

Instituto Tecnológico de Costa Rica

Escuela de Ingeniería Electrónica



---

**Diseño e implementación de un controlador utilizando  
aprendizaje reforzado sobre una planta prototipo de control  
automático**

---

SIPLab-TEC

Jorge Andrés Brenes Alfaro

2017101058

27 de julio de 2022

Yo, Jorge Andrés Brenes Alfaro portador de la cédula 305140729, declaro que los resultados obtenidos en el presente trabajo de investigación, previo a la obtención del título de Licenciado en Ingeniería en Electrónica, son absolutamente originales, auténticos y personales.

Soy consciente de que el hecho de no respetar los derechos de autor y realizar una mala conducta científica; es decir, fabricación de datos falsos y plagio, conlleva sanciones universitarias y/o legales.

En tal virtud, declaro que el trabajo de investigación realizado sujeto a evaluación no ha sido presentado anteriormente para obtener algún grado académico o título, ni ha sido publicado en sitio alguno y los efectos legales y académicos que se puedan derivar del trabajo propuesto de investigación son y serán de mi sola y exclusiva responsabilidad legal y académica.

# Índice

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1. Entorno del proyecto</b>                          | <b>1</b>  |
| <b>2. Definición del problema</b>                       | <b>2</b>  |
| 2.1. Generalidades . . . . .                            | 2         |
| 2.2. Síntesis del problema . . . . .                    | 3         |
| <b>3. Enfoque de la solución</b>                        | <b>3</b>  |
| 3.1. Alternativa 1 . . . . .                            | 4         |
| 3.2. Alternativa 2 . . . . .                            | 4         |
| 3.3. Alternativa 3 . . . . .                            | 5         |
| 3.4. Selección de solución . . . . .                    | 6         |
| <b>4. Meta</b>  | <b>7</b>  |
| <b>5. Objetivo General</b>                              | <b>8</b>  |
| <b>6. Objetivos específicos</b>                         | <b>8</b>  |
| <b>7. Procedimientos para la ejecución del proyecto</b> | <b>9</b>  |
| <b>8. Cronograma de actividades</b>                     | <b>9</b>  |
| 8.1. Entregables . . . . .                              | 9         |
| <b>9. Uso de recursos</b>                               | <b>13</b> |
| <b>10. Presupuesto</b>                                  | <b>13</b> |
| <b>11. Referencias Bibliográficas</b>                   | <b>15</b> |

## 1. Entorno del proyecto

El Tecnológico de Costa Rica es una institución de educación superior, la cual cuenta con la escuela de ingeniería de electrónica para formar profesionales de excelencia y mejorar la calidad de vida con el uso racional del conocimiento de la electrónica. Dentro de dicha escuela se encuentra el laboratorio de procesamiento de señales e imágenes (SIPLab), cuyo propósito es solucionar problemas del ámbito nacional y regional relacionados con procesamiento y reconocimiento de información transportada en señales temporales y espaciales [1]. De momento, se integra un nuevo proyecto, el cual busca la aplicación de aprendizaje automático (AA) en las plantas prototipo de control automático para en el futuro avanzar en demás aplicaciones.

Actualmente, el control automático de plantas y procesos tienen una cuota de mercado creciente en la economía global, ya que gran parte de la industria se encuentra automatizada. Un sistema automático de control es un conjunto de componentes físicos conectados entre sí regido por el concepto de realimentación, cuya característica especial es la de mantener al controlador central informado del estado de las variables para generar acciones correctivas sin intervención de agentes exteriores [2]. Esto ha repercutido en la reducción de costos, del consumo de energía y tiempo, y el incremento en la calidad y volumen de producción de una planta industrial. Además, el logro de una vida con mayores comodidades, la eliminación de errores y aumento en la seguridad de los procesos [3].

El área de control automático ha demostrado sus múltiples aplicaciones pues se ha convertido en una parte importante en los sistemas de vehículos espaciales y robóticos, en procesos modernos de fabricación y en cualquier operación industrial que requiera control de temperatura, presión, humedad, flujo. Lo que conlleva a impulsar la tecnología en áreas como domótica, procesos químicos, ingeniería mecánica, automovilismo, aeronáutica, entre otras; al igual que el desarrollo y aplicación de técnicas modernas de control, impulsando el desarrollo en avances científicos y tecnológicos [3].

En los métodos convencionales de control, cada etapa requiere de intervención manual en la que por medio de experimentación deben ajustarse parámetros, cuya validez depende de qué tan precisos son los modelos determinados previamente. En la Fig. 1 se observan dichas etapas para el diseño del control, donde los pasos cinco, seis y siete son procesos iterativos que se pueden optimizar de forma que se reduzca la configuración manual. Por ello, se exploran técnicas recientes involucradas con el aprendizaje automático, ya que utilizan redes neuronales cuyo proceso es iterativo y requieren de mínima intervención humana.

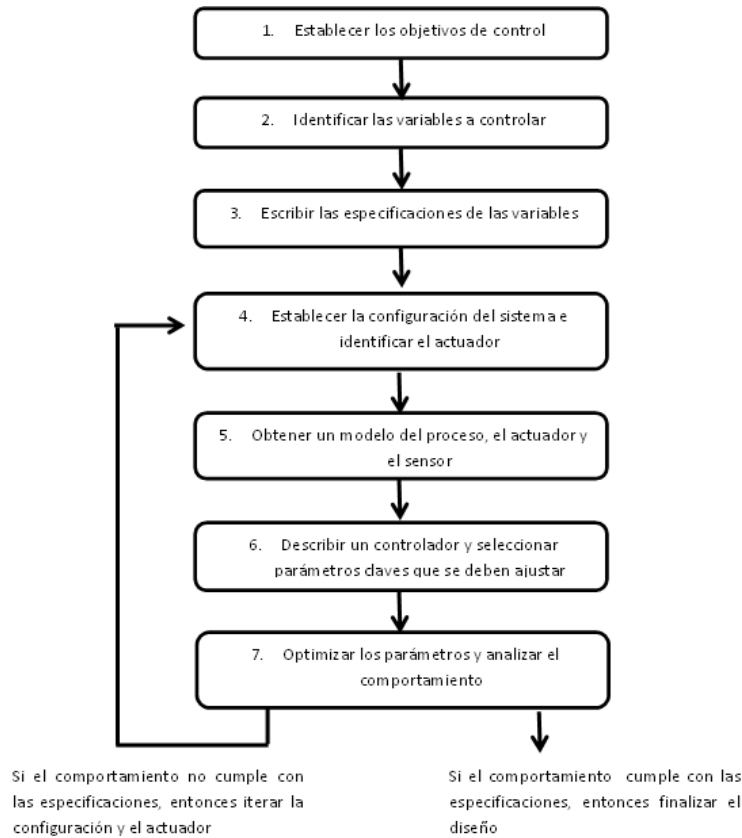


Figura 1: Proceso de diseño para el control de un sistema. [4]

