

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Trabajo Fin de Grado

***Mejora del mecanismo de detención de un
coche impulsado por una reacción química***

***Improvement of the detention mechanism of a
car impulsed by a chemical reaction***

Para acceder al Título de
Graduado en Ingeniería Química

Autor: Kevin Fernández Caso

Fecha: Julio, 18

Mejora del mecanismo de detención de un coche impulsado por una reacción química

TÍTULO	Mejora del mecanismo de detención de un coche impulsado por una reacción química		
AUTOR	Kevin Fernández Caso		
DIRECTOR/CODIRECTOR	Guillermo Díaz Sainz /Antonio Domínguez Ramos		
TITULACIÓN	Grado en Ingeniería Química	FECHA	18/07/2019

Palabras clave

Chem-E-Car; mecanismo de detención; circuito; resistencia dependiente de la luz; reloj de yodo.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La competición Chem-E-Car® es un evento anual organizado por AIChE en el que los estudiantes universitarios de diferentes universidades diseñan y construyen un prototipo a pequeña escala de un automóvil impulsado por una reacción química [1]. El automóvil debe transportar con seguridad una carga de masa variable dentro de un rango de varios metros y detenerse en una distancia definida. No está permitido el uso de un sistema de frenado mecánico. Por esta razón, el mecanismo de detención debe basarse en una reacción química.

Este proyecto continúa con el trabajo realizado en el Departamento de Ingenierías Química y Biomolecular de la Universidad de Cantabria. El prototipo se basa en la reacción entre KMnO_4 y $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$ para producir CO_2 [2]. La presión del flujo de CO_2 generado permite el movimiento de un pistón que impulsa el automóvil. El mecanismo de detención se basa en la conocida reacción del reloj de yodo. El cambio de color (de incoloro a azul oscuro intenso) activa una electroválvula que corta el suministro de CO_2 al pistón, lo que detiene el prototipo [3].

El objetivo principal de este Proyecto de Fin de Grado es diseñar, construir y verificar el rendimiento del mecanismo de parada basado en la reacción del reloj de yodo para detener un prototipo impulsado por una reacción química. Este mecanismo mejora sustancialmente el rendimiento desarrollado en trabajos anteriores [4] [5].

RESULTADOS

Antes de la etapa de diseño, se revisaron las normas establecidas por la organización AIChE Chem-E-Car® en términos de restricciones económicas y de seguridad. Posteriormente, se compararon varios sistemas de detección de luz, concluyendo que un circuito electrónico adaptado con un LDR (resistencia dependiente de la luz) proporciona mejor rendimiento. Dependiendo del valor de resistencia de la luz incidente en el LDR, el circuito puede activar la electroválvula. El rendimiento del prototipo se

Mejora del mecanismo de detención de un coche impulsado por una reacción química

evaluó para conocer la influencia de varios factores como el ruido y eliminarlo para el día de la competición.

Después del diseño del circuito basado en LDR, se instaló otro circuito de iluminación que incluía una fuente LED. Este sistema de iluminación ofrece una mejora en comparación con la fuente de luz anterior implementada en el primer prototipo, en términos de autonomía y eficiencia. Finalmente, el circuito mejorado del reloj de yodo fue testeado y adaptado a la velocidad alcanzada por el nuevo prototipo ($0.25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$). La ecuación que relaciona el tiempo (t) con la cantidad de KIO_3 necesaria para que el prototipo se detenga en una determinada distancia, se determinó de acuerdo con:

$$t = 27257 * C^{-1,668}$$

Donde C es la cantidad de KIO_3 (en 40 ml de disolución).

Este nuevo mecanismo de detención se probó con éxito en la demostración Chem-E-Car que tuvo lugar en la Conferencia de Estudiantes de ANQUE-ICCE del 17 de junio, como parte de las actividades desarrolladas en el 3^{er} congreso ANQUE-ICCE-CIBIQ 2019.

CONCLUSIONES

Las principales conclusiones de este Proyecto de Fin de Grado se resumen a continuación:

- Mejora del sistema de mezcla de los reactivos químicos del reloj de yodo.
- Mejora de la fuente de iluminación del circuito del reloj de yodo.
- Simplificación del circuito de reconocimiento del reloj de yodo.
- Reducción del coste del circuito del reloj de yodo en más del 50% en comparación con el primer prototipo.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] American Institute of Chemical Engineers. *AIChE Chem-E-Car Competition*TM.
- [2] Romero López, Alberto, *Design of a Chem-E-Car prototype based on a chemical reaction*, Trabajo Fin de Grado, 2015.
- [3] Díaz Sainz, Guillermo, *Chem-E-Car: Iodine clock reaction*, Trabajo Fin de Grado, 2015.
- [4] Vadillo J, *Design, building and testing of a Chem-E-Car prototype based on a chemical reaction*, Trabajo Fin de Grado, 2017.
- [5] De la Peña Calzada, Carlos; *Chem-E-Car: Braking mechanism*, Trabajo Fin de Grado, 2017.

Mejora del mecanismo de detención de un coche impulsado por una reacción química

TÍTULO	Improvement of the detention mechanism of a car impulsed by a chemical reaction		
AUTOR	Kevin Fernández Caso		
DIRECTOR/CODIRECTOR	Guillermo Díaz Sainz / Antonio Domínguez Ramos		
TITULACIÓN	Degree in Chemical Engineering	FECHA	18/07/2019

KEYWORDS

Chem-E-Car; detention mechanism; circuit; light-dependent resistance; Iodine clock.

SCOPE

The Chem-E-Car® Competition is an annual competition organized by AIChE in which undergraduate students from different universities have to design and build a small-scale prototype of a car driven by a chemical reaction [1]. The car must safely carry a load of variable mass within a range of several meters and stop at a define distance. The use of a mechanical braking system is not allowed. For this reason, the detention mechanism needs be based on a chemical reaction.

This project continues the work previously carried out at the Chemical and Biomolecular Engineering Department of the University of Cantabria. The prototype is based on the reaction between KMnO_4 and $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$ to produce CO_2 [2]. The pressure of the CO_2 stream generated enables the movement of a piston that impulses the car. The detention mechanism is based on the well-known reaction of the iodine clock. The change of color (from colorless to deep dark blue) triggers an electrovalve which cuts off the supply of CO_2 to the piston, stopping the prototype [3].

The main goal of this Final Degree Project is to design, build and check the performance of the stopping mechanism based on the reaction of the iodine clock in order to stop a chemical car prototype. This mechanism improves substantially the performance reported in previous studies [4] [5].

RESULTS

Previous to the design stage, the rules established by the AIChE Chem-E-Car® in terms of economic and security constrains were reviewed. After that, several light detection systems were compared, concluding that best performance is provided by an electronic circuit adapted with an LDR (resistance that depends on the light). Depending on the resistance value of the incident light in the LDR, the circuit can activate the electrovalve. The performance of the prototype was assessed in order to know the influence of several factors such as noise and eliminate it for the day of the competition.

After the design of the LDR-based circuit, another circuit for lighting including a LED was installed. This lighting system offers an improvement in comparison to the previous light

Mejora del mecanismo de detención de un coche impulsado por una reacción química

source implemented in the first prototype since it is more autonomous and efficient. Finally, the enhanced iodine clock circuit was tested and adapted to the speed achieved by the new prototype ($0.25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$). The equation that relates the time (t) with the amount of KIO_3 needed for the chemical reaction that stops the car was determined according to:

$$t = 27257 * C^{-1,668}$$

Where C is the amount of KIO_3 (in 40 mL of solution).

This new detention mechanism was successfully tested in the Chem-E-Car demonstration that took place in the ANQUE-ICCE Student Conference on June 17, as part of the activities developed in the 3rd ANQUE-ICCE-CIBIQ 2019 congress.

CONCLUSIONS

The main achievements of this Final Degree Project are summarized below:

- Improvement of the mixing system of the chemical reagents of the iodine clock.
- Improvement of the lighting source of the iodine clock circuit.
- Simplification of the electronic recognition circuit.
- Reduction of the cost of the iodine clock circuit in more than 50 % in comparison to the first prototype.

REFERENCES

- [1] American Institute of Chemical Engineers. *AIChE Chem-E-Car Competition*TM.
- [2] Romero López, Alberto, *Design of a Chem-E-Car prototype based on a chemical reaction*, Final Degree Project, 2015.
- [3] Díaz Sainz, Guillermo, *Chem-E-Car: Iodine clock reaction*, Final Degree Project, 2015.
- [4] Vadillo Abascal, José Manuel, *Design, building and testing of a Chem-E-Car prototype based on a chemical reaction*, Final Degree Project, 2017.
- [5] De la Peña Calzada, Carlos, *Chem-E-Car: Braking mechanism*, Final Degree Project, 2017.

Agradecimientos

En primer lugar, agradecer a mi madre todo lo que me ayudado durante este curso.

Por un lado, dar las gracias a la Universidad de Cantabria y al Departamento de Ingenierías Química y Biomolecular por prestarnos toda la ayuda posible para la realización del nuevo prototipo, además de poder utilizar sus instalaciones, además de a la Delegación de Alumnos de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicaciones por el premio en el “I Concurso Los Alumnos También Patrocinan”.

Por otra parte, agradecer a la Real Sociedad Española Química (RSEQ) por el pago de la inscripción en la Conferencia de Estudiantes (3rd ANQUE-ICCE-CIBIQ 2019) celebrado en Santander, donde se pudo participar en una demostración del nuevo prototipo del reloj de yodo, además de poder participar en el Concurso de Posters Científicos.

Gracias a Guillermo Díaz Sainz, Antonio Domínguez Ramos y a Manuel Alvarez Guerra por guiarme durante la elaboración de este proyecto.

Gracias a Diego Andrés de las Cuevas por enseñarme algunos fundamentos de electrónica.

Finalmente dar las gracias a Raúl Gómez de la Riva por la ayuda en la construcción del nuevo prototipo.

