

**Memoria del proyecto**  
para el  
Trabajo de Fin de Grado sobre el manipulador  $p$ Arm

Javier Alonso Silva  
Mihai Octavian Stanescu  
José Alejandro Moya Blanco

*Universidad Politécnica de Madrid*  
*Ingeniería de Computadores*  
*Trabajo de Fin de Grado*  
*Tutor: Norberto Cañas de Paz*

Madrid, 1 de junio de 2020

# Índice general

<b>Historial de versiones</b>	<b>1</b>
<b>1. Motivación y objetivos</b>	<b>2</b>
1.1. Estado del arte . . . . .	2
1.1.1. Desarrollo de la robótica a lo largo de la historia . . . . .	2
1.1.2. Los brazos robóticos . . . . .	5
1.2. Motivaciones para el desarrollo del proyecto . . . . .	5
1.3. Objetivos del proyecto . . . . .	5
1.4. Metodología . . . . .	5
<b>2. Explicación de la estructura del proyecto</b>	<b>6</b>
2.1. Matemáticas . . . . .	6
2.2. <i>Hardware</i> . . . . .	6
2.3. <i>Software</i> . . . . .	6
<b>3. Diagramas, requisitos y diseño</b>	<b>7</b>
3.1. Requisitos . . . . .	7
3.2. Diagramas y diseño . . . . .	7
<b>4. Las matemáticas del proyecto</b>	<b>8</b>
4.1. Cinemática directa . . . . .	8
4.2. Cinemática inversa . . . . .	8
4.3. Funciones jacobianas . . . . .	8
4.4. Implementación final realizada . . . . .	8
<b>5. <i>Hardware</i></b>	<b>9</b>

---

5.1. Impresión en 3D . . . . .	9
5.2. Microcontrolador utilizado . . . . .	9
5.3. Desarrollo y componentes de la PCB . . . . .	9
5.4. Comunicaciones . . . . .	9
5.5. Motores empleados (actuadores) . . . . .	9
<b>6. <i>Software</i></b>	<b>10</b>
6.1. S1 . . . . .	10
6.1.1. UI/UX . . . . .	10
6.1.2. Protocolo de comunicación . . . . .	10
6.1.3. Pseudolenguaje de comunicación . . . . .	10
6.1.4. Logs . . . . .	10
6.1.5. Otros . . . . .	10
6.2. S2 . . . . .	10
6.2.1. Protocolo de comunicación . . . . .	10
6.2.2. Interpretación del pseudo-lenguaje . . . . .	10
6.2.3. Cálculo de movimientos/trayectorias . . . . .	10
6.2.4. Control de los componentes . . . . .	10
6.2.5. Otros . . . . .	10
<b>7. Casos de estudio</b>	<b>11</b>
7.1. Decisiones tomadas . . . . .	11
7.2. Desarrollo de las distintas partes del proyecto . . . . .	11
<b>8. Calidad y pruebas</b>	<b>12</b>
8.1. Batería de pruebas . . . . .	12
8.2. Explicación de las pruebas . . . . .	12
8.3. Resultados esperados   resultados obtenidos . . . . .	12
8.4. Reflexión - solución . . . . .	12
<b>9. Demostración</b>	<b>13</b>
<b>10. Planificación, costes y tiempo empleado</b>	<b>14</b>

---

10.1. Diagramas de Gantt . . . . .	14
10.2. Sueldos propuestos y costes obtenidos . . . . .	14
10.3. Coste de los materiales inicial - coste de los materiales final . . . . .	14
10.4. Evolución del tiempo empleado . . . . .	14
10.5. Contratiempos y tiempo de desarrollo final . . . . .	14
<b>11. Conclusiones</b>	<b>15</b>
11.1. Conclusiones técnicas . . . . .	15
11.2. Experiencia personal en el desarrollo del proyecto . . . . .	15
11.3. Conocimientos adquiridos y nuevas competencias . . . . .	15
<b>12. Futuras mejoras</b>	<b>16</b>
12.1. Desarrollos e implementaciones que no han podido realizarse . . . . .	16
12.2. Ideas propuestas pero no implementadas . . . . .	16
12.3. Otras . . . . .	16
<b>Bibliografía</b>	<b>17</b>
<b>Anexos</b>	<b>18</b>

# Historial de versiones

Revisión	Fecha	Autor(es)	Descripción
0.0	27.05.2020	J. Alonso, M. Stanescu, A. Moya	Comienzo del desarrollo de la memoria.