## 2. Definición del problema

### 2.1. Generalidades

En sistemas de control, el proceso a controlar se describe por medio de un modelo matemático dependiente del tiempo, el cual representa su comportamiento. Conforme las plantas modernas de control que poseen no linealidades y más de una entrada y salida, vuelve más complejo la descripción del sistema, requiriendo una mayor cantidad de ecuaciones [2]. La mayoría de los sistemas dinámicos que se encuentran en la naturaleza son no lineales [5] y recientemente, hay sistemas que presentan dificultades en la ejecución de control en aplicaciones modernas de ingeniería, tales como sistemas de comando de vuelo, manipuladores de robot, sistemas de inyección de combustible de alto rendimiento, entre otros [6]. Por lo que se vuelve de importancia algún método o técnica para identificar el sistema, aunque no hay método fijo debido a esta propiedad de no linealidad.

Hoy en día, la industria tiene dificultades al controlar sistemas dinámicos complejos, pues tienen no linealidades y perturbaciones impredecibles que afectan el desempeño de los controladores, donde sistemas que implementan control clásico, no son 100 % efectivos [7]. Además, la realización de modelos y controladores requieren experimentación, cuya exhaustividad y resultados están con frecuencia afectados por la no linealidad de los sistemas, lo que conlleva a procesos iterativos que consumen tiempo, exploración y refinamiento de controles lineales para zonas de operación específicas.

El control clásico utilizado hasta el momento es bueno siempre y cuando la planta sea linealizable en puntos de operación específicos, ya que para controlar un sistema se debe elegir un punto de operación; no obstante, si este punto se desplaza el control del sistema deja de funcionar, lo cual es usual en los sistemas no lineales. Los sistemas clásicos de control no pueden manejar la no linealidad de los sistemas y surge la necesidad de diseñar e implementar estrategias innovadoras de control automático para los procesos no lineales y controlar el sistema en todo su espacio de operación. La Escuela de Electrónica ha acumulado experiencia en el diseño de sistemas de control con las metodologías tradicionales, pero en años recientes con el crecimiento del aprendizaje automático han surgido alternativas que no han sido aun exploradas en la escuela.

## **2.2. Síntesis del problema**

En la escuela de Ingeniería en Electrónica en general y el SIPLab en particular, las técnicas de control automático capaces de lidiar con espacios o volúmenes de operación no han sido exploradas, lo que limita su proyección en los procesos de enseñanza tanto en el área de control como de aprendizaje automático aplicado en estas áreas.

## **3. Enfoque de la solución**

Los controladores convencionales están diseñados para un sistema con variables lineales, es decir, variables que están elevados al exponente uno. No obstante, para aquellos sistemas donde existen puntos de operación variantes en el tiempo o no linealidades en su modelo, la capacidad de controlar eficientemente el sistema se complica [8], y por ello es necesario hacer uso de técnicas especiales e innovadoras de control para lidiar con dichos problemas. Por lo tanto, se proponen tres alternativas de controladores que permitan el control de la planta prototipo no lineal en todo su espacio de operación mediante técnicas de control automático que el SIPLab no ha experimentado. Además, para la implementación del controlador se propone utilizar un sistema embebido de altas prestaciones que sea capaz de ejecutar el modelo seleccionado, y a su vez impone limitaciones a la complejidad del algoritmo a seleccionar.

Posteriormente, con la ayuda de una matriz de Pugh se analizan las soluciones en busca de la más adecuada, donde un cero indica que la alternativa es similar, un +1 que la alternativa es mejor y un -1 que la alternativa es peor en el criterio comparada a la referencia.

### **3.1. Alternativa 1**

Como primer alternativa de solución se propone hacer uso de técnicas de control adaptativo, técnica que da sus comienzos en la década de los 80, aunque existían limitaciones tecnológicas que hacían que esta alternativa fuera muy costosa. Actualmente, no está sujeto a esas limitaciones, pues se puede desarrollar esta técnica a bajo costo y con un procesamiento alto y rápido [8].

El control adaptativo busca mejorar el funcionamiento de la planta modificando su comportamiento en respuesta a los cambios en la dinámica del sistema y a perturbaciones externas, que con el tiempo deterioran su funcionamiento. Además, este permite realizar ajustes al controlador en tiempo real. Esto se realiza utilizando técnicas que miden las variables dinámicas de la planta de forma continua, las compara con parámetros deseados y mediante su diferencia modifica las características del controlador, generando así un accionamiento que mantiene las variables de la planta en un rango de desempeño [8].

Se haría uso de un filtro de Kalman para la estimación de parámetros o variables de estado cuando el sistema presenta ruidos aditivos. Además, este filtro proporciona una predicción del estado futuro del sistema, basado en estimaciones pasadas [9], lo que ayuda al controlador adaptativo a adaptarse de mejor forma ante problemas o perturbaciones que ocurran en el sistema.

### **3.2. Alternativa 2**

Se propone hacer uso del aprendizaje automático para llevar a cabo el control de la planta, mediante redes neuronales artificiales (RNA), ya que estas constituyen una herramienta para el aprendizaje de relaciones complejas a partir de un conjunto de ejemplos. Además, debido a sus capacidades de aproximación, su adaptabilidad y su tolerancia a fallos, las redes neuronales artificiales presentan una alternativa en el modelado de sistemas no lineales [10]. Por ello, han surgido propuestas del uso de estas mismas para la identificación del comportamiento de un sistema dinámico no lineal desconocido, donde a partir de la salida ante una entrada dada, la red es capaz de modificar sus parámetros aprendiendo una aproximación de la dinámica del sistema hasta conseguir un modelo fiable [11, 12].

Una alternativa al control clásico la ofrece el aprendizaje reforzado (RL), que ha mostrado en los últimos años avances en sistemas como AlphaGo y AlphaFold [13], el cual ofrece algoritmos para buscar y desarrollar controladores óptimos de sistemas con dinámicas no lineales, estocásticas y que son desconocidas o inciertas [14]. Esta metodología busca que un agente sea capaz de encontrar la acción correcta de manera autónoma, explorando un espacio desconocido y determinando la acción mediante prueba y error. Dicho agente aprende por medio de recompensas y penalizaciones que obtiene de sus acciones, con el fin de actuar y crear la mejor estrategia posible, de forma que maximice la recompensa [13, 15]. Esta interacción es representada en la figura 2.