Índice

1. Introducción.....	9
1.1. La Chem-E-Car® competition.....	9
1.2 Antecedentes del proyecto Chem-E-Car en la Universidad de Cantabria.....	10
1.2.1 Reacción de arranque del prototipo.....	11
1.2.2 Reacción del reloj de yodo como mecanismo de detención	12
1.2.3 Análisis y mejora del mecanismo de frenado	13
1.3 Objetivos	16
2. Metodología.....	17
2.1 Mejora del sistema de mezclado del reloj de yodo	17
2.2 Mejora en el sistema de control y detención del reloj de yodo.....	19
2.2.1 El circuito basado en LDR.....	19
2.2.2 Análisis de posibles mejoras al circuito electrónico	21
2.3 Mejora del sistema de iluminación artificial	23
2.4 Estudio de variables de la reacción de yodo	24
3. Resultados.....	27
3.1 Nuevo circuito del reloj de yodo	27
3.2 Cinética del reloj de yodo empleando las cantidades de referencia del primer prototipo	28
3.3 Cinética del reloj de yodo empleando una proporción diferente de H₂SO₄.....	30
3.4 Calibración de tiempos del nuevo prototipo Chem-E-Car	32
3.4.1 Análisis de sensibilidad	34
3.5 Presupuesto del mecanismo de detención	36
4. Conclusiones.....	37
5. Referencias.....	39
6. Anexos.	41

Índice de figuras

Figura 1. Representación del trazado a seguir.	9
Figura 2. Cambio de viraje de la reacción del reloj de yodo.	13
Figura 3. Sistema de frenado de Carlos López Hernández.	14
Figura 4. Funcionamiento de una electroválvula mediante solenoide.	17
Figura 5. Válvula de bola empleada para la mezcla de reactivos.	18
Figura 6. Curva característica del LDR [12].	20
Figura 7. Sistema integrado de relé, arduino y fotosensor.	21
Figura 8. Sistema interno del transformador eléctrico.	22
Figura 9. Localización de la fuente de alimentación del sistema de control y del calibrador del LDR.	22
Figura 10. Representación del circuito de control de la válvula.	23
Figura 11. Representación del circuito de iluminación.	24
Figura 12. LED de luz amarilla, y LED de luz blanca con su resistencia en serie para la formación del circuito.	24
Figura 13. Montaje experimental del reloj de yodo mediante la válvula de bola.	25
Figura 14. Sistemas de reconocimiento e iluminación implementados en el mecanismo.	27
Figura 15. Nuevo prototipo con la válvula de bola implementada.	28
Figura 16. Representación del tiempo frente a volumen de KIO_3	29
Figura 17. Representación del tiempo frente a volumen de KIO_3	31
Figura 18. Representación del tiempo frente a volumen de KIO_3	32
Figura 19. Representación del tiempo frente a la distancia recorrida por el coche.	33
Figura 20. Calibración final del coche (método gráfico).	34
Figura 21. Volumen de KIO_3 frente a las velocidades medias del nuevo prototipo Chem-E-Car.	35
Figura 22. Preparación de las disoluciones de la reacción de impulsión del prototipo.	38

Índice de tablas

Tabla 1. Tabla resumen del procedimiento experimental seguido.	26
Tabla 2. Tabla de precios descompuestos.	36
Tabla 3. Tabla resumen de todos los experimentos llevados a cabo del reloj de yodo.	41
Tabla 4. Análisis de sensibilidad.	42
Tabla 5. Análisis de sensibilidad.	42
Tabla 6. Análisis de sensibilidad.	42

1. Introducción.

1.1. La *Chem-E-Car*[®] competition

La *Chem-E-Car*[®] Competition es un evento organizado por la organización AIChE (American Institute of Chemical Engineers), cuyo objetivo es animar a los estudiantes a diseñar y construir un coche impulsado por una reacción química, que sea seguro y capaz de detenerse en una distancia y transportando una carga de peso dada [1].

Por un lado, la competición se basa en dos intentos cuyo objetivo es recorrer una distancia entre 15 m y 30 m, con una carga de peso entre 0 mL y 500 mL de agua, que serán dados por los jueces de la competición una hora antes de comenzar la misma. La competición se basa en reajustar los reactivos químicos necesarios para impulsar y detener el prototipo construido lo más cerca posible de la meta. Al finalizar la competición, se mide la separación entre el prototipo y la meta, tanto en exceso como en defecto. Es importante destacar, que, si el prototipo se sale de los límites laterales del circuito, se penaliza con una sanción de 3 metros. El trazado a seguir en la competición se muestra en la figura 1.

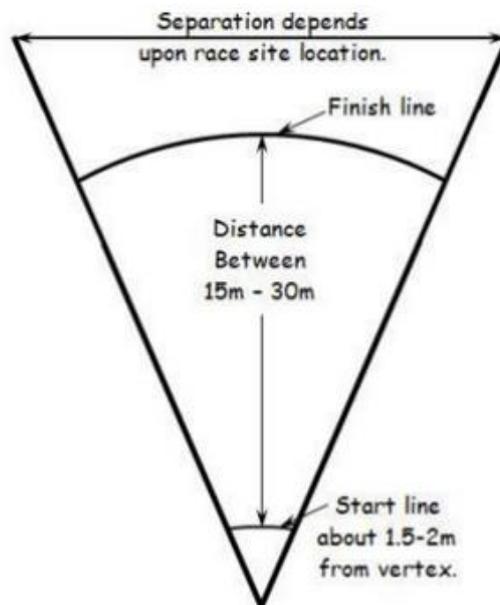


Figura 1. Representación del trazado a seguir.

Por otro lado, respecto al diseño del coche, AIChE especifica que todas las partes del vehículo deben haber sido diseñadas por el estudiante. Esto significa que el diseño debe

Mejora del mecanismo de detención de un coche impulsado por una reacción química

ser probado y realizado por los estudiantes, y que las piezas han sido compradas para su posterior ensamblaje. Es muy importante prestar atención a la seguridad en el manejo del prototipo, en especial a las reacciones necesarias para impulsar y detener el prototipo. Todas las reacciones deben tener lugar en el prototipo y no pueden utilizarse tecnologías de precarga, tampoco se puede emplear ningún tipo de batería eléctrica ni sistemas de calibración digital. Las baterías comerciales solo pueden usarse para instrumentación especializada, y no se permite usarlas como fuente de energía. Los sistemas mecánicos de frenado y los controles remotos tampoco se pueden usar. En cuanto al tamaño del prototipo, la única restricción impuesta por la organización es que todos los componentes del coche tienen que entrar en unas dimensiones de 40 cm x 30 cm x 20 cm. Por último, el coste de los componentes y de los reactivos químicos no debe de superar los 3,500 \$.

1.2 Antecedentes del proyecto Chem-E-Car en la Universidad de Cantabria.

El proyecto Chem-E-Car es un trabajo que lleva desarrollándose en el Departamento de Ingenierías Química y Biomolecular de la Universidad de Cantabria desde el año 2013. La primera parte del proyecto consistió en el estudio de las reacciones químicas. En el año 2015, el grupo de trabajo se decantó por una reacción a presión como reacción para impulsar el prototipo frente a las celdas de combustibles. Dentro de las reacciones a presión, Alberto Romero López [2] estudió la reacción entre el permanganato potásico (KMnO_4), el oxalato de sodio ($\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$) y el ácido sulfúrico (H_2SO_4), como reacción para impulsar el prototipo. Paralelamente, Guillermo Díaz Sainz estudió la reacción del reloj de yodo como reacción para detener el prototipo [3]. En cuanto a la reacción del reloj de yodo propuesta puede usarse como mecanismo de detención en el proyecto Chem-E-Car porque el período de tiempo necesario para cambiar el color de la solución basada en almidón es inferior a dos minutos que es el tiempo máximo permitido por las normas de la competición para cada ronda, de acuerdo con las reglas existentes. Por lo tanto, el

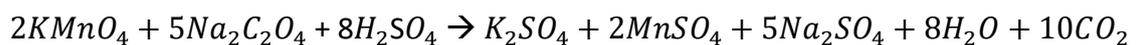
Mejora del mecanismo de detención de un coche impulsado por una reacción química

reloj de yodo se usa para detener la inyección de CO₂ en el motor neumático, por lo que se espera que el Chem-E-Car se detenga en una distancia específica.

Tras el estudio de las reacciones químicas se procedió a diseñar y construir el circuito de detención del prototipo. Primero, Carlos López Hernández [4] diseñó el circuito del reloj de yodo y un año más tarde, José Manuel Vadillo Abascal [5] y Carlos de la Peña Calzada [6], construyeron el primer prototipo Chem-E-Car de la Universidad de Cantabria. Este prototipo se llevó al Congreso Mundial de Ingeniería Química que tuvo lugar en Barcelona en octubre de 2017, alcanzando la sexta posición y recibiendo el premio al prototipo más seguro en la Competición Chem-E-Car [7].

1.2.1 Reacción de arranque del prototipo

Durante el curso académico 2013-2014 los miembros del capítulo de estudiantes AIChE de la Universidad de Cantabria estudiaron posibles reacciones para impulsar el prototipo. Entre otras alternativas, la reacción de carburo de calcio y agua para dar acetileno, la formación de nitrógeno molecular a partir de una amina primaria y ácido nitroso, y la reacción entre un ácido y un carbonato para producir CO₂, fueron descartados por no cumplir con las normas de seguridad de la competición o por el pequeño volumen de CO₂ producido en las reacciones. Esto provocó que la reacción elegida para impulsar el prototipo fuese entre el KMnO₄ y Na₂C₂O₄, para producir CO₂. Esta reacción fue estudiada en detalle por Alberto Romero López [2]. La reacción para impulsar el prototipo es la siguiente:



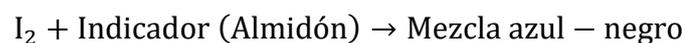
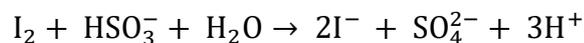
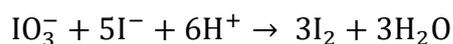
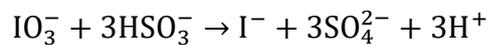
Algunas características de las reacciones son el calor de reacción, el cual tiene un valor de -1,514 kJ·mol⁻¹ [2]. Su alta energía de activación se debe a la repulsión entre dos iones cualquiera. En contraposición, debido a las altas temperaturas y al efecto autocatalítico del catión Mn⁺² se reduce la energía de activación. En estudios anteriores (Capítulo de Estudiantes de AIChE de la Universidad de Cantabria) [8] se ha estudiado que la reacción

Mejora del mecanismo de detención de un coche impulsado por una reacción química

debía de llevarse a cabo a una temperatura de 333 K. Para ello se estudiaron dos alternativas como son el uso de una chaqueta (intercambio de calor) o el calor de reacción que se produce en una solución de ácido sulfúrico.

1.2.2 Reacción del reloj de yodo como mecanismo de detención

La reacción del reloj de yodo fue seleccionada como el mejor mecanismo de detención del prototipo para la toma de medida de tiempos frente a otras como la del reloj de vitamina C [3]. También existen otras consideraciones como la seguridad y control en los que se produce dicha reacción. La reacción del reloj de yodo posee una característica fundamental y es que cambia de color (de incolora a azul intenso/negra), como se muestra en la figura 2. El cambio de color se produce debido que el yodato potásico (KIO_3) se consume completamente (reactivo limitante) ayudado por la acción del ácido sulfúrico (H_2SO_4) como catalizador de la reacción. La reacción puede ser descrita mediante el siguiente conjunto de reacciones:



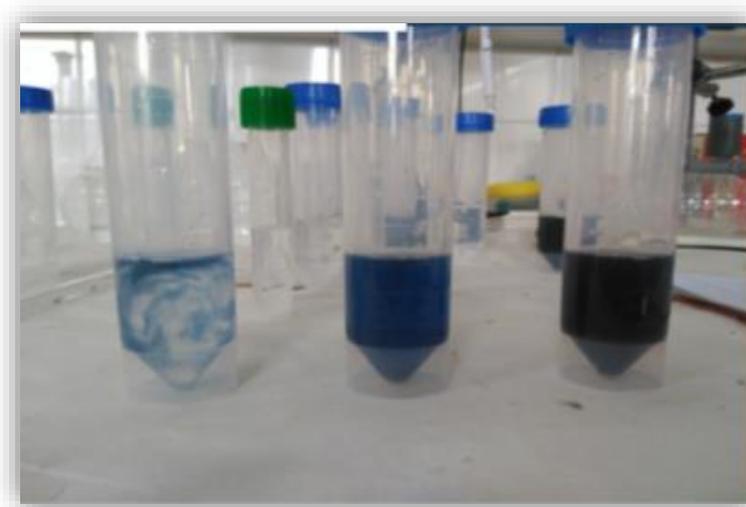


Figura 2. Cambio de viraje de la reacción del reloj de yodo.