# Capítulo 1

## Motivación y objetivos

### 1.1. Estado del arte

#### 1.1.1. Desarrollo de la robótica a lo largo de la historia

El mundo de la robótica da acceso a resolver una gran variedad de problemas donde el ser humano estaba limitado físicamente: levantar cargas de gran peso, realizar tareas repetitivas durante tiempos prolongados, etc. Además, como bien se sabe, ha permitido el desarrollo de cadenas de producción en masa para poder desarrollar y crear los productos que usamos diariamente, desde el coche hasta el teléfono móvil.

Desde que se empezó a investigar en este campo, el desarrollo de los brazos robóticos ha sido exponencial: se empezó trabajando con pequeños autómatas hasta el desarrollo de la revolución industrial [1].

Los primeros modelos, como se puede ver en la figura 1.1, empezaron intentando hacer representaciones de las manos humanas. En particular, se crearon un flautista y un tamborilero los cuales eran capaces de tocar los respectivos instrumentos utilizando un complejo sistema de cables y engranajes para poder mover los “dedos” de los músicos.

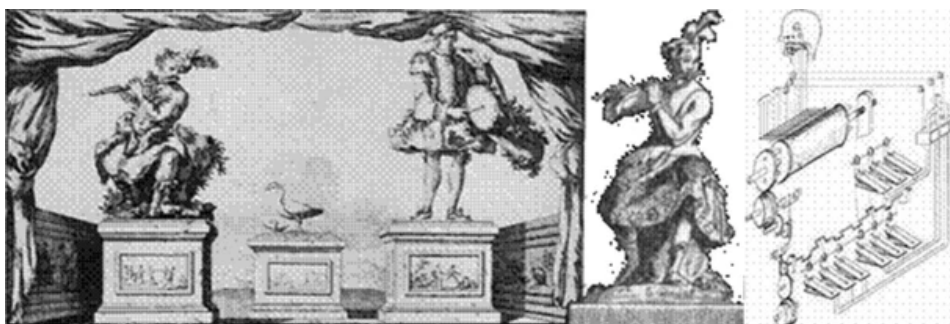


Figura 1.1: flautista y tamborilero de Vaucanson [2].

Siguiendo con esta idea, se fue mejorando y desarrollando el modelo de imitación de las

articulaciones y los miembros de los humanos, llegando a construir estructuras más complejas y avanzadas, pensadas en su momento para poder tocar el clavicordio mediante un muñeco, como se muestra en la figura 1.2:

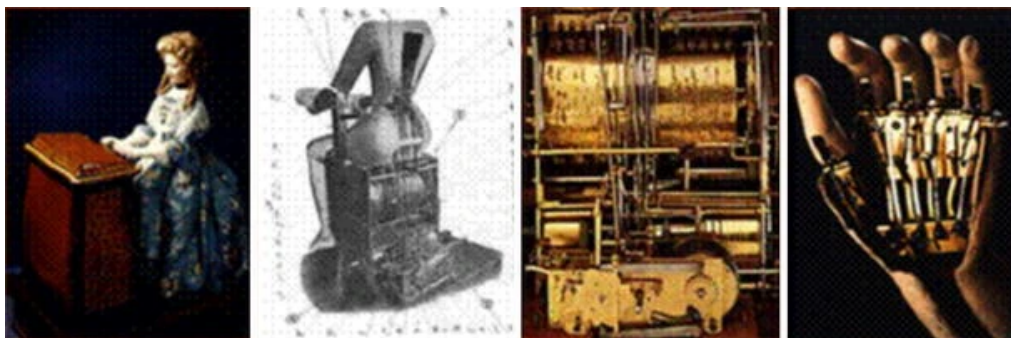


Figura 1.2: en 1774, “lady musician” por Jaquet-Droz [3].