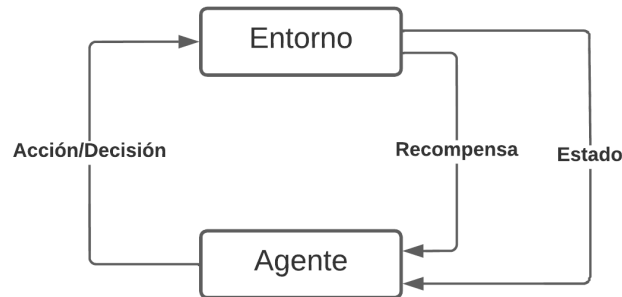


Figura 2: Interacción del aprendizaje reforzado.

Este enfoque no solo se ha utilizado para resolver juegos de Atari, sino que ya existen propuestas en sistemas de control, donde el control clásico no es 100 % efectivo [13]. Esta metodología ajusta el control ante cambios en el entorno del sistema al aprender con las acciones, permitiendo automatizar el proceso más allá de lo alcanzable con los métodos tradicionales de control.

Por lo tanto, se propone utilizar dos redes neuronales artificiales, una que aprenda a comportarse como el sistema de estudio, que adquiera las características de este y lo aproxime lo mejor posible; y otra que aprenda y ejecute el control del sistema por medio del aprendizaje reforzado.

### 3.3. Alternativa 3

La tercera alternativa de solución es similar a lo planteado en la anterior, ya que también hace uso de una red neuronal artificial basada en aprendizaje reforzado para controlar la planta, debido a su facilidad de aproximación, su adaptabilidad y demás características anteriormente expuestas. Lo que hace diferente a esta alternativa, es la aplicación de una única red neuronal directamente sobre la planta prototipo de control automático.



### 3.4. Selección de solución

Finalmente, el criterio de selección se basa en los resultados obtenidos de la matriz de Pugh, mostrada en la tabla 1. La segunda alternativa resulta más apta en cuanto a capacidad de control, costo, seguridad de la planta, tiempo de desarrollo y entrenamiento, expresividad del método, ajuste de parámetros, preparación de datos e innovación.

Tabla 1: Matriz de Pugh para la selección de la solución.

| Criterios                        | Peso | Concepto      |               |               |
|----------------------------------|------|---------------|---------------|---------------|
|                                  |      | Alternativa 1 | Alternativa 2 | Alternativa 3 |
| Capacidad de controlar la planta | 5    | =             | 0             | 0             |
| Costo económico                  | 4,5  | =             | +1            | -1            |
| Seguridad de la planta           | 4    | =             | 0             | -1            |
| Tiempo de desarrollo             | 3,5  | =             | +1            | +1            |
| Expresividad del método          | 3    | =             | +1            | +1            |
| Ajuste de parámetros             | 2,5  | =             | -1            | -1            |
| Tiempo de entrenamiento          | 2    | =             | -1            | -2            |
| Preparación de datos             | 1,5  | =             | -1            | -1            |
| Innovación                       | 1    | =             | +1            | +1            |
| <b>SUMA GENERAL RANKING</b>      |      | 0<br>2°       | 6<br>1°       | -7<br>3°      |

Tras evaluar los criterios, se observa que con la segunda alternativa se aprovecha el uso de las redes neuronales artificiales (RNA), pues, como se mencionó anteriormente, son una herramienta para el aprendizaje de relaciones complejas, debido a sus capacidades de aproximación y adaptabilidad [10]. Además de obtener los beneficios de tener un sistema donde se experimenta con diversas entradas sin afectar directamente la planta, se evita el riesgo de que los primeros experimentos sean tan violentos en los cambios que se dañe la planta. Usando la RNA que mimetiza el comportamiento de la planta se puede usar un reloj más rápido que el tiempo real, acelerando los experimentos y eliminando la desventaja de tener que limitar la ejecución al tiempo real de la planta. Por ello, el volumen de datos disponible para el entrenamiento del modelo de aprendizaje reforzado es mayor con la red que modela al sistema real, que el disponible usando la planta en físico.

Esta segunda alternativa requiere un menor tiempo de desarrollo en comparación con la alternativas uno y tres, ya que con la ayuda de las RNA se prescinde de cálculos complejos, así como del planteamiento del modelo que se necesitaría para el control clásico, pues las RNA se adaptan a cualquier tipo de estructura sin necesidad de conocer sus características [11].

Tomando en cuenta la matriz de Pugh en la tabla 1, se propone hacer uso de dos redes neuronales artificiales, una que mimetice el comportamiento del sistema de estudio y otra que lleve a cabo el control del sistema por medio de aprendizaje reforzado. Dicha solución se representa con un diagrama de etapas en la Fig. 3, donde primeramente, se recopilan datos de entrada y salida de la planta para el entrenamiento de la RNA mimetizadora. Seguidamente, se desarrolla el controlador basado en aprendizaje reforzado y por último, se prueba el controlador con la RNA mimetizadora y con la planta prototipo.

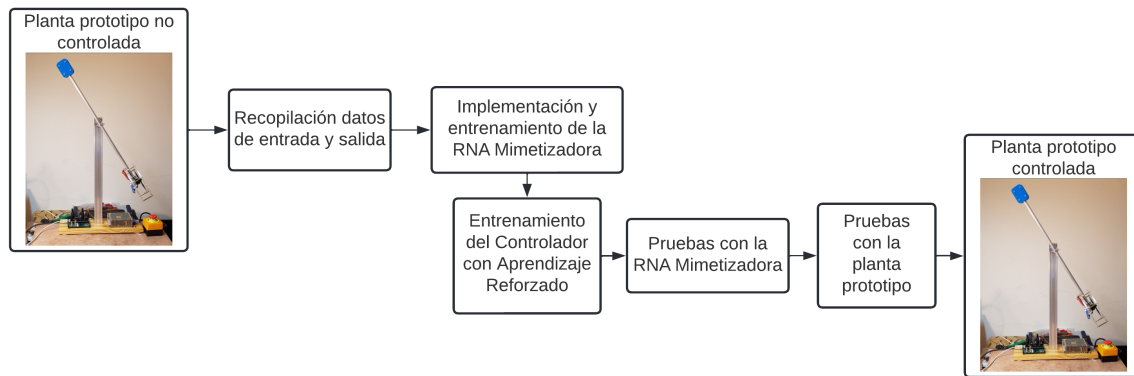


Figura 3: Diagrama de etapas involucradas en la solución seleccionada.

