR)	59
4.1.1 Introducción Sistema Autónomo de Robots	59
4.1.2 Modelo de teoría	60
4.2 Ciclo de vida de aprendizaje de un Sistema Autónomo de Robot	61
4.3 Arquitectura y Modelo MultiSAR	69
4.3.1 Arquitectura MultiSAR	69
4.3.2 Modelo MultiSAR	71
4.3.3 Ontología Preliminar del Sistema Autónomo de Robot	76
4.4. Sistema Autónomo de Robot	77
4.4.1 Introducción	77
4.4.2 Sistema Autónomo de Robot Propuesto	77
4.4.2.1 Configuración del Sistema Autónomo de Robot	83
4.4.2.2 Selección del Sistema Autónomo de Robot y sus métodos asociados	84
4.4.3 Utilidad de una teoría	87
4.4.3.1 Utilidad basada en la situación	87
4.4.3.2 Utilidad con coeficientes o basada en la acción	89
4.4.4 Registro de teorías	92
4.4.5 Mutación de teorías	94
4.4.6 Comparación de teorías	97
4.4.6.1 Comparación de valores por umbral común	97
4.4.6.2 Comparación de valores por umbral individual	97
4.4.7 Planificación de Acciones del Sistema Autónomo de Robot	100
4.4.7.1 Planificador y ponderador de planes	102
4.4.7.2 Planificador ranking de teorías	105
4.4.8 Compartición de conocimiento	108
4.4.8.1 Intercambio de teorías (cooperación)	108
4.4.8.2. Colaboración	111
4.4.9 Registro de Estadísticas de Aprendizaje del Sistema Autónomo de Robot	117
4.4.10 Evolución del Sistema Autónomo de Robot	122
4.5. Escenarios del Sistema Autónomo de Robot	124
4.5.1 Escenario Layer BIO	125
4.5.2 Escenario Layer TBO	125
4.5.3 Escenario Layer WIO	126
4.6. Características del robot y simulador empleado	127
4.6.1 Características generales del mini robot E-Puck	127
4.6.2 Características del simulador Webots	129
4.7 Configuración y tipos de SARs	131
4.7.1 Identificación de SARp en función de la configuración y tipo	132
4.7.2 Identificación de SARr en función de la configuración y tipo	133

4.7.3 Taxonomía de las Extensiones de SARs aplicadas	133
--	-----

## **CAPÍTULO 5 - Experimentos**

5.1 Introducción	135
5.2 Diseño Experimental	135
5.2.1 Variables Independientes	137
5.2.2 Variables Dependientes	141
5.2.3 Arquitectura de Sistema Autónomo de Robot (SAR)	142
5.2.3.1 Arquitectura de Sistema Autónomo Robot con planificador clásico (SARp)	142
5.2.3.2 Arquitectura de Sistema Autónomo Inteligente con Ranking (SARr)	143
5.2.4 Grupo de Experimentos	143
5.3 Gráficas y su interpretación	144
5.3.1 Gráficas del Sistema Autónomo de Robot con planificador y su interpretación	144
5.3.1.1 Primer Grupo de Experimentos del SARp	145
5.3.1.2 Segundo grupo de experimentación del SARp	152
5.3.1.3 Tercer grupo de experimentación del SARp	159
5.3.2 Gráficas del Sistema Autónomo de Robot con ranking de teorías su interpretación	166
5.3.2.1 Primer grupo de experimentos del SARr	166
5.3.2.2 Segundo grupo de experimentos del SARr	173
5.3.3 Comparación de los resultados obtenidos por ambas arquitecturas Sistema Autónomos de Robots (SARs)	179
5.3.3.1 Cantidad de ciclos exitosos para SARs neutros	180
5.3.3.2 Cantidad de ciclos exitosos para SARs que aplican colaboración	180
5.3.3.3 Cantidad de ciclos exitosos para SARs que aplican mutación y colaboración	181
5.3.3.4 Cantidad de ciclos exitosos para SARs que aplican intercambio y colaboración	182
5.3.3.5 Cantidad de ciclos exitosos para SARs que aplican mutación, intercambio y colaboración	183
5.3.3.6 Discusión de los resultados de la comparación de rendimiento de ambas arquitecturas (SARp y SARr)	183
5.3.4 Relación entre cantidad de teorías, cantidad de planes y cantidad de ciclos usando éstos son exitosos	184
5.3.4.1 Cantidad de Planes Exitosos (CPE) y Cantidad Teorías Exitosas (CTE) para un SARp	185
5.3.4.2 Cantidad de Ciclos Exitosos (CPE) y Exitosas (CTE) para un SARp	185

5.3.4.3 Cantidad de Cantidad de Planes Exitosos (CPE) y Ciclos Exitosos (CCE) para un SARp	186
5.3.4.4 Cantidad de Cantidad de Planes Exitosos (CPE) y Teorías Exitosas (CTE) para un SARr	187
5.3.4.5 Cantidad de Cantidad de Ciclos Exitosos (CCE) y Teorías Exitosas (CTE) para un SARr	188
5.3.4.6 Cantidad de Cantidad de Planes Exitosos (CPE) y Ciclos Exitosos (CCE) para un SARr	189
5.3.4.7 Pruebas Complementarias	189

## **CAPÍTULO 6 - Conclusiones**

6.1 Propuesta de Modelo Ciclo de Vida para el aprendizaje de Sistemas Autónomos de Robots	191
6.2 Propuesta de Sistema Autónomo de Robot	192
6.3 Futuras líneas de investigación	194

## **CAPÍTULO 7 - Referencias** 197

### **ANEXOS**

A Ontología del SAR	205
B Ejemplo de cálculo utilidad con coeficientes o basado en la acción	213
C Estructura de la base de conocimientos de teorías	217
D Ejemplo de mutación de teorías	219
E Ejemplo de comparación de situaciones y acciones entre teorías	223
F Ponderación de planes	227
G Ejemplo de planificador por ranking de teorías	231
H Ejemplo de cooperación entre sistemas autónomos de robots	233
I Ejemplo de colaboración entre sistemas autónomos de robots	237
J Registro de estadísticas del sistema autónomo de robot	241
K Configuración, tipo de sistema autónomo de robot y métodos asociados	245
L Registro de estadísticas de los experimentos	249
M Características de las bases de conocimientos de teorías de SARs utilizadas durante la experimentación	271
N Soporte Digital	277
Ñ Aspectos de movilidad y sensorística del robot e-puck en el entorno Webots	279
O Aspectos generales relacionados con la interfase del robot y el sistema desarrollado	293
P Vehículos robots de Braitenberg	297