En trabajos previos, concretamente el realizado por Guillermo Díaz Sainz [3] se obtuvo mediante un ajuste matemático la ecuación 1 que describe el tiempo que se necesita para el cambio de color (t) en unidades de segundo, en función de la temperatura (T) en grados Centígrados y la concentración molar del yodato potásico (C).

$$t(C, T) = 0.1014 * e^{\left(\frac{-8.204}{T}\right)} * C^{-1.105} \quad \text{Ecuación 1}$$

1.2.3 Análisis y mejora del mecanismo de frenado

El mecanismo propuesto por Carlos López Hernández [4] representa un punto de referencia para este trabajo. El sistema consta de los elementos descritos en la figura 2. La reacción del reloj de yodo tiene lugar en un tubo de tipo Falcon. El circuito realizado por Carlos López Hernández constaba de una batería de 12 V que suministraba la tensión necesaria para la electroválvula de corte de flujo de CO_2 del mecanismo de impulsión. Para relacionar la respuesta con el cambio de viraje de la disolución del reloj de yodo se empleaba un fotosensor de resistencia variable con la luz (Light Dependent Resistor, LDR). Este fotosensor debía permitir interpretar este cambio y su calibración se llevaba a cabo mediante la programación de una placa base Arduino. La placa se alimentaba

Mejora del mecanismo de detención de un coche impulsado por una reacción química

mediante un par de pilas alcalinas. Finalmente, en el circuito de reconocimiento se encontraba el relé que actuaba como potenciómetro del mismo.

- Implantación sistema de frenado

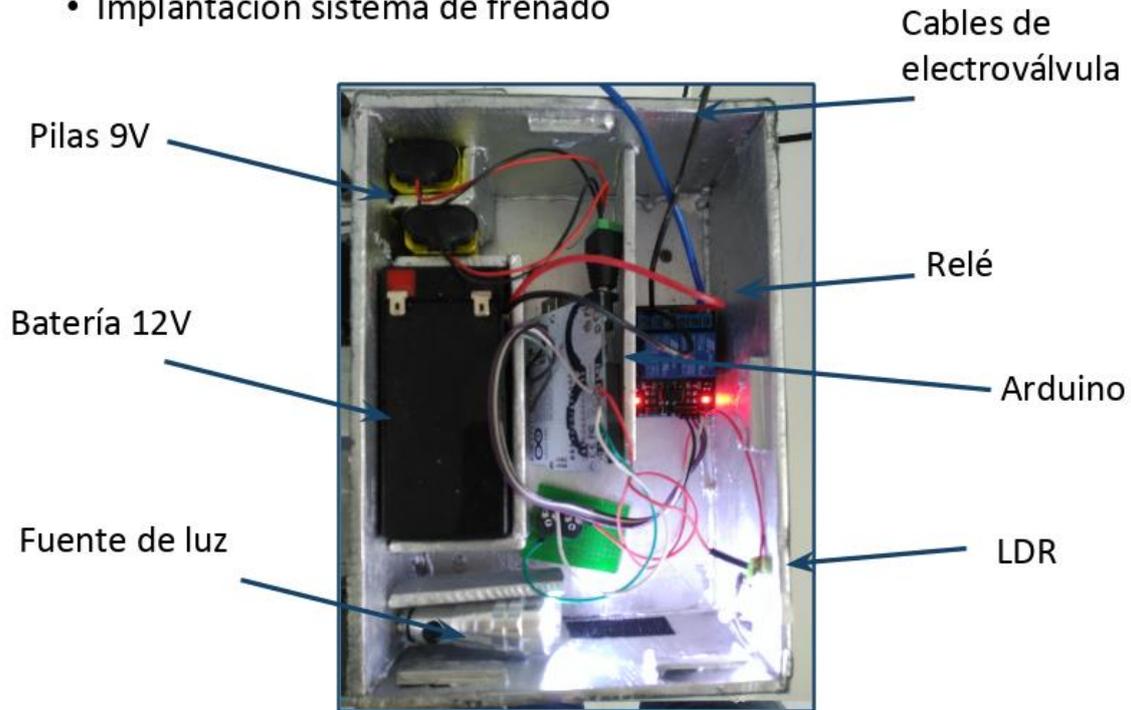


Figura 3. Sistema de frenado de Carlos López Hernández.

Este sistema implementado poseía algunas desventajas que afectaban significativamente a la calibración del prototipo anterior y a la robustez del prototipo.

Este cambio de color en la disolución del reloj de yodo, es detectado por el fotosensor que consigue mandar una señal eléctrica a la electroválvula, impidiendo el flujo de entrada del CO₂ a presión procedente de la reacción utilizada para impulsar el coche químico. El CO₂ generado en la reacción estudiada por Alberto Romero López [2] pasa a través de un circuito en el que existen dos elementos de gran relevancia. Por un lado, está el regulador de presión que permite pasar de 13 bar (generados en el cilindro de la reacción) a 2,5 bar. Esto se hace con el objetivo de llegar a la presión de trabajo necesaria para el pistón de impulso. El otro elemento que debe tenerse en cuenta es la electroválvula (de tipo normalmente abierta); esta pieza cortará el flujo cuando el mecanismo de detención mande la señal. Las concentraciones y cantidades de los

Mejora del mecanismo de detención de un coche impulsado por una reacción química

reactivos serán iguales en todas las pruebas, a excepción de la concentración de KIO_3 , la cual nos definirá la distancia a la cual el prototipo se parará.

El primer prototipo diseñado en su conjunto por José Manuel Vadillo Abascal y Carlos de la Peña Calzada trabajaba a presión mediante la reacción de Alberto Romero López. El CO_2 a presión generado en esta reacción pasaba a través de un circuito en el cuál se encontraba el regulador de presión y la electroválvula como se ha dicho anteriormente. El CO_2 llegaba al pistón, generando el movimiento necesario, y salía del mismo cuando este se comprimía. Por otra parte, el mecanismo de frenado actuaba mediante un sistema electrónico de reconocimiento del viraje (cambio de color) de la reacción del reloj de yodo. En este caso existía una linterna de pequeño tamaño, que permitía ajustar el nivel de luz en el interior de la caja del mecanismo. El haz de luz de la linterna atravesaba el tubo de tipo Falcon (donde tenía lugar la reacción) y del otro lado estaba el LDR que enviaba la señal a la electroválvula para que cerrase el flujo de CO_2 de la reacción de impulsión. El reloj de yodo debía de calibrarse con el fin de que la cinética se ajustase al tiempo necesario para que el coche recorriese la distancia impuesta el día de la competición.

Debido a que el sistema de detención del primer prototipo construido, el cual compitió en el 10º Congreso Mundial de Ingeniería Química de Barcelona (2017), mostró algunas carencias en el diseño del circuito del reloj de yodo. Por ejemplo, aspectos como la adición de KIO_3 sobre el resto de reactivos del reloj de yodo fue un hecho bastante relevante ya que se cometía un error apreciable en la calibración final del prototipo. Otro problema que acompañaba a este diseño fue la poca autonomía de la fuente de iluminación (linterna). Para ambas situaciones, se han analizado distintas alternativas, sustituyendo el sistema de mezclado y la fuente de iluminación iniciales. Finalmente se quiso simplificar cuantiosamente el circuito de reconocimiento del reloj de yodo. Con todas las mejoras citadas anteriormente, se ha llevado a cabo en primer lugar la reacción del reloj de yodo utilizada en el prototipo original de José Manuel Vadillo Abascal y Carlos de la Peña Calzada, y posteriormente variando las cantidades de algunos de los reactivos.

1.3 Objetivos

Siguiendo los Trabajos Fin de Grado previos realizados en el Departamento de Ingenierías Química y Biomolecular de la Universidad de Cantabria en el marco de las competiciones basadas en el evento *Chem-E-Car® Competition*, y teniendo como referencia en particular los realizados por Carlos López Hernández [4] y por Carlos de la Peña Calzada [3], el objetivo de este Trabajo Fin de Grado es diseñar, construir, y chequear el comportamiento de un mecanismo de detención basado en la reacción del reloj de yodo para detener un prototipo de coche químico. Para cumplir este objetivo general, se proponen los siguientes objetivos específicos:

- Mejorar el sistema de mezclado de los reactivos que intervienen en la reacción del reloj de yodo, con el objetivo de eliminar el error asociado al factor humano en el momento del mezclado de los distintos reactivos, y ser más precisos en el tiempo de reacción del reloj de yodo.
- Sustitución del sistema de iluminación del circuito del reloj de yodo, debido a la pérdida de robustez del sistema en el momento en que la fuente luminosa pierde intensidad luminosa. Por ello, se propone sustituir la linterna como fuente luminosa por fuentes de luz LEDs.
- Sujeción de los distintos componentes del circuito del reloj de yodo con el objetivo de mejorar la robustez del circuito del reloj de yodo.
- Estudio de las variables de la reacción del reloj de yodo, como son la concentración de los reactivos que intervienen en la misma para un calibrado mejorado

2. Metodología.

2.1 Mejora del sistema de mezclado del reloj de yodo

En el anterior prototipo, uno de los principales problemas fue la forma de añadir el yodato potásico sobre el resto reactivos, el cual se añadía mediante una jeringa. Mediante la jeringa se cometía un error considerable ya que la adición del KIO_3 era un proceso largo y sensible a un error humano (presión y tiempo). También se perdía parte del KIO_3 debido a que éste se introducía a presión (a pesar del sellado). Como consecuencia, se producía un error que afectaba a la reacción del reloj de yodo, produciéndose una cinética diferente a la diseñada originalmente en su calibración.

Con el fin de mejorar esta situación se optó por un sistema más automático, es decir con menos intervención humana a través de una electroválvula. Este sistema poseía la ventaja de hacer el nuevo prototipo del Chem-E-Car más robusto frente a posibles errores humanos. Sin embargo, se probó preliminarmente esta electroválvula sin que se obtuvieran las mejoras de resultados esperadas, ya que ésta no permitía un correcto paso del flujo de KIO_3 por acción gravitatoria. Se llegó a la conclusión de que esto se debía a que la electroválvula trabajaba con presión de entrada y nuestra disolución bajaba por acción gravitatoria. A continuación, en la Figura 4 se puede ver un ejemplo del accionamiento mediante solenoide de la electroválvula.