## 4. Meta

Controlar exitosamente la planta prototipo utilizando aprendizaje reforzado, estabilizando el sistema en un rango de tiempo de al menos del 10 %, con un sobreimpulso inferior al 5 %, con cero error de estado estacionario y la eliminación de perturbaciones de entrada o salida a la planta.

## 5. Objetivo General

Desarrollar un sistema de control para una planta prototipo mediante el uso de aprendizaje reforzado.

**Indicador:** Control de la planta prototipo mediante el uso de aprendizaje reforzado, tiene capacidad de estabilizar el sistema en un rango de tiempo de al menos del 10 % del control clásico, con un sobreimpulso inferior al 5 %, con cero error de estado estacionario y la eliminación de perturbaciones de entrada o salida a la planta.

## 6. Objetivos específicos

1. Acoplar el sistema embebido de altas prestaciones al lazo de control.

**Indicador:** El sistema captura valores del sensor y responde con valores para el actuador con una frecuencia de al menos 50 Hz y con una latencia de no más de una muestra.

2. Preparar un conjunto de datos para el entrenamiento de la red neuronal artificial mimetizadora de la planta real, particionado en datos de entrenamiento, validación y prueba.

**Indicador:** El conjunto de datos debe contener al menos 500 episodios de al menos tres segundos de duración para que la red neuronal tenga la suficiente información para entrenar el modelo y 100 episodios de igual duración para los datos de validación y prueba.

3. Implementar una red neuronal artificial que mimetice el comportamiento del sujeto de estudio.

**Indicador:** La respuesta entregada por la red neuronal debe aproximarse a la planta, de forma que los valores no excedan un error del 10 % comparados al conjunto de prueba.

4. Diseñar un sistema capaz de realizar la labor de control de la planta prototipo, a través de la implementación de aprendizaje reforzado.

**Indicador:** Mediante métricas de desempeño y simulaciones se comprueba la eficacia del sistema diseñado para el control de la planta. Teniendo la capacidad de estabilizar el sistema, con un sobreimpulso inferior al 5 %, con cero error de estado estacionario y la eliminación de perturbaciones de entrada o salida a la planta.

## 7. Procedimientos para la ejecución del proyecto

La ejecución del proyecto se planifica de forma jerárquica, donde se estipulan actividades por objetivos, los requisitos de las actividades y las dependencias con alguna actividad previa. Por último, se definen los tiempos de duración de las actividades. Las actividades se resumen en la tabla 2.

## 8. Cronograma de actividades

Esta sección presenta la agenda de actividades según el tiempo disponible, donde este tiempo comprende del 25 de julio del 2022 hasta el 11 de noviembre del 2022, el cual abarca las 16 semanas lectivas para llevar acabo el desarrollo del proyecto.

El cronograma se presenta como diagrama de Gantt, el cual es una herramienta de gestión de proyectos que ayuda a tener una visión general del proyecto y de las dependencias de las tareas. En la Fig. 4 se ilustra el diagrama elaborado para el presente proyecto así como la ruta crítica. Por último, en la Fig. 5 se muestra el diagrama de PERT para visualizar la relación entre actividades.

### 8.1. Entregables

En la tabla 3 se enlistan los entregables con sus fechas respectivas en el periodo de ejecución del trabajo final de graduación.

Tabla 3: Lista de entregables.

| Entregable  | Fecha      |
|---|------------|
| Lazo de control completo incluyendo al sistema embebido de altas prestaciones, el actuador, la planta y el sensor.                      | 16/08/2022 |
| Conjunto de datos en un archivo comprimido, junto a documentación de los formatos utilizados.   | 18/08/2022 |
| Repositorio de Github con el modelo de red neuronal mimetizadora de planta, así como el enlace a la nube con los parámetros del modelo. | 10/09/2022 |
| Repositorio de Github con el modelo de control basado en aprendizaje reforzado, y enlace a la nube con los parámetros del modelo        | 16/10/2022 |
| Resumen de los resultados del controlador basado en aprendizaje reforzado aplicado en la planta prototipo.                              | 08/11/2022 |

Tabla 2: Procedimientos para la ejecución del proyecto.

| Objetivo  | Actividad   | Tiempo (días) | Requisito           |
|---|---|---------------|---------------------|
| 1. Acoplar el sistema embebido de altas prestaciones al lazo de control.  | 1.1 Definición de la planta prototipo de control automático.  | 2             | -                   |
|   | 1.2 Investigar y definir la tarjeta de desarrollo a utilizar.   | 5             | -                   |
|   | 1.3 Determinar cómo recibir los datos de entrada provenientes de los sensores.  | 16            | 1.1 y 1.2           |
|   | 1.4 Determinar cómo transmitir los datos de salida al lazo de control.  | 16            | 1.1 y 1.2           |
| 2. Preparar un conjunto de datos para el entrenamiento de la red neuronal artificial mimetizadora de la planta real, particionado en datos de entrenamiento, validación y prueba. | 2.1 Recopilar datos de entrada y salida de la planta prototipo al introducir señales de entrada aleatorias y determinísticas.     | 2             | 1.3 y 1.4           |
| 3. Implementar una red neuronal artificial que mimetice el comportamiento de la planta.   | 3.1 Revisar el estado del arte sobre redes neuronales que aprendan el comportamiento de sistemas dinámicos.                       | 4             | -                   |
|   | 3.2 Determinar el modelo a utilizar para la RNA.  | 3             | 3.1                 |
|   | 3.3 Implementar un algoritmo de aprendizaje automático que mimetice el comportamiento de la planta.                               | 7             | 1.1 y 3.2           |
|   | 3.4 Entrenar el modelo que mimetiza el comportamiento de la planta.   | 10            | 2.1 y 3.3           |
|   | 3.5 Evaluar el desempeño de la RNA mediante el porcentaje de error de los datos de salida resultantes de la RNA contra la planta. | 2             | 3.4                 |
| 4. Diseñar un sistema capaz de realizar la labor de control de la planta prototipo, a través de la implementación de aprendizaje reforzado.                                       | 4.1 Investigación del estado del arte sobre el uso del aprendizaje reforzado para el control de sistemas dinámicos.               | 4             | 3.4                 |
|   | 4.2 Determinar el método de aprendizaje reforzado a utilizar.   | 3             | 4.1                 |
|   | 4.3 Determinar las métricas de desempeño para evaluar el algoritmo basado en aprendizaje reforzado.                               | 3             | 4.1                 |
|   | 4.4 Determinar las métricas de evaluación de control automático para evaluar el controlador.                                      | 3             | 1.1 y 4.1           |
|   | 4.5 Desarrollar el algoritmo del controlador basado en aprendizaje reforzado mediante Python.                                     | 14            | 4.2 y 4.3           |
|   | 4.6 Entrenar el controlador basado en aprendizaje reforzado.  | 21            | 3.5 y 4.5           |
|   | 4.7 Implementar el controlador basado en aprendizaje reforzado en la tarjeta de desarrollo.                                       | 5             | 1.2 y 4.6           |
|   | 4.8 Verificar que el controlador se ejecute correctamente en la tarjeta de desarrollo.  | 5             | 4.4 y 4.7           |
|   | 4.9 Ejecutar y evaluar el controlador sobre el modelo mimetizado.   | 5             | 3.5 4.4 y 4.8       |
|   | 4.10 Ejecutar y evaluar el controlador sobre la planta prototipo.   | 5             | 1.3, 1.4, 4.4 y 4.9 |

