



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**MODELO FUNCIONAL DE UN ROBOT PARA LA  
DETECCIÓN Y SOFOCACIÓN DE FUEGO**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO MECATRÓNICO**

**PRESENTA:**

**DIEGO ALBERTO ZAVALA GALICIA**

**DIRECTOR DE TESIS:**

**ING. LUIS YAIR BAUTISTA BLANCO**



**MÉXICO, D.F.**

**2013**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

# Dedicatorias y agradecimientos

Dedico este trabajo a mi mamá Laura Galicia Meléndez, gracias por todo tu amor, esfuerzo, apoyo, tus consejos, risas y muchas más cosas que me hicieron salir adelante y llegar hasta este punto de mi vida. Soy privilegiado de ser tu hijo y tener una mamá ejemplar. Te amo con todo mi corazón.

También dedico este trabajo a mi abuelita Ruth Elma Meléndez Ramírez, gracias también por tus consejos, enseñanzas, apoyo, trabajo y protección. Eres la abuelita más increíble del mundo y soy privilegiado de ser tu nieto e hijo. Te amo con todo mi corazón.

Dedico este trabajo a mis tíos: Ana, Alejandro, David y Arturo; y también a mis primas, primo y sobrino: Karlita, Nancy, Saúl, Kevin. Gracias por todo su apoyo, las risas, anécdotas y consejos que me ayudaron a salir adelante, los amo muchísimo.

Agradezco a mi asesor de tesis Ing. Luis Yair Bautista Blanco por su apoyo incondicional desde el inicio de este trabajo, su dedicación, los ánimos que me proporcionó, jamás tendré como pagarle todo lo que hizo por mí no solo a nivel escolar sino también a nivel personal.

Agradezco a mis sinodales por dedicación en la revisión de este trabajo y por sus enseñanzas que me proporcionaron siempre los tendré presentes.

A mis amigos de AFG (mi maestra Chayo, Fernando, Lucero, Gerardo, Sara, Gerardo, Casiano, Saúl) les agradezco el enseñarme el valor de la amistad e inculcarme el valor de nunca darme por vencido a pesar de las circunstancias, además de permitirme descubrir mi verdadera pasión que es correr.

A mis amigas Dalia, Anita, Leticia (pulgis) gracias por todo su apoyo, cariño y comprensión desde la secundaria, CCH Sur y Universidad, las quiero muchísimo.

Mis amigos (Cesar, Luis (Tule), Roberto, Pancho, Pablo) gracias por estar conmigo a lo largo de la carrera y por enseñarme que se puede lograr todo con trabajo en equipo y dedicación, además de todas las anécdotas que vivimos juntos.

A mis amigas de la coordinación de matemáticas de Ciencias Básicas (Karlita, Gaby, Iskra, Brenda, Pau, Arely, Erika) gracias por sus ánimos, apoyo, risas y grandes momentos que viví a su lado.

Agradezco a la Facultad de Ingeniería y a la UNAM por el privilegio de haber formado parte de su alumnado y ser mi segunda casa.

Agradezco a LEGO por ser el juego que ha estado presente desde mi infancia hasta la universidad y sobre todo por enseñarme el valor de la frase “leg godt” (juega bien).

# Índice

	Página
Introducción	1
Objetivo general	2
1. Marco teórico	3
1.1 Definición y tipos de fuego	3
1.2 Incendios forestales	8
1.3 Causas y consecuencias de los incendios forestales	18
1.4 Combate de incendios forestales	22
1.4.1 Etapas para el combate de incendios forestales	22
1.4.2 Acciones y ataques contra incendios forestales	26
1.4.3 Herramientas para el combate de incendios forestales	28
1.5 Robots para el combate de incendios	34
1.6 Los incendios forestales en México y sus consecuencias	41
2. Desarrollo	45
2.1 Campo de oportunidad	45
2.2 Identificación de necesidades	45
2.3 Planteamiento de las especificaciones	46
2.4 Generación de conceptos	48
2.5 Combinaciones de las soluciones para los subsistemas	64
2.6 Selección del concepto	69
2.7 Implementación	71
2.7.1 Mecánica	72
2.7.2 Electrónica	83
2.7.3 Programación	86
2.8 Diseño a detalle	89
3. Pruebas finales y resultados	117
3.1 Prueba final en el interior	127
3.2 Prueba final en el exterior	132
4. Conclusiones	135
5. Trabajo futuro	136
Referencias	137

# Introducción

En el presente trabajo se muestra el trabajo realizado para el diseño de un modelo funcional de un robot que pueda realizar la detección y sofocación de una fuente de calor dentro de su área de trabajo.