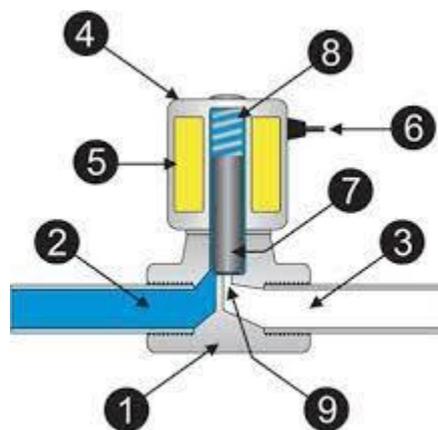


Figura 4. Funcionamiento de una electroválvula mediante solenoide.

Mejora del mecanismo de detención de un coche impulsado por una reacción química

Tras ver que la electroválvula no era un mecanismo factible para la adición del KIO_3 se pensó en su sustitución por una válvula de bola de accionamiento manual (Figura 5). Ésta poseía la ventaja de que permitía que el flujo pasase de forma inmediata por la acción gravitatoria.



Figura 5. Válvula de bola empleada para la mezcla de reactivos.

Mediante ensayos (utilizando agua como referencia) se pudo comprobar visualmente que la mezcla se producía adecuadamente en todo el volumen del tubo. La caída por la acción gravitatoria favorecía la mezcla completa del fluido, y por tanto la cinética del reloj de yodo.

La primera opción de la electroválvula representó una forma de hacer el proceso más automático, pero finalmente no se pudo llevar a cabo. No obstante, se espera que represente una inspiración para futuras mejoras de otros prototipos.

2.2 Mejora en el sistema de control y detención del reloj de yodo

Con el fin de adecuarse a las exigencias de precisión y economía requeridas, se han buscado diferentes alternativas para la detección del cambio de color en la reacción del reloj de yodo.

El sensor de haz de paso consiste en un receptor ubicado dentro de la línea de visión del transmisor. Por otro lado, los fotosensores reflectantes colocan el transmisor y el receptor en la misma ubicación y utilizan un reflector para hacer rebotar el haz de luz desde el transmisor al receptor. Además, otro tipo de detectores de color se basa en el almacenamiento de un color y la comparación de los medios reales con este color de almacenamiento. Con respecto a las ventajas generales de cada tipo de estos dispositivos, se debe explicar que el fotosensor de haz de canal es el que tiene el rango de detección más largo y el más versátil desde un punto de vista estructural [9]. Por el contrario, el fotosensor reflexivo tiene la ventaja de estar compuesto por una pieza [10]. Finalmente, un sistema de detección de color parece ser el más eficaz para el objetivo de este Trabajo Fin de Grado debido a su precisión y velocidad de reacción [11].

2.2.1 El circuito basado en LDR

Con el fin de evitar las complicaciones que presentan los fotosensores, como el precio o adecuación, se exploró la idea de utilizar una resistencia eléctrica variable para reconocer el cambio de color producido en la reacción del reloj de yodo debido al hecho de que el color de la solución de yodo cambiará de incoloro, lo que permite que la luz pase, al azul intenso donde no lo hace. La idea de usar un componente eléctrico de resistencia variable que cambia con la cantidad de luz incidente sería la entonces propuesta.

Una resistencia dependiente de la luz (LDR) funciona como un sensor cuya resistencia disminuye cuando la luz incide en ella. Este efecto es el resultado directo del uso de

Mejora del mecanismo de detención de un coche impulsado por una reacción química

materiales semiconductores como el sulfuro de cadmio, el sulfuro de plomo, el germanio, el silicio y el arseniuro de galio. La base de trabajo de este dispositivo es la energía dada al electrón enlazado en el semiconductor cuando absorbe fotones de una fuente externa. Una vez que los electrones unidos tienen suficiente energía, saltan a la banda de conducción. Así, la resistencia eléctrica disminuye [12].

De esta forma, cuando el coche está en movimiento y la disolución es incolora, la luz pasa a través de ésta (tubo Falcon) haciendo que la resistencia sea mínima y provocando así que el sistema de frenado no se active. Cuando tiene lugar el cambio de color (azul oscuro) debido a la reacción y la formación del complejo yodo-almidón, la incidencia de luz sobre el fotosensor baja, y por tanto la resistencia aumenta considerablemente, activando el sistema de detención. Un ejemplo de este comportamiento del LDR se muestra en la figura 6.

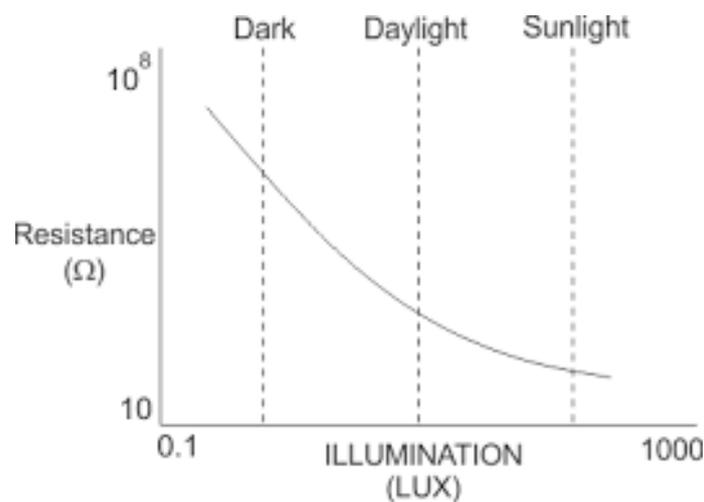


Figura 6. Curva característica del LDR [12].

Una vez que se seleccionó el LDR como el dispositivo óptimo para el reconocimiento del cambio de color debido a su bajo precio, gran disponibilidad, pequeño tamaño y escaso tiempo de respuesta, todos los esfuerzos se centraron en construir un circuito electrónico que pudiera relacionar este cambio en el valor de resistencia LDR con la activación de una electroválvula comercial.

En cuanto a los componentes del sistema electrónico se pudo hacer una simplificación de dos componentes clave como son el relé y el fotosensor.

2.2.2 Análisis de posibles mejoras al circuito electrónico

Tras ver el circuito implementado del anterior prototipo se consideró la posibilidad de realizar el mismo entramado. Éste constaba de un relé y una placa base Arduino que permitían interpretar la falta de luz en el fotosensor. Como consecuencia se enviaba la señal a la electroválvula con el fin de que se cerrase y así impedir que el flujo de CO₂ (procedente de la reacción entre el KMnO₄ y el Na₂C₂O₄) llegase al émbolo, imposibilitando así el movimiento del coche. Se eligió un sistema integrado, que incluía relé, sistema de control y fotosensor (figura 7), debido a que el sistema resultaba bastante compacto y poco voluminoso, y su precio resultaba bastante atractivo. Poseía la gran ventaja de su tamaño y la simplicidad de conexiones para formar el circuito. En cuanto al ajuste del sistema de control (para ver cuanta era la intensidad de luz necesaria para que se enviase la respuesta a la electroválvula) no era necesaria, ya que el sistema de control se calibraba mediante una toma de tierra, simplificando enormemente el procedimiento calibrado de la respuesta.



Figura 7. Sistema integrado de relé, arduino y fotosensor.

En cuanto a la carga del sistema, la placa de Arduino original se cargaba a través de un par de pilas alcalinas. En este nuevo sistema, se necesitaba una carga de 5 V, por lo que se decidió añadir un transformador (con el objetivo de reducir la tensión de 12 V a 5 V). Entre las distintas opciones, se eligió la de un adaptador de un mechero con conexión USB para coche. Tras las adquisiciones de los componentes, se instó a quitarle la carcasa

Mejora del mecanismo de detención de un coche impulsado por una reacción química

y se pudo apreciar las diferentes partes que lo conforman, como se puede ver en la siguiente figura 8:

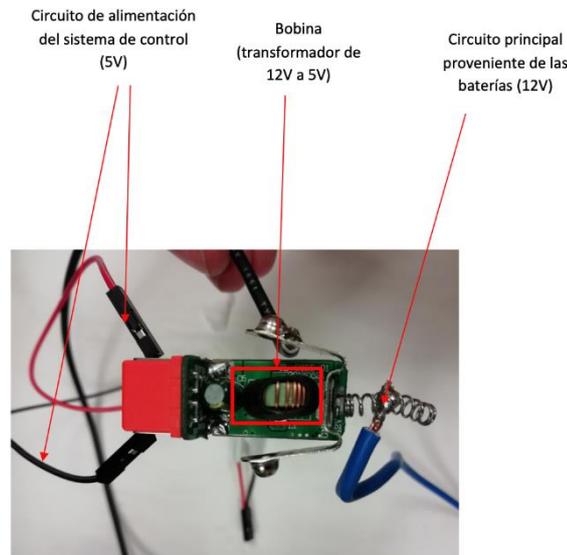


Figura 8. Sistema interno del transformador eléctrico.

Se ve claramente en la foto el bobinado que se necesita. También se pueden apreciar el cable que proviene de las baterías (el cable más grueso) y los que salen hacia la placa de Arduino (los cables de menor grosor). Tal como aparece en la figura 9, se muestra dónde deben ir los cables de sustentación de la placa.

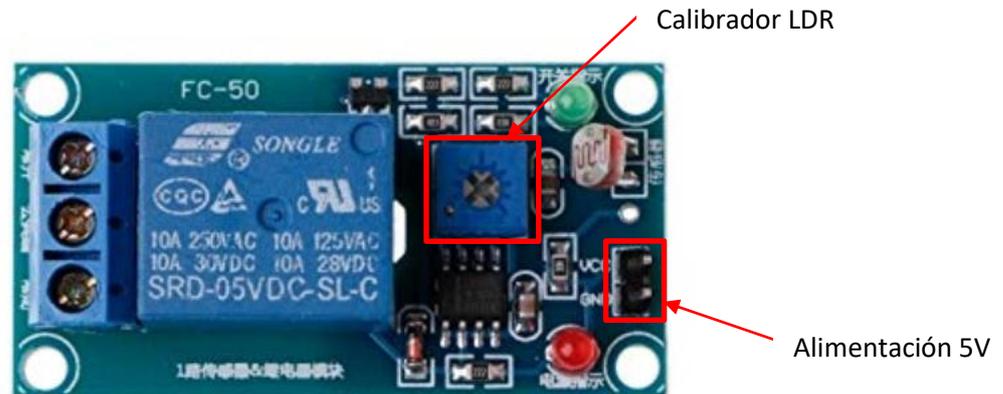


Figura 9. Localización de la fuente de alimentación del sistema de control y del calibrador del LDR.