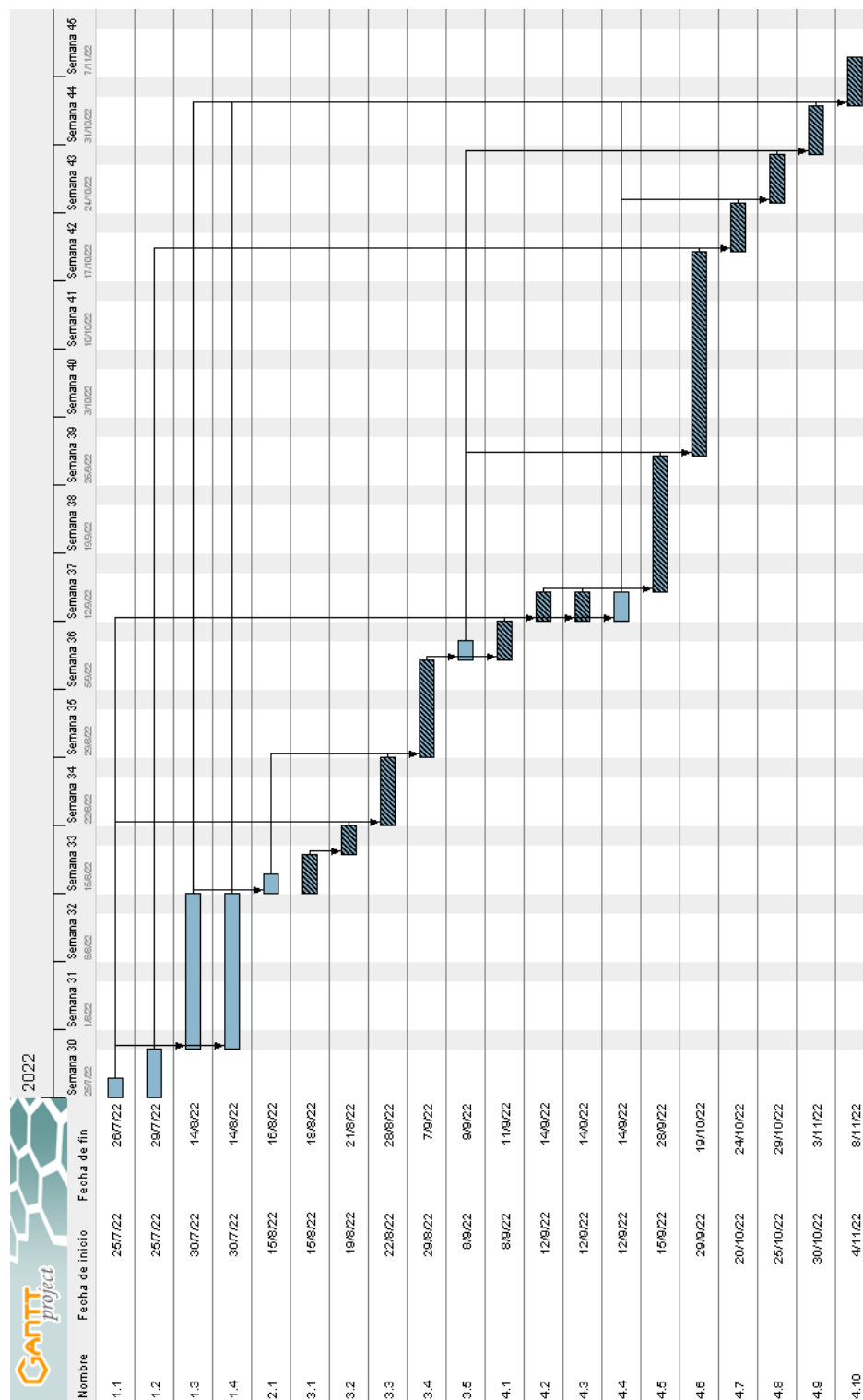


Figura 4: Ruta crítica del cronograma de actividades.