Durante los años siguientes, el proceso se fue refinando hasta el punto de desarrollar un autómata el cual era capaz de jugar al ajedrez, llamado “The Turk” [4], construido en 1769. La estructura comprendía un conjunto de mecanismos los cuales eran controlados por un operador, encargado de realizar los movimientos del brazo izquierdo del autómata.

En la figura 1.3 se puede ver cómo está diseñado el sistema para mover un controlador pantográfico sobre el tablero de juego, controlado por el operador externo antes mencionado:

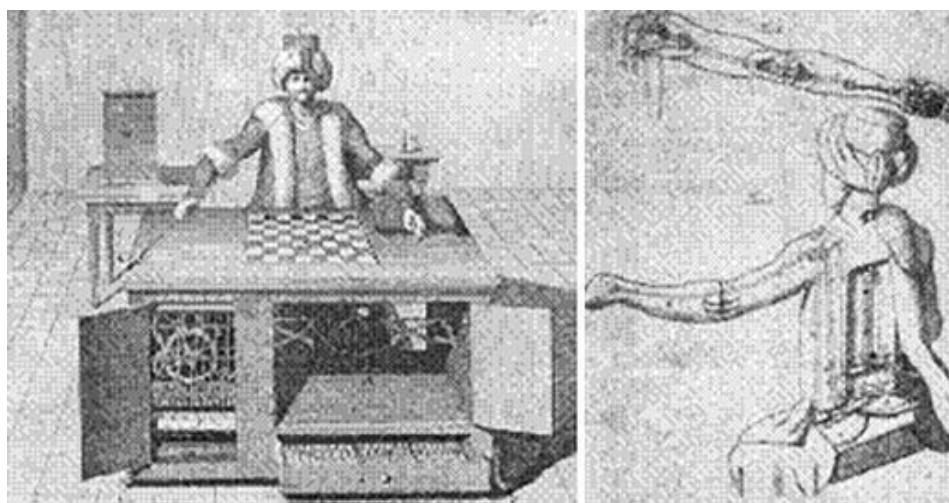


Figura 1.3: “The Turk”, creado por von Kempelen en 1769 [4].

Desde entonces, la robótica ha evolucionado y crecido de manera exponencial. Por una parte, debidas las distintas guerras que han habido en los últimos 200 años, se ha dado un gran impulso a la industria encargada de crear distintos dispositivos con fines de defensa y ataque. En particular, se potenciaron mucho los desarrollos de dispositivos por control remoto, destacando el diseño de Nicola Tesla en 1898 de un barco completamente automatizado, controlado por control remoto y sumergible, como se puede ver en la figura 1.4:

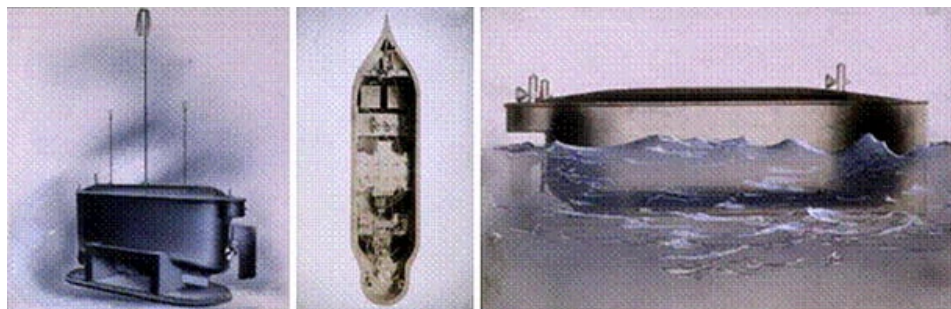


Figura 1.4: barco a control remoto de Nicola Tesla, en 1898 [5].