También existe un sistema de calibrado de la respuesta del LDR que funciona mediante una toma de tierra. Esto significa que se puede ajustar el tornillo para variar manualmente la respuesta en función de la intensidad lumínica que incide en el LDR.

Mejora del mecanismo de detención de un coche impulsado por una reacción química

A continuación, se mostrará en la Figura 10 un esquema gráfico del funcionamiento del circuito implementado en el mecanismo de detención.

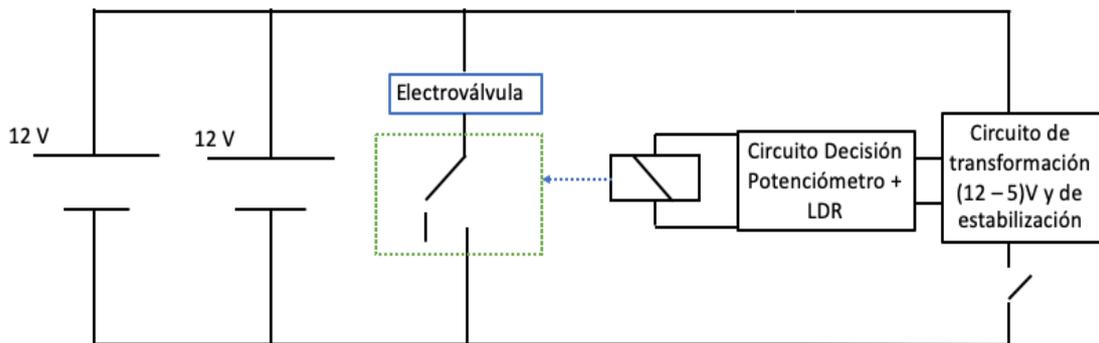


Figura 10. Representación del circuito de control de la válvula.

2.3 Mejora del sistema de iluminación artificial

Otra de las posibles mejoras pasaba por mejorar el sistema de iluminación. Se sabe que en el anterior prototipo Chem-E-Car, la fuente de luz era una linterna de pequeño tamaño que funcionaba con pilas alcalinas.

Uno de los grandes problemas de la linterna era su consumo y consecuencia de ello su tiempo de duración. Debido principalmente a este factor se decidió cambiar a un sistema de iluminación formado por un LED. Las principales ventajas de este sistema es que es bastante fiable, eficiente y barato en comparación con la linterna. La elaboración del circuito eléctrico representaba la tarea más laboriosa; se puede ver de forma esquemática en la figura 11. Para la elección del LED más recomendable, se optó un LED de luz amarilla, para el voltaje de la pila alcalina de 9 V. Esta primera versión mostró una escasa intensidad luminosa, eligiendo finalmente un LED de luz blanca más potente que el anterior. El único problema fue que este solo trabajaba para tensiones más bajas por lo que se tuvo que poner una resistencia en serie. Para la realización del circuito de iluminación se debe de tener en cuenta la polaridad del LED ya que este puede sufrir daños, esto se puede ver claramente en la figura 12.

Mejora del mecanismo de detención de un coche impulsado por una reacción química

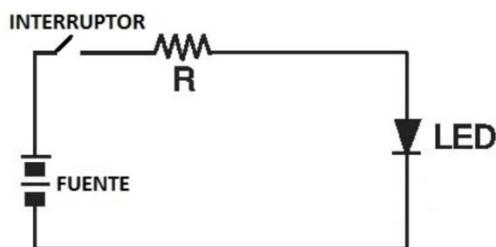


Figura 11. Representación del circuito de iluminación.

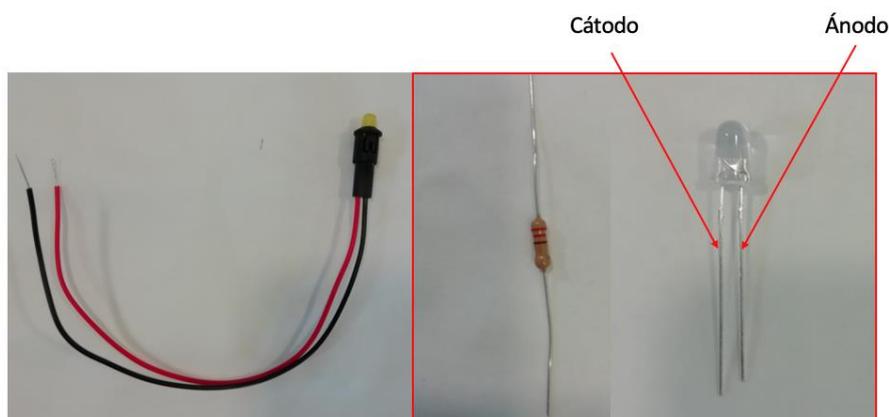


Figura 12. LED de luz amarilla, y LED de luz blanca con su resistencia en serie para la formación del circuito.

2.4 Estudio de variables de la reacción de yodo

El primer ensayo se llevó a cabo con las pautas seguidas en el sistema de detención del primer coche. Se añadían en un tubo Falcon 1 ml de ácido sulfúrico (0,05 M), 1,5 ml de sulfito de sodio (0,01 M) y 6 ml de Almidón ($2 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$). En el otro tubo de tipo Falcon se utilizó inicialmente 40 mL de la disolución de KIO_3 (0,02M). Los experimentos se repitieron por duplicado, modificando la cantidad de KIO_3 , hasta 23 mL de KIO_3 y 17 mL de H_2O con la disolución de 40 ml de KIO_3 (0,02 M).

Se observó que para disoluciones más diluidas (23 mL de KIO_3 y 17 mL de H_2O) no se producía el cambio de color característico de la reacción del reloj de yodo. Finalmente, con la nueva válvula de bola (descrito en el apartado 2.1) se llevaron a cabo nuevos

Mejora del mecanismo de detención de un coche impulsado por una reacción química

experimentos del reloj de yodo como se puede ver en la figura 13. Se estudiaron distintos tiempos en el cambio de color de la disolución para distintas concentraciones de KIO_3 . Las concentraciones del resto de reactivos que intervinieron en la reacción del reloj de yodo, fueron las mismas que las estudiadas por Carlos de la Peña Calzada en 2017 [6]. Cada prueba se hizo por duplicado, obteniendo el tiempo medio y la desviación estándar obtenida.

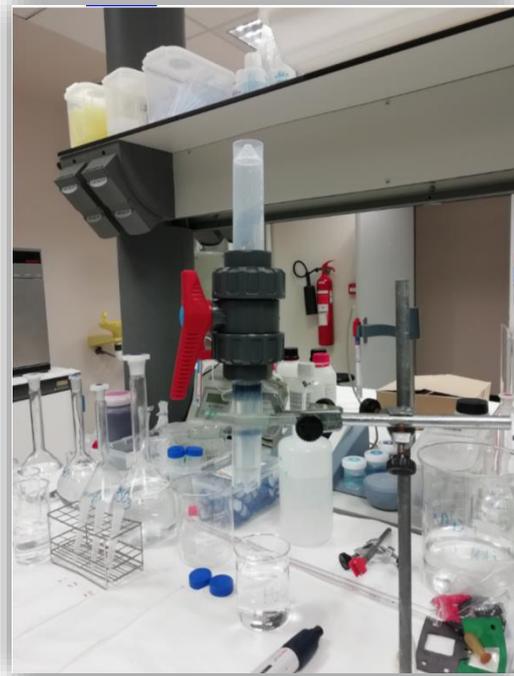


Figura 13. Montaje experimental del reloj de yodo mediante la válvula de bola.

Con los resultados obtenidos, se representó gráficamente el tiempo promedio frente a la concentración de KIO_3 . Claramente se observó que al aumentar la concentración de KIO_3 , el cambio de color de la disolución tenía lugar en un tiempo más corto. Tras graficar los puntos correspondientes se procedió a ajustar curva a una de tipo potencial. Conjuntamente a las rectas de calibrado de distancia y tiempo se obtenía que, para una velocidad media fijada del coche y una distancia fijada para el día de la competición, se puede deducir la concentración de yodato potásico. Para esa concentración el prototipo frenaría a la distancia fijada.

Mejora del mecanismo de detención de un coche impulsado por una reacción química

El primer estudio que se realizó fue con las cantidades del primer prototipo [6]: 1 mL de H_2SO_4 (0,05M), 1,5 mL de NaHSO_3 (0,01 M), 6 mL de almidón ($2 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$), y variando la concentración de la disolución de KIO_3 como se ha dicho anteriormente. Este estudio obtuvo valores de tiempos de reacción o de cambio de color muy bajos (tiempos máximos de 78 segundos), por lo que no podía ajustarse bien para la velocidad observada del coche, que en un principio se supuso (entre $0,25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ y $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$). Además, existía otro problema y es que el cambio de viraje de la reacción no se producía para concentraciones de KIO_3 muy diluidas (por debajo de 23 mL de KIO_3 en los 40 mL de disolución). Debido a este problema, se tuvo que buscar una solución con el fin de obtener valores de tiempos de reacción más altos. En el TFG de Guillermo Díaz Sainz [6] se pudo chequear que el H_2SO_4 actuaba como catalizador de la reacción por lo que se tuvo que tenerse en cuenta esta nueva variable. En un principio se decidió descender a la mitad la cantidad de H_2SO_4 añadida en la reacción, de 1 mL a 0,5 mL, manteniendo iguales las cantidades de los otros reactivos. Con esta nueva cantidad de H_2SO_4 , los tiempos de cambio de color de la disolución se incrementaron, consiguiendo el objetivo de cubrir todos los rangos de tiempo necesarios para que el prototipo se detuviera con la velocidad propuesta de $0,25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. A continuación se muestra en la Tabla 1, el resumen de los experimentos llevados a cabo en el reloj de yodo. Las dos principales variables que se variaron fueron las cantidades de KIO_3 y H_2SO_4 . Todo ello se hizo con el fin de adecuarse a la franja de tiempos deseable para el nuevo prototipo.

Tabla 1. Tabla resumen del procedimiento experimental seguido.

1 mL H_2SO_4		0,5 mL H_2SO_4		0,75 mL H_2SO_4	
Volumen KIO_3 (mL)	Volumen H_2O (mL)	Volumen KIO_3 (mL)	Volumen H_2O (mL)	Volumen KIO_3 (mL)	Volumen H_2O (mL)
40	0	40	0	40	0
36	4	35	5	37	3
35	5	30	10	35	5
34	6	25	15	32	8
32	8	23	17	30	10
30	10			28	12
28	12			25	15
27	13			24	16
26	14			23	17
25	15			22	18
24	16				
23	17				

3. Resultados

3.1 Nuevo circuito del reloj de yodo

Como se muestra en la figura 14, el nuevo circuito se montó con dos baterías (de 12 V cada una) en paralelo que generaban 12 V de suministro a la electroválvula de cierre de flujo de CO₂ de la reacción de impulsión, y al transformador para alimentar al sistema de control. El transformador es una bobina que consigue rebajar la tensión de 12 V a 5 V (tensión a la que trabaja el sistema de control de reconocimiento). Con el fin de ser más eficientes se puso un interruptor para activar y desactivar el sistema de control.