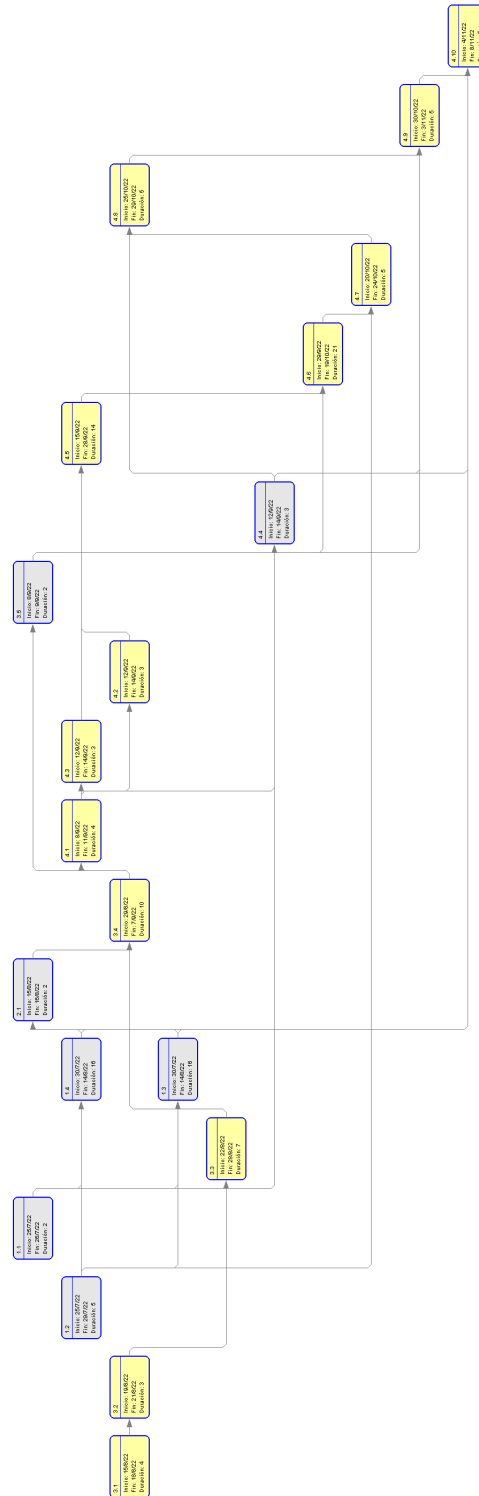


Figura 5: Diagrama de PERT de las actividades.

## 9. Uso de recursos

Para la ejecución del controlador basado en aprendizaje reforzado para controlar una planta prototipo se hace uso de los siguientes recursos:

- Una planta prototipo de control automático donde se implemente el controlador.
- Computadora donde desarrollar el controlador. En caso de ser portátil, se requiere accesorios como el cargador.
- Tarjeta de desarrollo NVIDIA Jetson TX2.
- Acceso a internet para llevar a cabo las revisión bibliográfica.
- Tiempo de cómputo para el entrenamiento de las redes neuronales.

## 10. Presupuesto

Se realiza la estimación del presupuesto, ya que la inversión y rentabilidad son factores a considerar en un nuevo proyecto. En el tabla 4 se observa el presupuesto total del proyecto, donde se considera el precio del dolar en ₡680, precio de venta a la fecha de preparación de este documento del Banco Nacional de Costa Rica.

Tabla 4: Estimación del presupuesto para la realización del proyecto.

| Especie aportado por la empresa y monto solicitado |                  |                            |          |           |                          |                  |             |                                  |
|--|------------------|----------------------------|----------|-----------|--------------------------|------------------|-------------|----------------------------------|
| Rubro  | Unidad de medida | Costo por unidad de medida | Cantidad | Servicios | Materiales y suministros | Bienes duraderos | Total       | Aporte en especie por la empresa |
| Beca Deportiva                                     | Semestre         | ₡ 205 950                  | 1        |           |                          |                  |             | ₡ 205 950                        |
| Servicios básicos                                  | Semana           | ₡ 20 000                   | 16       | ₡ 320 000 |                          |                  | ₡ 320 000   |                                  |
| Materiales de oficina                              | Semana           | ₡ 1 000                    | 16       |           | ₡ 16 000                 |                  | ₡ 16 000    |                                  |
| Unidad de Cómputo                                  | Unidad           | ₡ 816 000                  | 1        |           |                          |                  |             | ₡ 816 000                        |
| Planta prototipo de control                        | Unidad           | ₡ 154 170                  | 1        |           |                          |                  |             | ₡ 154 170                        |
| Tarjeta de desarrollo                              | Unidad           | ₡ 611 315                  | 1        |           |                          | ₡ 611 315        | ₡ 611 315   |                                  |
| Tiempo de ejecución (Google Cloud)                 | Mes              | ₡ 70 491                   | 4        | ₡ 281 965 |                          |                  | ₡ 281 965   |                                  |
| Consumibles del proyecto                           | Semana           | ₡ 25 000                   | 16       |           | ₡ 400 000                |                  | ₡ 400 000   |                                  |
| Varios   | Unidad           | ₡ 700 000                  | 1        |           | ₡ 700 000                |                  | ₡ 700 000   |                                  |
| Total  |                  |                            |          | ₡ 601 965 | ₡ 1 116 000              | ₡ 611 315        | ₡ 2 329 280 | ₡ 1 176 120                      |



Se realiza la estimación del presupuesto en los cuatro meses que corresponden al semestre lectivo, con el fin de proyectar los gastos en este periodo de tiempo. Este se observa en la tabla 5.

Tabla 5: Estimación del presupuesto mensual para la realización del proyecto.

| Rubro                    | Aporte mensual por la empresa |           |           |           |             |
|--------------------------|-------------------------------|-----------|-----------|-----------|-------------|
|                          | 1 Mes                         | 2 Mes     | 3 Mes     | 4 Mes     | Total       |
| Beca deportiva           | ₡ 205 950                     | ₡ -       | ₡ -       | ₡ -       | ₡ 205 950   |
| Servicios básicos        | ₡ 80 000                      | ₡ 80 000  | ₡ 80 000  | ₡ 80 000  | ₡ 320 000   |
| Materiales de oficina    | ₡ 4 000                       | ₡ 4 000   | ₡ 4 000   | ₡ 4 000   | ₡ 16 000    |
| Tarjeta de desarrollo    | ₡ 611 315                     | ₡ -       | ₡ -       | ₡ -       | ₡ 611 315   |
| Tiempo de computo        | ₡ 70 491                      | ₡ 70 491  | ₡ 70 491  | ₡ 70 491  | ₡ 281 965   |
| Consumibles del proyecto | ₡ 100 000                     | ₡ 100 000 | ₡ 100 000 | ₡ 100 000 | ₡ 400 000   |
| Varios                   | ₡ 700 000                     | ₡ -       | ₡ -       | ₡ -       | ₡ 700 000   |
| Total                    | ₡ 1 565 806                   | ₡ 254 491 | ₡ 254 491 | ₡ 254 491 | ₡ 2 329 280 |

