

---

---

# Índice de contenidos

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivos	2
1.2.1. Eficiencia computacional del algoritmo en línea	2
1.2.2. Estabilidad del sistema en bucle cerrado	3
1.2.3. Aplicación a esquemas de control predictivo no lineal	3
1.3. Estructura de la tesis	4
<b>2. Estado del arte</b>	<b>7</b>
2.1. Introducción	7
2.2. Control predictivo	7
2.2.1. Control predictivo de procesos lineales	8
2.2.2. Horizonte móvil	11
2.3. Control predictivo explícito	12
2.3.1. Objetivos	12
2.3.2. Geometría de la programación cuadrática	12
2.3.3. Caracterización explícita del control predictivo	15
2.3.4. Caracterización explícita mediante las condiciones KKT	19
2.3.5. Obtención de todas las regiones de la solución explícita	20
2.3.6. Algoritmo en línea	24
2.4. Control predictivo no lineal	29
2.4.1. Control predictivo de sistemas afines a tramos	31
2.5. Estabilidad en control predictivo	34
2.5.1. Estabilidad del control óptimo con horizonte móvil	34
2.5.2. Estabilidad del control predictivo con modelos lineales y restricciones convexas	37
2.5.3. Estabilidad del control predictivo de sistemas afines a tramos	39
2.5.4. Teoría de conjuntos invariantes	39
2.6. Operaciones con poliedros	42
2.6.1. Envolvente convexa	43
2.6.2. Minimización del número de elementos en poliedros no convexos	44
2.7. Factibilidad de sistemas de ecuaciones y desigualdades	46
2.7.1. Sistemas lineales	46

2.7.2. Sistemas de ecuaciones polinómicas y suma de cuadrados	47
2.8. Conclusiones	52
<b>3. Control predictivo con restricciones poliédricas no convexas</b>	<b>55</b>
3.1. Introducción	55
3.2. Descripción del problema	56
3.2.1. Restricciones poliédricas no convexas como sistema afín a tramos	58
3.3. Optimización en línea	59
3.4. Solución explícita	60
3.4.1. Caracterización de la solución explícita	61
3.4.2. Propiedades de la solución explícita	68
3.5. Conclusiones	72
<b>4. Cálculo de la solución explícita</b>	<b>73</b>
4.1. Introducción	73
4.2. Metodología de intersección, división y unión para $\gamma = 2$	74
4.2.1. Obtención de la solución explícita de los subproblemas	74
4.2.2. Intersección de las dos particiones del estado	75
4.2.3. División de las regiones resultantes	82
4.2.4. Minimización del número de regiones finales	89
4.3. Metodología de intersección, división y unión para $\gamma > 2$	96
4.3.1. Análisis del coste de los algoritmos fuera de línea	98
4.3.2. Descripción del procedimiento	99
4.4. Metodología de la envolvente convexa	108
4.4.1. Cálculo de la envolvente convexa	111
4.4.2. Clasificación de las regiones de la solución explícita	112
4.4.3. División de las regiones no factibles	114
4.4.4. Eliminación de soluciones no óptimas	117
4.4.5. Unión de regiones con las mismas soluciones	118
4.4.6. Análisis del coste computacional del algoritmo	123
4.5. Conclusiones	128
<b>5. Algoritmo en línea</b>	<b>131</b>
5.1. Introducción	131
5.2. Árboles de búsqueda binarios	132
5.3. Árboles binarios de los subproblemas	134
5.4. Árbol binario de profundidad mínima	136
5.4.1. Obtención del árbol	136
5.4.2. Coste computacional en línea	139
5.5. Árboles binarios de profundidad no mínima	140
5.5.1. Algoritmo fuera de línea	141
5.5.2. Coste computacional en línea	141
5.6. Comparación de los algoritmos	143
5.6.1. Coste computacional en línea	143
5.6.2. Requerimientos de memoria	145
5.6.3. Coste fuera de línea	145
5.6.4. Conclusiones	146

5.7. Soluciones subóptimas . . . . .	147
5.7.1. Simplificación del problema . . . . .	147
5.7.2. Simplificación de la solución . . . . .	154
5.8. Conclusiones . . . . .	158
<b>6. Estabilidad del control predictivo con restricciones poliédricas no convexas</b>	<b>161</b>
6.1. Introducción . . . . .	161
6.2. Condiciones de estabilidad . . . . .	161
6.3. Obtención de la región terminal . . . . .	164
6.3.1. Eficiencia de los algoritmos . . . . .	170
6.4. Estabilidad asintótica . . . . .	175
6.5. Cálculo del conjunto de estados iniciales factibles . . . . .	176
6.6. Conclusiones . . . . .	177
<b>7. Aplicaciones</b>	<b>179</b>
7.1. Introducción . . . . .	179
7.2. Aplicaciones con restricciones poliédricas no convexas puras . . . . .	179
7.2.1. Ejemplo de aplicación: Robot cartesiano . . . . .	180
7.3. Aplicaciones con restricciones no lineales . . . . .	183
7.3.1. Aproximación de no linealidades mediante unión de poliedros . . . . .	184
7.3.2. Control Predictivo de sistemas Hammerstein y Wiener . . . . .	187
7.3.3. Ejemplo de aplicación: Control de un motor Diesel sobrealimentado. . . . .	191
7.3.4. Control Predictivo de sistemas con restricciones mediante linealización por realimentación . . . . .	200
7.3.5. Ejemplo de aplicación: Péndulo invertido . . . . .	205
7.4. Conclusiones . . . . .	209
<b>8. Conclusiones y trabajo futuro</b>	<b>213</b>
8.1. Conclusiones . . . . .	213
8.1.1. Algoritmos eficientes para el control predictivo con restricciones poliédricas no convexas . . . . .	213
8.1.2. Estabilidad del control predictivo con restricciones poliédricas no convexas . . . . .	216
8.1.3. Aplicaciones . . . . .	216
8.2. Trabajo futuro . . . . .	217
<b>A. Coste computacional de algoritmos fuera de línea</b>	<b>221</b>
A.1. Introducción . . . . .	221
A.2. Coste del algoritmo simultáneo . . . . .	223
A.3. Coste del algoritmo progresivo . . . . .	223
A.4. Comparación de los algoritmos . . . . .	228
<b>Bibliografía</b>	<b>249</b>