En cuanto al circuito del sistema de luz se puede ver que está formado por la luz LED blanca. La pata corta del LED (ánodo) está conectada al cable negro (negativo) y la pata larga (cátodo) está conectada al cable rojo (positivo). En serie se han dispuesto la resistencia necesaria para no superar la tensión máxima admitida por el LED y un interruptor para usarlo cuando sea necesario.

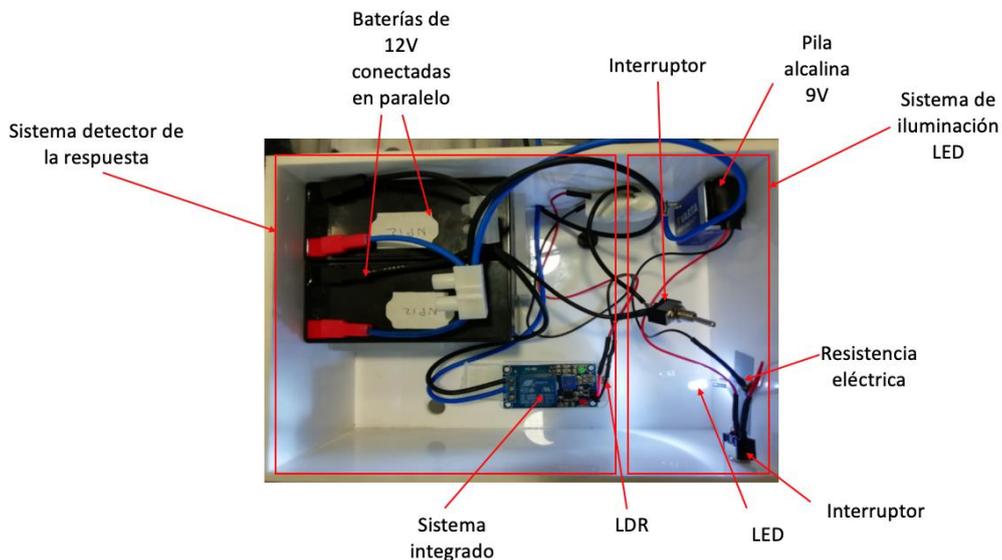


Figura 14. Sistemas de reconocimiento e iluminación implementados en el mecanismo.

A continuación, en la figura 15 se puede ver como se acopló la válvula de bola utilizada para mezclar los reactivos del reloj de yodo al circuito y al prototipo impulsado por una reacción química.



Figura 15. Nuevo prototipo con la válvula de bola implementada.

3.2 Cinética del reloj de yodo empleando las cantidades de referencia del primer prototipo

La cinética del reloj de yodo empleando las cantidades del prototipo construido por José Manuel Vadillo Abascal y Carlos de la Peña Calzada (se emplearon 1 mL de H_2SO_4 (0,05 M), 1,5 mL de NaHSO_3 (0,01M), 6 mL de una disolución de almidón ($1 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$), y una disolución de KIO_3 0,02M) se muestra en la figura 16.

Mejora del mecanismo de detención de un coche impulsado por una reacción química

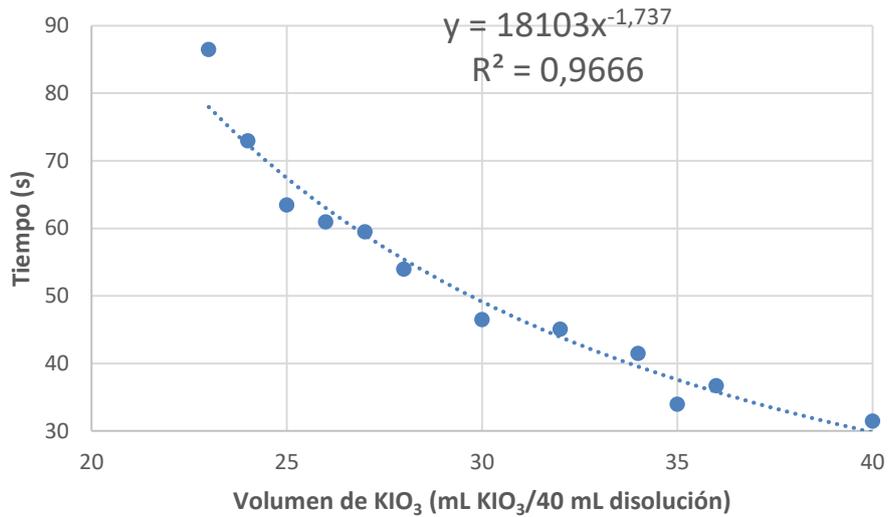


Figura 16. Representación del tiempo frente a volumen de KIO₃.

El tiempo necesario para el cambio de color presenta un adecuado ajuste de forma potencial. Se puede ver que para la concentración más diluida de KIO₃ el valor de tiempo estimado se aleja bastante del valor experimental cometiendo mayor error. Por esa razón, ese punto no pertenece al ajuste realizado. Este experimento fue llevado a cabo para ver qué rango de tiempos eran los oportunos. También se pudo apreciar cualitativamente para qué valores de cantidad de KIO₃ (valores más diluidos) se producía un cambio de color significativo para que el fotodetector LDR pudiese interpretar dicha respuesta. Como conclusión de esta primera prueba, se pudo ver que para una velocidad lineal del prototipo de $0,25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ y una distancia dada, esta curva no cubría los tiempos necesarios para detener el prototipo en esa distancia dada. Por ello se propuso hacer un análisis de la cantidad de H₂SO₄ en la reacción para observar la influencia del catalizador. En la tabla 3 de Anexos, se pueden ver todos los tiempos de reacción obtenidos para las diferentes cantidades de KIO₃ y H₂O respectivamente, al igual que los tiempos de reacción obtenidos en el apartado 3.3 y 3.4.

3.3 Cinética del reloj de yodo empleando una proporción diferente de H_2SO_4

Este nuevo estudio surgió de la necesidad de cubrir tiempos mayores debido a que el mecanismo de impulsión iba a bajar su velocidad considerablemente ($0,25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ – $0,30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$). Entonces debido a esto y a que el anterior estudio no podía cubrir tiempos mayores sin que hubiese cambio en el color de la disolución, se decidió cambiar las cantidades respectivas de los reactivos. Es conocido que la reacción del reloj de yodo era muy sensible con las concentraciones de KIO_3 , pero no se producía un cambio de color deseado en tiempos mayores. Por lo tanto, se pensó en el fundamento de esta reacción. Se sabía que el H_2SO_4 funcionaba como catalizador de la reacción, pues era obvio que disminuyendo su cantidad se conseguiría aumentar el tiempo. Así que, tras proponer esta modificación, se decidió mantener la cantidad de todos los reactivos del primer estudio y solo se cambió la cantidad de H_2SO_4 (de 1 mL a 0,5 mL) como se puede ver en la figura 17.

Este estudio se inició con las cantidades de KIO_3 máxima y mínima para saber si el rango de tiempos era el correcto. Los resultados obtenidos fueron aceptables ya que se consiguieron aumentar los tiempos para el cambio de color. También se sacaron algunas conclusiones para llevar a cabo el tercer y último experimento, y es que se necesitaba un rango de tiempos en la franja de valores de 40 s a 100 s.

Mejora del mecanismo de detención de un coche impulsado por una reacción química

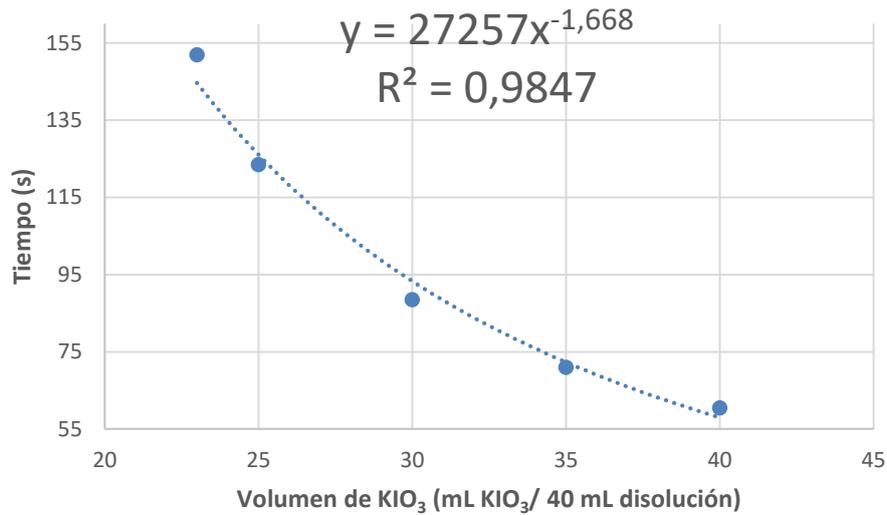


Figura 17. Representación del tiempo frente a volumen de KIO₃.

Tras ver que la segunda prueba permitía obtener un cambio de color de la disolución en tiempos más largos, se modificó nuevamente cantidad de H₂SO₄ (se aumentó a 0,75 mL). Se mantuvo la misma cantidad de los otros reactivos. Con esta cantidad de H₂SO₄ se pudo barrer el amplio rango de tiempos para las velocidades supuestas por el mecanismo de impulsión.

Para este estudio se aumentó el número de puntos a muestrear con el objetivo de ajustarse bien al comportamiento del sistema real. En cuanto a los tiempos se puede observar que se cubre bastante bien los tiempos largos (superiores a 75 s), pasando ampliamente la barrera de los 100 s. En cuanto a los tiempos cortos (por debajo de 75 s) se puede observar en la figura 18 que el ajuste también es adecuado.

Mejora del mecanismo de detención de un coche impulsado por una reacción química

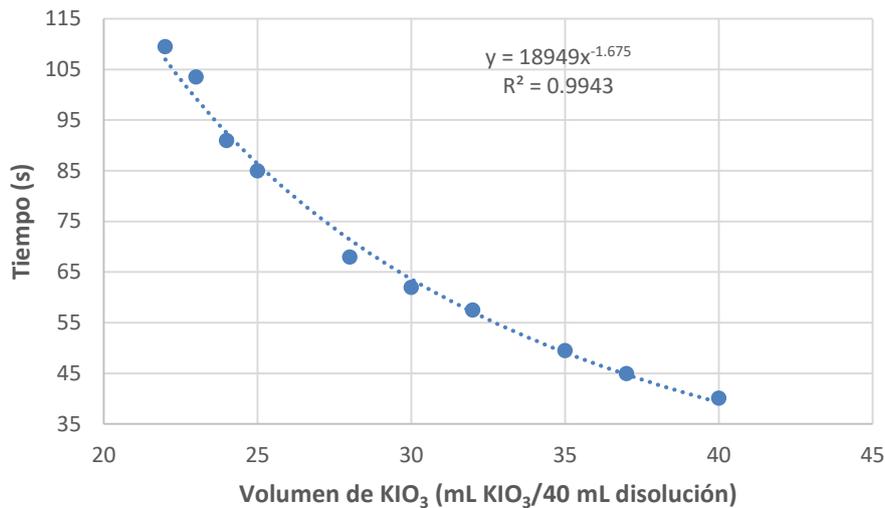


Figura 18. Representación del tiempo frente a volumen de KIO₃.