Por otro lado, dada la cantidad de bajas de las Primera y Segunda Guerras Mundiales, se empezaron a desarrollar robots que permitieran sustituir a los militares en el campo de batalla, destacando en este campo el robot “Elektro”, creado por la compañía Westinghouse. Dicho robot supuso un gran éxito en la industria de los robots y armamentística, pudiendo moverse completamente, disparar armas, mover elementos faciales para “expresar emociones” e inclusive poder comunicarse.

En la figura 1.5, se puede ver a la izquierda la primera versión “Alpha” y, a la derecha, la versión mejorada “Elektro”:

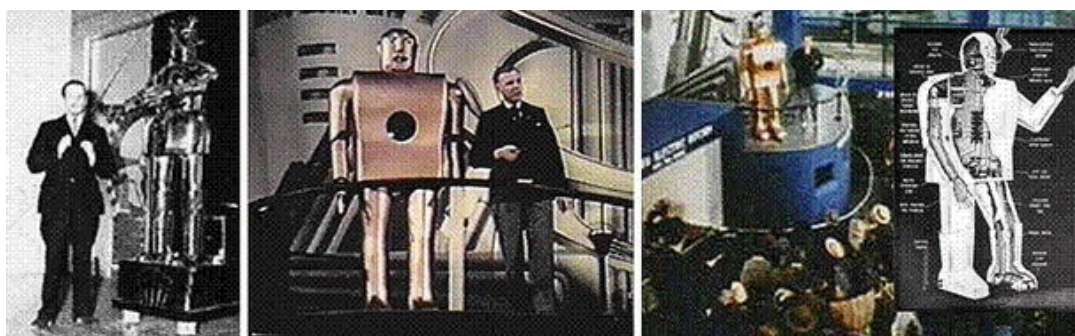


Figura 1.5: “Alpha”, el primer robot diseñado con fines militares y su posterior evolución, “Elektro”.

Toda esta evolución ha acabado dando a la época actual, en donde tenemos robots sofisticados y con distintos actuadores, pudiendo interactuar con muchísimos elementos de nuestro entorno y trabajar en distintas fases de producción de cadenas de montaje en serie. Además, se trabaja continuamente para que cada vez los robots puedan realizar más tareas de los humanos, mejorando cada vez más los “*end-effectors*” (controladores del final de los extremos del brazo). En la figura 1.6 se puede ver cómo robots medianamente antiguos (del 2005) ya podían realizar diversas actividades, como interactuar con las personas o tocar un instrumento.





Figura 1.6: exposición mundial del 2005 en Japón [6].

### 1.1.2. Los brazos robóticos

## 1.2. Motivaciones para el desarrollo del proyecto

## 1.3. Objetivos del proyecto

## 1.4. Metodología

## Capítulo 2

### Explicación de la estructura del proyecto

2.1. Matemáticas

2.2. *Hardware*

2.3. *Software*

## Capítulo 3

# Diagramas, requisitos y diseño

### 3.1. Requisitos

### 3.2. Diagramas y diseño

## Capítulo 4

### Las matemáticas del proyecto

- 4.1. Cinemática directa
- 4.2. Cinemática inversa
- 4.3. Funciones jacobianas
- 4.4. Implementación final realizada

# Capítulo 5

## *Hardware*

### 5.1. Impresión en 3D

Las razones por las cuales se toma la decisión de fabricar la estructura del brazo mediante impresión 3D se detallan a continuación:

- Cumplir con el requisito de replicabilidad y asequibilidad: Una de las bases del proyecto es que pueda ser reproducible a bajo coste tanto de recursos como de tiempo. Se decide por tanto construir la estructura física del brazo mediante técnicas de impresión 3D ya que están altamente extendidas y son cada vez mas asequibles.
- Características físicos del material: El plástico utilizado para la impresión es ligero y suficientemente resistente para soportar las cargas para las que esta pensado el manipulador.
- Disponibilidad de impresora 3D: Dado que la universidad es capaz de proveer al equipo con una impresora 3D funcional, los costes del proyecto se abaratan si realizamos la estructura con los medios de los que la universidad ya dispone.
- Simplificar el proceso de mejora y personalización: Debido a la naturaleza OpenSoftware y OpenHardware de nuestro proyecto esperamos que las personas puedan contribuir a el mejorándolo y/o personalizándolo. La impresión 3D facilita estas acciones.