En el capítulo uno se describe el fenómeno de los incendios forestales desde sus tipos, sus causas y consecuencias, las acciones de combate y se muestran algunos robots que son utilizados para el mismo fin y por último, se expone la situación de los incendios forestales en México.

En el capítulo dos se presenta la metodología de diseño que se utiliza para la identificación de necesidades de un campo de oportunidad, el planteamiento de las especificaciones y la generación y selección de un concepto. Posteriormente se muestran las iteraciones que se realizan para la construcción del concepto seleccionado con ayuda de la plataforma LEGO MINDSTORMS en aspectos como la mecánica, electrónica y programación.

En el capítulo tres se exponen las pruebas realizadas con el modelo funcional obtenido del proceso anterior, tanto en ambientes internos y como externos, para evaluar los resultados obtenidos y determinar si cumple con su principio de funcionamiento.

En el capítulo cuatro se presentan las conclusiones generadas por el desarrollo del modelo y finalmente, en el capítulo cinco se identifica el trabajo a futuro a realizarse con el dispositivo obtenido.

## **Objetivo general**

Diseñar e implementar el modelo funcional de un robot con la finalidad de prevenir el desarrollo de un incendio haciendo uso de métodos convencionales para su extinción.

### **Objetivos específicos**

Analizar los métodos de extinción convencionales que existen para el combate de incendios forestales.

Identificar las características específicas de los robots de servicio existentes que se emplean para la extinción de fuego.

Seguir una metodología de diseño, con la finalidad de llegar a un modelo funcional que satisfaga el objetivo de prevenir un incendio en su etapa inicial.

Evaluar los resultados de las pruebas realizadas con el modelo obtenido para determinar su desempeño en la detección y prevención de un incendio en su etapa inicial.

Identificar áreas de oportunidad para una siguiente iteración del diseño en trabajos posteriores.

# 1. Marco Teórico

## 1.1 Definición y tipos de fuego

El fuego es un elemento de la naturaleza que ha sido empleado desde los tiempos del hombre primitivo, Rodríguez (1996) menciona que lo empleó como una forma para calentarse en el interior de su caverna, para protegerse de los depredadores en la noche, permitió el comienzo de su vida social mediante la comunicación y la reflexión y constituyó la primer fuente de energía y fuerza de manipulación de ecosistemas empleado deliberadamente. A su vez, los mayores descubrimientos en la historia de la humanidad contienen métodos para convertir en calor y luz la energía de un combustible, como el caso de la madera [1].



Figura 1. El fuego y el hombre primitivo [2].

El fuego es el resultado de un proceso químico llamado combustión, éste consiste en una rápida oxidación de materiales combustibles acompañado por la emisión de luz y calor, figura 2 [1] [3].



Figura 2. Combustión de una vela [4].

Para la existencia del fuego debe haber tres elementos perfectamente balanceados, estos están representados en el triángulo del fuego, véase figura 3 [3].



Figura 3. Triángulo del fuego [5].

Como se observa, el primer elemento es el calor que consiste en una manifestación de la energía y que se puede observar por sus efectos que provoca en los cuerpos (temperatura, dilatación, etc.) [3].

El siguiente elemento presente en el triángulo del fuego es el oxígeno, este elemento se encuentra en la atmósfera que nos rodea (21 % es oxígeno, 78 % es nitrógeno y 1 % corresponde a otros gases). Para que exista fuego se requiere una cantidad de oxígeno del 16%, con menos este se puede apagar [3].

Por último, se encuentran los combustibles los cuales Esparza (2013) define como las sustancias que pueden arder en ciertas condiciones. Los combustibles se pueden encontrar en tres estados: sólido, líquido y gaseoso. También debido a la variedad de estos se creó una clasificación de los fuegos, como se muestra en el documento de la Dirección de Protección Civil de la UNAM [6] [3]:

- *Fuego clase "A"*.