Tras ver el ajuste de la curva ($R^2 \sim 1$) se pudo concluir las pruebas experimentales con buenas expectativas. Se observó que esta curva permitía cubrir todos los tiempos necesarios para las velocidades supuestas del prototipo de $0,25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

3.4 Calibración de tiempos del nuevo prototipo Chem-E-Car

Con las curvas de calibración ya realizadas se tuvo que tener en cuenta la velocidad del mecanismo de impulsión. En unos cálculos realizados, se pudo definir una franja de velocidades medias relativas a este nuevo mecanismo entre $0,25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ y $0,30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Por esta razón se decidió emplear la curva de calibración del segundo estudio, es decir para $0,5 \text{ mL}$ de H_2SO_4 , mostrada en la ecuación 2:

$$t = 27257 * C^{-1,668} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde t es el valor del tiempo obtenido en la calibración de velocidad del prototipo, y C es el volumen de KIO₃ que se debe añadir en los 40 mL de la disolución. De forma precisa, el valor de la cantidad de KIO₃ necesario para alcanzar el tiempo requerido, debería calcularse a partir de dividir la distancia (que no se conoce hasta el mismo día de la competición), entre la velocidad media del prototipo testado ($0,25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$). Con ello se

Mejora del mecanismo de detención de un coche impulsado por una reacción química

puede acudir a la ecuación 2 despejando el valor de C (mL KIO_3 /40 mL de disolución). A continuación, se muestra la figura 19 de velocidades:

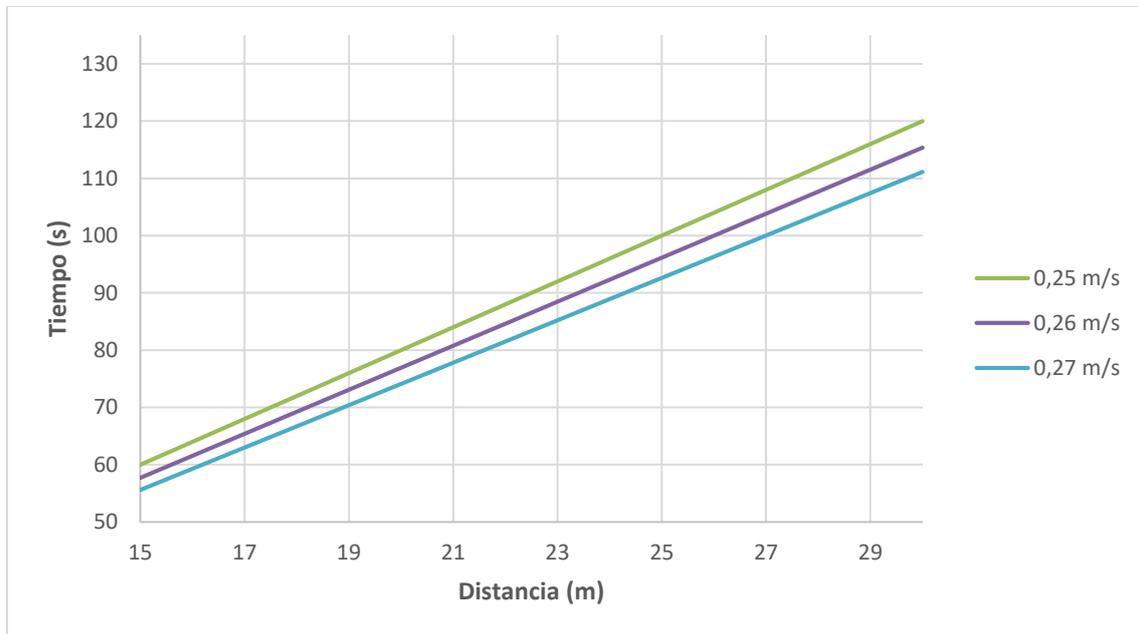


Figura 19. Representación del tiempo frente a la distancia recorrida por el coche.

En el eje horizontal se muestra la distancia a recorrer por el prototipo (impuesto por la competición del Chem-E-Car el mismo día de la competición) y en el eje vertical se tiene el tiempo que emplea el coche en recorrer esa distancia para una velocidad fijada. Por tanto, con la distancia impuesta y la velocidad del prototipo (variables de entrada) se obtiene un tiempo (variable de salida). Este tiempo será el que se obtenga en el reloj de yodo. Para hacer esta simplificación se pudo ver que el tiempo de respuesta de la fotocélula era muy rápido, por lo que se pudo despreciar, extrapoliándose íntegramente al tiempo de reacción del reloj de yodo.

Mejora del mecanismo de detención de un coche impulsado por una reacción química

De manera gráfica se ha representado en la figura 20 con el objetivo de facilitar la comprensión del procedimiento del cálculo.

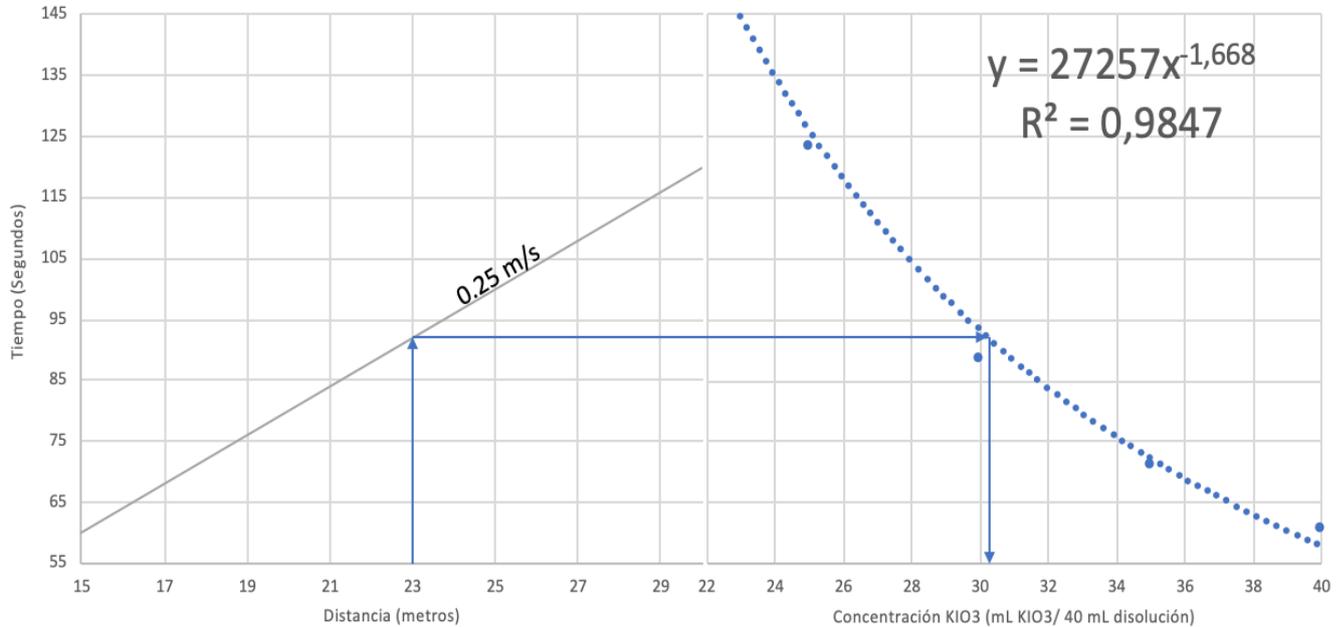


Figura 20. Calibración final del coche (método gráfico).

3.4.1 Análisis de sensibilidad

Finalmente, con el objetivo de facilitar los cálculos en el momento de la competición se ha supuesto una distancia, y con un rango de velocidades ya fijado a priori se calculan todos los tiempos necesarios para obtener mediante la ecuación de la curva de calibración todas las concentraciones de KIO_3 . Este procedimiento representa una forma de hacer un análisis de sensibilidad del actual prototipo del coche químico.

Este estudio surgió debido a qué en el mecanismo de impulsión del nuevo prototipo, la velocidad lineal del mismo puede variar entre $0,25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ y $0,35 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Se intentó dotar al mecanismo de detención de cierta flexibilidad ante la variabilidad de velocidades del prototipo. El procedimiento sería tal que una vez conocido la velocidad del coche (testado en una calibración final) para una distancia dada, se obtendrá la cantidad de KIO_3 necesaria para que el prototipo se detenga en la distancia dada. Mediante las

Mejora del mecanismo de detención de un coche impulsado por una reacción química

ecuaciones de las rectas (tablas 4-6 del Anexo 1) para todas las distancias, puede obtenerse la cantidad de KIO_3 conociendo únicamente la velocidad en la ecuación. De forma similar se puede ver gráficamente en la figura 21.

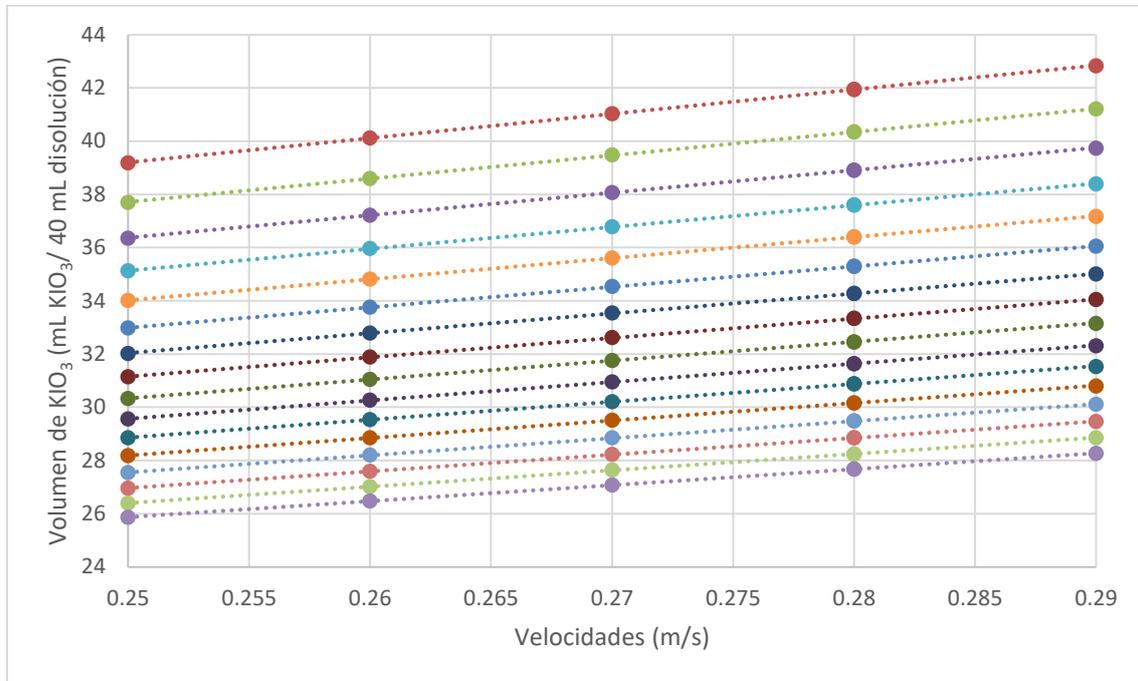


Figura 21. Volumen de KIO_3 frente a las velocidades medias del nuevo prototipo Chem-E-Car.