## 11. Referencias Bibliográficas

- [1] SIPLab, “¡Bienvenidos al sitio web del SIP-Lab!”, 2020. [En línea]. Disponible en: <http://www.ie.tec.ac.cr/palvarado/pmwiki/index.php/Main/HomePage>. [Visitado 05-03-2022].
- [2] K. Ogata, “Ingeniería de control moderna”, 5ta ed., Madrid: Pearson Educación, 2010.
- [3] M. Alcorta Gracia, “Impacto del control automático e inteligencia artificial”, 2019. [En línea]. Disponible en: <http://cienciauanl.uanl.mx/?p=9193>. [Visitado 09-03-2022].
- [4] W. Corvacho Cárdenas, “Diseño e implementación de un sistema de inmersión temporal automatizado para cultivos de arándano y piña en los laboratorios de Nutriarandanos S.A.C”, tesis por el título de ingeniero mecatrónico, Lima, Perú, 2019.
- [5] H. Kapasi, 2022. “Modeling Non-Linear Dynamic Systems with Neural Networks”, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://towardsdatascience.com/modeling-non-linear-dynamic-systems-with-neural-networks-f3761bc92649>. [Visitado 07-03-2022].
- [6] M. Serón, “Sistemas no lineales”, Apuntes de clase, Universidad Nacional de Rosario, Argentina, 2001.
- [7] E. Sarmiento Jurado, “Diseño e implementación de un controlador basado en redes neuronales con entrenamiento rápido para sistemas de control 2x2”, Maestría en Ing. Mecánica, Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia, 2006.
- [8] J. Gómez Martínez y G. Mendoza Avedaño, “Aplicación del control adaptativo a procesos industriales tipo SISO”, Tesis para especialización en Instrumentación y Control Industrial, Universidad Pontificia Bolivariana, Bucaramanga, Colombia, 2009.
- [9] B. Millidge, A. Tschantz, A. Seth, y C. Buckley, “Neural Kalman Filtering”, *arXiv*, 2021. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2102.10021>.
- [10] R. Valverde Gil and D. Gachet Páez, “Identificación de sistemas dinámicos utilizando redes neuronales”, *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, no. 1697-7912, 2007.
- [11] S. Torrubia Caravaca, “Redes neuronales multimodelo aplicadas al control de sistemas”, Universidad Autónoma de Barcelona, España, 2010.

- [12] C. Møldrup Legaard, T. Schranz, G. Schweiger, J. Drgoňa, B. Falay, C. Gomes, A. Iosifidis, M. Abkar, and P. Gorm Larsen, “Constructing Neural Network-Based Models for Simulating Dynamical Systems”, *ACM Computing Surveys*, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1145/1122445.1122456>
- [13] A. Diaz Latorre, “Aprendizaje por refuerzo para control de sistemas dinámicos”, tesis por el título de Ingeniero Mecatrónico, Universidad Autónoma de Occidente, Santiago de Cali, Colombia, 2019.
- [14] L. Busoniu, T. de Bruin, D Tolic, J. Kober e I. Palunko, “Reinforcement learning for control: Performance, stability, and deep approximators”, *Annual Reviews in Control*, vol. 46, pág. 8-28, ISSN 1367-5788, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2018.09.005>.
- [15] J. Torres, en *Introducción al aprendizaje por refuerzo profundo. Teoría y práctica en Python*, Publicación Independiente, 2021, Capítulo 1.