### 5.2. Microcontrolador utilizado

### 5.3. Desarrollo y componentes de la PCB

### 5.4. Comunicaciones

### 5.5. Motores empleados (actuadores)

# Capítulo 6

## *Software*

### 6.1. S1

#### 6.1.1. UI/UX

#### 6.1.2. Protocolo de comunicación

#### 6.1.3. Pseudolenguaje de comunicación

#### 6.1.4. Logs

#### 6.1.5. Otros

### 6.2. S2

#### 6.2.1. Protocolo de comunicación

#### 6.2.2. Interpretación del pseudo-lenguaje

#### 6.2.3. Cálculo de movimientos/trayectorias

#### 6.2.4. Control de los componentes

#### 6.2.5. Otros

## Capítulo 7

### Casos de estudio

7.1. Decisiones tomadas

7.2. Desarrollo de las distintas partes del proyecto

## Capítulo 8

### Calidad y pruebas

8.1. Batería de pruebas

8.2. Explicación de las pruebas

8.3. Resultados esperados | resultados obtenidos

8.4. Reflexión - solución



## Capítulo 9

### Demostración

## Capítulo 10

### Planificación, costes y tiempo empleado

- 10.1. Diagramas de Gantt
- 10.2. Sueldos propuestos y costes obtenidos
- 10.3. Coste de los materiales inicial - coste de los materiales final
- 10.4. Evolución del tiempo empleado
- 10.5. Contratiempos y tiempo de desarrollo final

# Capítulo 11

## Conclusiones

11.1. Conclusiones técnicas

11.2. Experiencia personal en el desarrollo del proyecto

11.3. Conocimientos adquiridos y nuevas competencias

## Capítulo 12

### Futuras mejoras

- 12.1. Desarrollos e implementaciones que no han podido realizarse
- 12.2. Ideas propuestas pero no implementadas
- 12.3. Otras

# Bibliografía

- [1] M. E. Moran, «Evolution of robotic arms,» en, *Journal of Robotic Surgery*, vol. 1, n.º 2, págs. 103-111, jul. de 2007, ISSN: 1863-2491. DOI: [10.1007/s11701-006-0002-x](https://doi.org/10.1007/s11701-006-0002-x). dirección: <https://doi.org/10.1007/s11701-006-0002-x> (visitado 01-06-2020).
- [2] J. d. Vaucanson, *Le mécanisme du flûteur automate: présenté à Messieurs de l'Académie royale des Sciences : avec la description d'un canard artificiel et aussi celle d'une autre figure également merveilleuse, jouant du tambourin et de la flûte*, fr. chez Jacques Guerin, imprimeur-libraire, 1738, Google-Books-ID: UNw6AAAAcAAJ.
- [3] Chapuis, Alfred and Droz, Edmond, *Automata: A historical and technological study*. L'Editions du Griffon, 1958.
- [4] Standage, Tom, *The Turk: The life and times of the famous eighteenth-century chess-playing machine*. Walker company, 2002.
- [5] Belarmino, J and Moran, ME and Firoozi, F and Capello, S and Kolios, E and Perrotti, M, «Tesla's robot and the dawn of the current era. Society of urology and engineering,» 7.<sup>a</sup> ép., vol. 19, n.º J Endourol, A214, 2005.
- [6] —, «An oriental culture of robotics—the coming maelstrom. Society of Urology and Engineering,» 7.<sup>a</sup> ép., vol. 19, n.º J Endourol, A119, 2005.

## Anexos