Este estudio permitirá en caso de velocidades fuera del rango estudiado, adaptarse a las exigencias de los nuevos tiempos de detención. Mediante del estudio de la calibración del mecanismo de detención se consigue un procedimiento robusto y eficaz.

3.5 Presupuesto del mecanismo de detención

Por último, con el objetivo de ajustarse al presupuesto de la competición [1], se ha hecho un listado de todos los componentes, sus cantidades y sus precios individuales.

Tabla 2. Tabla de precios descompuestos.

<u>Materiales</u>	<u>Cantidades (uds.)</u>	<u>Precio unitario (€)</u>
Cableado	(-)	10
Interruptores	x2	6,9
LED blanco	x1	0,4
Resistencia eléctrica	x1	0,05
Transformador eléctrico	x1	5,65
Placa de detección con LDR	x1	3,55
Carcasa con tapa (metacrilato blanco opaco)	x1	11,03
Válvula de bola	x1	17
Electroválvula	x1	35
Reactivos	(-)	104,84
<u>TOTAL SIN REACTIVOS (€)</u>		89,56
<u>TOTAL CON REACTIVOS (€)</u>		194,4

En este listado sólo se tiene en cuenta lo que cuesta los componentes que forman parte del mecanismo de detención y los reactivos empleados durante las pruebas realizadas. Se debe decir que los reactivos que fueron necesarios para realizar las disoluciones eran bastante despreciables respecto a las cantidades totales de los envases suministrados. En cuanto a costes cabe destacar que este mecanismo de frenado baja considerablemente su valor en comparación con el diseño de Carlos López Hernández en más del 50%. Esto se debe básicamente al coste de la electroválvula elegida en el nuevo mecanismo de detención. Es importante destacar, que el límite máximo de coste del Chem-E-Car es de 3,500 \$ [1].

4. Conclusiones

Como conclusiones de este Trabajo Fin de Grado es posible destacar las siguientes, en especial en comparación con la referencia de trabajos previos similares:

- Mezclado exacto de los reactivos químicos de forma instantánea mediante la válvula de bola. El accionamiento de la válvula permite que los reactivos químicos del reloj de yodo se mezclen de manera instantánea, rebajando de forma considerable el error en la calibración.
- Autonomía de la linterna. En este trabajo se optó por un sistema con un LED que demostró una gran eficiencia energética en su uso. Este sistema demostró presentar mejores prestaciones que la linterna utilizada en el primer prototipo de coche químico construido en la Universidad de Cantabria.
- Se simplificó el circuito electrónico de reconocimiento. Se optó por otra disposición en el diseño y ensamblado del circuito y se integraron diferentes componentes con la finalidad de facilitar el citado ensamblaje del sistema. Todo ello lleva a la obtención de un mecanismo mucho más robusto ante posibles errores humanos.
- También cabe destacar que este nuevo mecanismo de detención rebajó su presupuesto bajando más de la mitad del precio del mecanismo implementado por Carlos López Hernández [2] (sin tener en cuenta los reactivos).

Por último, citar que este prototipo participó en el Congreso de Estudiantes (3rd ANQUE-ICCE-CIBIQ-2019) [13] que se celebró en Santander entre el 17 y el 21 de junio (figura 22). Se participó en una demostración con estudiantes de la Universidad Rovira i Virgili, resultando un éxito. El coche químico demostró total fiabilidad en su parada (parando de forma exitosa en los dos intentos), minimizando totalmente el error humano asociado a la etapa de mezclado de los reactivos del reloj de yodo y mostrando el sistema de iluminación y el circuito del reloj de yodo una eficacia en el proceso de parado del prototipo basado en una reacción química.

Mejora del mecanismo de detención de un coche impulsado por una reacción química



Figura 22. Preparación de las disoluciones de la reacción de impulsión del prototipo.

5. Referencias

[1] American Institute of Chemical Engineers. *AIChE Chem-E-Car Competition™* [Consultado: 21 de abril de 2019] Disponible en: https://www.aiche.org/sites/default/files/media/document/chem-e-car_official_rules_2019_final.pdf

[2] Romero López, Alberto, *Design of a Chem-E-Car prototype based on a chemical reaction*, Trabajo Fin de Grado, 2015.

[3] Díaz Sainz, Guillermo, *Chem-E-Car: Iodine clock reaction*, Trabajo Fin de Grado, 2015.

[4] López Hernández Carlos, *Chem-E-Car: Braking mechanism* Trabajo Fin de Grado, 2016.

[5] Vadillo Abascal José Manuel, *Design, building and testing of a Chem-E-Car prototype based on a chemical reaction* Trabajo Fin de Grado, 2017.

[6] De la Peña Calzada, Carlos, *Chem-E-Car: Braking mechanism*, Trabajo Fin de Grado, 2017.

[7] X Congreso Mundial de Ingeniería Química celebrado en octubre de 2017 en Barcelona. Disponible en: <https://www.industriaquimica.es/eventos/10-congreso-mundial-ingenieria-quimica>

[8] Capítulo de Estudiantes de AIChE de la Universidad de Cantabria. Disponible en: https://web.unican.es/noticias/Paginas/2017/septiembre_2017/Estudiantes-de-Ingenieria-Quimica-de-la-UC-componen-el-primer-equipo-espanol-en-participar-en-el-concurso-internacional-Che.aspx

[9] Sensores fotoeléctricos | China Sensor Factory | cheemi-tech.com [ONLINE] [Consultado: 20 de junio de 2019]. Disponible en: http://www.cheemi-tech.com/photoelectric-sensor-switch.html?gclid=CjwKCAjw6vvoBRBtEiwAZq-T1eAzK-OGvrD79YF_QpSgcLaZsRnMIhHP371F3wexUOwP2ts-ACm-3RoCsw8QAvD_BwE

Mejora del mecanismo de detención de un coche impulsado por una reacción química

[10] ISOR Color. 2016. VISOR Color. [ONLINE] [Consultado: 20 de junio de 2019]. Disponible en: <http://www.sensopart.com/en/products/vision-sensors-systems/colour-detection>

[11] Fundamentos de sensores fotoeléctricos. 2016. [ONLINE] [Consultado: 25 de junio de 2019]. Disponible en: <https://www.automation.com/library/articles-white-papers/sensors-sensing-technologies/fundamentals-of-photoelectric-sensors>

[12] Principio de funcionamiento de LDR. Disponible en: <https://riverglennapts.com/es/resistor/754-light-dependent-resistor-ldr-and-working-principle-of-ldr.html>

[13] ICCE Student Conference celebrado el 17 y 18 de junio de 2019 en Santander. Disponible en: <https://anque-icce2019.com>

6. Anexos.

Tabla 3. Tabla resumen de todos los experimentos llevados a cabo del reloj de yodo.

1 mL H ₂ SO ₄			
Volumen KIO ₃ (mL)	Volumen H ₂ O (mL)	Tiempo medio (s)	Desviación típica (%)
40	0	31,5	2,245
36	4	36,73	2,811
35	5	34	0,000
34	6	41,5	5,112
32	8	45,1	2,822
30	10	46,5	4,562
28	12	53,975	0,066
27	13	59,5	1,188
26	14	61	2,318
25	15	63,5	3,341
24	16	73	5,812
23	17	86,5	2,452
0,5 mL H ₂ SO ₄			
Volumen KIO ₃ (mL)	Volumen H ₂ O (mL)	Tiempo medio (s)	Desviación típica (%)
35	5	71	1,992
30	10	88,5	2,397
23	17	152	1,861
40	0	60,5	1,169
25	15	123,5	4,008
0,75 mL H ₂ SO ₄			
Volumen KIO ₃ (mL)	Volumen H ₂ O (mL)	Tiempo medio (s)	Desviación típica (%)
40	0	40,125	3,084
37	3	45	0,000
35	5	49,5	1,428
32	8	57,5	1,230
30	10	62	0,000
28	12	68	2,080
25	15	85	1,664
24	16	91	1,554
23	17	103,5	2,050
22	18	109,5	0,646

Mejora del mecanismo de detención de un coche impulsado por una reacción química

Tabla 4. Análisis de sensibilidad.

Distancia (m)	Velocidad (m/s)	Ecuación	Volumen KIO ₃ (mL)
15	0,25	$y = 91,207x + 16,397$	39,18
	0,26		40,11
	0,27		41
16	0,25	$y = 87,745x + 15,775$	37,9
	0,26		38,6
	0,27		39,47
17	0,25	$y = 84,613x + 15,212$	36,35
	0,26		37,21
	0,27		38,06
18	0,25	$y = 81,763x + 14,699$	35,12
	0,26		35,96
	0,27		36,78
19	0,25	$y = 79,155x + 14,23$	34
	0,26		34,81
	0,27		35,61

Tabla 5. Análisis de sensibilidad.

Distancia (m)	Velocidad (m/s)	Ecuación	Volumen KIO ₃ (mL)
20	0,25	$y = 76,758x + 13,8$	32,97
	0,26		33,76
	0,27		34,53
21	0,25	$y = 74,545x + 13,402$	32,02
	0,26		32,78
	0,27		33,53
22	0,25	$y = 72,495x + 13,033$	31,14
	0,26		31,88
	0,27		32,61
23	0,25	$y = 70,589x + 12,69$	30,32
	0,26		31,04
	0,27		31,76
24	0,25	$y = 68,81x + 12,371$	29,56
	0,26		30,26
	0,27		30,95

Tabla 6. Análisis de sensibilidad.

Distancia (m)	Velocidad (m/s)	Ecuación	Volumen KIO ₃ (mL)
25	0,25	$y = 67,147x + 12,072$	28,84
	0,26		29,53
	0,27		30,21
26	0,25	$y = 65,586x + 11,791$	28,17
	0,26		28,84
	0,27		29,5
27	0,25	$y = 64,119x + 11,527$	27,54
	0,26		28,2
	0,27		28,84
28	0,25	$y = 62,736x + 11,279$	26,95
	0,26		27,6
	0,27		28,22
29	0,25	$y = 61,43x + 11,044$	26,4
	0,26		27,02
	0,27		27,63
30	0,25	$y = 60,194x + 10,822$	25,86
	0,26		26,47
	0,27		27,08