## Anexo A. Características del proceso de diseño de ingeniería.

| I. Elementos integrados en el proyecto                                   |   |  |   |  |       |
|--|---|--|---|--|-------|
| Aspecto  | 1   | 2  | 3   | 4  | Total |
| 1. Matemática  | Valore el grado de complejidad de conceptos matemáticos requeridos para el desarrollo del proyecto.   |  |   |  | 4     |
|  | No requiere utilizar conceptos matemáticos.   | Requiere utilizar conceptos matemáticos elementales (nivel algebraico).  | Requiere utilizar conceptos matemáticos de complejidad intermedia (nivel de cálculo y álgebra lineal).                        | Requiere utilizar conceptos matemáticos de alta complejidad (nivel de transformaciones y modelos).                   |       |
| 2. Ciencias básicas  | El desarrollo del proyecto requiere la utilización de conceptos correspondientes a las ciencias básicas (física, química u otras ciencias conexas).   |  |   |  | 3     |
|  | No requiere el uso de conceptos de ciencias básicas.  | Requiere utilizar conceptos elementales de ciencias básicas.   | Requiere utilizar conceptos de ciencias básicas de complejidad intermedia.  | Requiere utilizar conceptos de ciencias básicas de alta complejidad.   |       |
| 3. Ciencias de la ingeniería   | a. Relacionados con la ingeniería electrónica: La solución del problema requiere la utilización de conceptos correspondientes a los campos de la teoría de circuitos, técnicas de medición, electrotecnia, electrónica analógica, sistemas digitales, microprocesadores, procesamiento digital de señales, electromagnetismo, comunicaciones eléctricas, teoría de modelos, sensórica, control automático.                    |  |   |  | 3     |
|  | No requiere el uso de conceptos de la ingeniería electrónica.   | Requiere utilizar conceptos elementales de la ingeniería electrónica.  | Requiere utilizar conceptos de la ingeniería electrónica de complejidad intermedia.   | Requiere utilizar conceptos de la ingeniería electrónica de alta complejidad.  |       |
|  | b. Relacionados con la ingeniería de la computación: El desarrollo del proyecto considera la utilización de conceptos correspondientes a la ingeniería de la computación (tales como lenguajes, estructuras de datos, algoritmos, bases de datos, graficación computacional, modelos computacionales, métodos numéricos, inteligencia artificial, redes neuronales y otros que puedan clasificarse dentro de esta categoría). |  |   |  | 4     |
|  | No requiere el uso de conceptos de ciencias de la ingeniería de la computación.   | Requiere utilizar conceptos elementales de la ingeniería de la computación.  | Requiere utilizar conceptos de ciencias de la ingeniería de la computación de complejidad intermedia.                         | Requiere utilizar conceptos de ciencias de la ingeniería de la computación de alta complejidad.                      |       |
|  | c. Relacionados con otras ingenierías: El desarrollo del proyecto considera la utilización de conceptos correspondientes a los campos de la termodinámica, estática, dinámica, ciencias de los materiales, fluidos (hidráulica & neumática) y otros que puedan clasificarse dentro de esta categoría.   |  |   |  | 1     |
|  | No requiere el uso de conceptos de otras ingenierías.   | Requiere utilizar conceptos elementales de otras ingenierías.  | Requiere utilizar conceptos de otras ingenierías de complejidad intermedia.   | Requiere utilizar conceptos de otras ingenierías de alta complejidad.  |       |
| 4. Estudios complementarios  | El desarrollo del proyecto considera la realización de estudios complementarios correspondientes a los campos de la estadística, la ergonomía u otros.  |  |   |  | 3     |
|  | No requiere la realización de estudios complementarios.   | Requiere realizar estudios complementarios elementales.  | Requiere realizar estudios complementarios de complejidad intermedia.   | Requiere realizar estudios complementarios de alta complejidad.  |       |
| II. Restricciones de cumplimiento que limitan el desarrollo del proyecto |   |  |   |  |       |
| Aspecto  | 1   | 2  | 3   | 4  | Total |
| 5. Estándares  | Durante el desarrollo del proyecto debe acatarse el cumplimiento de estándares técnicos aprobados por organismos internacionales tales como los de la IEEE, FCC, ITU-T (antes CCITT), ASH, etc.   |  |   |  | 1     |
|  | El proyecto no está sujeto a restricciones derivadas de estándares técnicos internacionales.  | El proyecto está sujeto en bajo grado a restricciones derivadas de estándares técnicos internacionales.              | El proyecto está sujeto en un grado intermedio a restricciones derivadas de estándares técnicos internacionales.              | El proyecto está sujeto en alto grado a restricciones derivadas de estándares técnicos internacionales.              |       |
| 6. Aspectos legislativos   | Durante el desarrollo del proyecto debe acatarse el cumplimiento de leyes, normas o disposiciones legales nacionales e internacionales específicas de la disciplina, tales como código eléctrico nacional, etc.   |  |   |  | 1     |
|  | El proyecto no está sujeto a restricciones derivadas de regulaciones específicas  | El proyecto está sujeto en bajo grado a restricciones derivadas de regulaciones específicas.                         | El proyecto está sujeto en un grado intermedio a restricciones derivadas de regulaciones específicas.                         | El proyecto está sujeto en alto grado a restricciones derivadas de regulaciones específicas.                         |       |
| 7. Factores interdisciplinarios  | El desarrollo del proyecto está sujeto a la consideración de restricciones derivadas de factores interdisciplinarios establecidos por el diseño industrial, la economía, la seguridad y salud ambientales, la protección ambiental, etc.  |  |   |  | 1     |
|  | El proyecto no está sujeto a la consideración de restricciones derivadas de factores interdisciplinarios.   | El proyecto está sujeto en bajo grado a la consideración de restricciones derivadas de factores interdisciplinarios. | El proyecto está sujeto en un grado intermedio a la consideración de restricciones derivadas de factores interdisciplinarios. | El proyecto está sujeto en alto grado a la consideración de restricciones derivadas de factores interdisciplinarios. |       |
| III. Características del proceso de diseño del proyecto                  |   |  |   |  |       |
| Aspecto  | 1   | 2  | 3   | 4  | Total |
| 8. Creativo  | Valore si este proyecto pretende desarrollar un nuevo elemento, sistema o proceso y/o el grado de innovación de la solución propuesta (aporte creativo del estudiante para el logro de objetivos).  |  |   |  | 3     |
|  | El elemento, sistema o proceso desarrollado no es nuevo ni su solución innovación alguna.   | El elemento, sistema o proceso desarrollado requiere un bajo grado de innovación.                                    | El elemento, sistema o proceso desarrollado requiere un grado intermedio de innovación.                                       | El elemento, sistema o proceso desarrollado es nuevo y requiere un alto grado de innovación.                         |       |
| 9. Iterativo   | Valore el grado en que el logro de objetivos de este proyecto involucra el desarrollo de un proceso iterativo.  |  |   |  | 4     |
|  | El proceso de desarrollo de este proyecto es lineal (no requiere iteración alguna).   | El proceso de desarrollo de este proyecto requiere un bajo grado de iteración.                                       | El proceso de desarrollo de este proyecto requiere un grado intermedio de iteración.  | El proceso de desarrollo de este proyecto requiere un alto grado de iteración.                                       |       |
| 10. De final abierto   | Valore el grado en que la continuidad de este proyecto está abierta la generación de nuevos proyectos o iniciativas dentro del área de conocimiento a la que pertenece.   |  |   |  | 4     |
|  | Este proyecto no ofrece posibilidades de desarrollo de nuevos proyectos dentro del área a la que pertenece.   | Este proyecto ofrece pocas posibilidades de desarrollo de nuevos proyectos dentro del área a la que pertenece.       | Este proyecto ofrece algunas posibilidades de desarrollo de nuevos proyectos dentro del área a la que pertenece.              | Este proyecto ofrece muchas posibilidades de desarrollo de nuevos proyectos dentro del área a la que pertenece.      |       |

## Anexo B.

## HOJA DE INFORMACIÓN DEL PROYECTO

### Información del estudiante:

**Nombre:** Jorge Andrés Brenes Alfaro.

**Cédula:** 305140729.

**Carné ITCR:** 2017101058.

**Dirección de su residencia en época lectiva:** Del bar Los Sombreros 100 m norte y 25 m este, Caballo Blanco, Cartago, Costa Rica.

**Teléfono:** 60341298.

**Email:** [jorgebre2098@hotmail.com](mailto:jorgebre2098@hotmail.com)

### Información del proyecto:

**Nombre del Proyecto:** Uso del aprendizaje reforzado sobre una planta prototipo de control automático.

**Área del Proyecto:** Control automático y aprendizaje automático.

### Información de la empresa:

**Nombre:** SIPLab, Escuela de Ing. Electrónica, Tecnológico de Costa Rica.

**Zona:** Cartago, Cartago, Oriental, Campus Tecnológico Cartago.

**Dirección:** Calle 15, Avenida 14, 1 km sur de la Basílica de los Ángeles.

**Teléfono:** 2550 9005

**Sitio web:** [www.tec.ac.cr](http://www.tec.ac.cr)

**Actividad Principal:** Laboratorio de investigación en procesamiento de señales e imágenes.

### Información del asesor en la empresa:

**Nombre:** José Pablo Alvarado Moya.

**Puesto que ocupa:** Docente

**Departamento:** Escuela de Ingeniería Electrónica.

**Profesión:** Ingeniero en Electrónica.

**Grado académico:** Doctorado.

**Teléfono:** 2550 9005

**Ext.:** 9005

**Email:** [palvarado@itcr.ac.cr](mailto:palvarado@itcr.ac.cr)

JOSE PABLO ALVARADO MOYA (FIRMA)  
PERSONA FISICA, CPF-01-0753-0713.  
Fecha declarada: 11/03/2022 09:53:21 AM  
Razón: VoBo Hoja de Información Jorge Brenes  
Lugar: Cartago

---

**Firma del asesor**