Es originado por materiales sólidos como son: papel, madera, basura, etc. Dichos materiales tienen la característica de dejar residuos después de incendiarse.

Su representación es mediante un triángulo de color verde y en su interior se encuentra la letra A [3].





Figura 4. Símbolo del fuego clase "A" [7].

- *Fuego clase "B"*.

Esta clase de fuego es originado por el petróleo y sus derivados como son la gasolina, los alcoholes, etc.

Su representación es mediante un cuadrado o rectángulo de color rojo y en su interior se encuentra la letra B [3].



Figura 5. Símbolo del fuego clase "B" [7].

- *Fuego clase "C"*.

Este tipo de fuego es ocasionado por material o equipos energizados, como ejemplo tenemos a las estaciones eléctricas, instalaciones eléctricas (ya sean domésticas o industriales), computadoras, etc.

Su representación es mediante un círculo de color azul y en su interior se encuentra la letra C [3].



Figura 6. Símbolo del fuego clase "C" [7].

- *Fuego clase “D”*.

Este tipo de fuego es provocado por la reacción violenta que tienen algunos metales alcalinos al estar en contacto con el oxígeno, como ejemplos tenemos el Magnesio, el Zinc, el Potasio, el Calcio, etc.

Su representación es mediante una estrella amarilla de cinco picos y en su interior se encuentra la letra D [3].



Figura 7. Símbolo del fuego clase “D” [8].

También en algunos países existen otras categorías como son:

- *Fuego clase “K”*.

En los Estados Unidos se enlista este tipo de fuego el cual es provocado por los aceites de cocinar [7].



Figura 8. Símbolo del fuego clase “K” [7].

- *Fuego clase “E”*.

Este tipo de fuego es de origen radiactivo [9].

Para el presente trabajo se investigó las etapas del proceso de combustión de los materiales que producen los fuegos tipo “A”, en este caso la madera, debido a que éste es un elemento presente en los incendios forestales de los cuales se hablará más adelante.

- *Pre calentamiento o preignición.*

Para comenzar el proceso de combustión, es necesaria la presencia de una fuente de calor, que permita el calentamiento y la descomposición del combustible. El agua comienza a evaporarse, al mismo tiempo que otras sustancias comienzan a ser volátiles, como son las grasas y aceites. Al evaporarse el agua de combustible, la temperatura asciende a los  $200[^\circ\text{C}]$  [10].

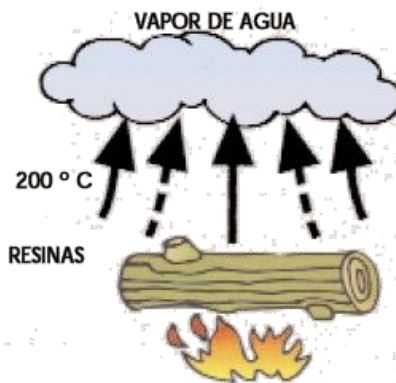


Figura 9. Pre calentamiento de la madera [11].

- *Ignición de gases.*

Durante esta etapa, la temperatura del combustible alcanza valores de 300 a 400  $[^\circ\text{C}]$ . Los gases que de él emanan comienzan a incendiarse haciendo posible la observación de llamas. Este proceso continuará hasta alcanzar los 800  $[^\circ\text{C}]$ , dicho aumento de temperatura está acompañado por un aumento en la cantidad de calor y la producción de compuestos resultantes de la combustión como son: vapor de agua, Dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ ) y gases no quemados.

En esta fase de la combustión cabe resaltar que el proceso se puede mantener por si solo, sin ser necesario la presencia de la fuente de calor que desencadenó la reacción [10].

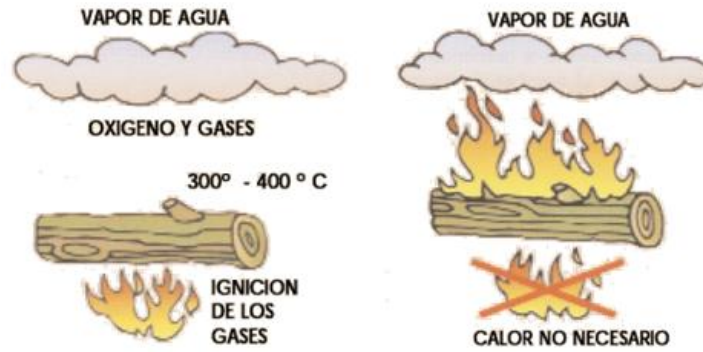


Figura 10. Ignición de gases en la madera [11].

- *Fase sólida.*

Continúa el proceso de oxidación en los tejidos sólidos con la característica de no haber presencia de llamas, para este caso el calor es intenso y se pueden alcanzar temperaturas de hasta 1000 [°C].

Si el proceso de combustión es completo el producto final que se obtiene son cenizas, en caso contrario, se obtendrá carbón [10].

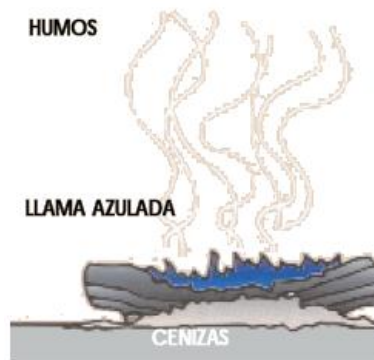


Figura 11. Fase sólida de la madera [11].

## 1.2 Incendios forestales

Como se mencionó al principio del capítulo, el fuego puede ser utilizado como una herramienta para beneficio del hombre, siempre que se tenga control y cuidado en su manejo, cuando esto no es posible, se convierte en una seria amenaza que puede destruir los bienes con los cuales el hombre satisface sus necesidades. Un fuego que está fuera de control recibe el nombre de incendio [3].

De acuerdo a lo que menciona Zárate (2004) en su texto, se puede definir a un incendio como una combustión que se propaga de forma incontrolada en el tiempo y en el espacio [12].

Sabiendo lo anterior, Mora (2008) define a un incendio forestal de la siguiente forma: un incendio forestal es un tipo de incendio caracterizado por producirse y desarrollarse principalmente en zonas naturales con vegetación abundante [13].



Figura 12. Incendio forestal. [13]

Durante un incendio forestal se debe observar el comportamiento del fuego, el cual es un conjunto de manifestaciones de carácter físico y mecánico, con éstas podremos predecir como se comportará a futuro reduciendo el tiempo para controlarlo y con una mayor seguridad para los combatientes [10] [1].

El comportamiento del fuego se refiere a las siguientes características [10]:

- *Velocidad de propagación.*

Es la distancia recorrida por el incendio por unidad de tiempo, por lo general se mide en kilómetros por hora [12] [10].

- *Columna de convección.*

Se refiere a la corriente ascendente de aire caliente, humo, y partículas que se alza desde la superficie caliente del incendio, debido al incremento en la temperatura ambiente y a la menor densidad del aire caliente.

- *Longitud de las llamas.*

Se refiere al largo medio de las mismas en la cabeza del incendio. Esta manifestación esta muy relacionada con la intensidad calorífica y afecta el dinamismo de la columna de convección.

- *Dirección de avance.*

Es la dirección hacia donde se dirigen las llamas, esto dependerá de la dirección del viento.

- *Intensidad lineal.*

Es la cantidad de calor que se libera en el frente de un incendio por unidad de tiempo y de longitud o también se define como la potencia calorífica total por metro de amplitud del frente [12].

La radiación es el mecanismo que transmite, junto con la convección, la mayor parte de energía calorífica de un incendio, se ha considerado ser el responsable del precalentamiento de los combustibles conforme avanza un incendio forestal.

La radiación térmica es la energía electromagnética emitida por la materia cuando se encuentra a una temperatura finita en la región espectral de longitud de onda comprendida entre  $0.4[\mu m]$  y  $100[\mu m]$ , puede provenir de sólidos, líquidos y gases. Las llamas de un incendio son una mezcla de gases y cenizas incandescentes [12].

En la naturaleza se pueden identificar dos tipos de condiciones: las condiciones permanentes y las transitorias. Las condiciones permanentes indican la probabilidad para que llegue a existir fuego, y las condiciones transitorias sirven para conocer los alcances que tendrá un incendio.

Estas condiciones permanentes y transitorias están representadas en la gran triada, figura 13, la cual esta integrada por tres elementos: la topografía, el tiempo atmosférico y el combustible [14].

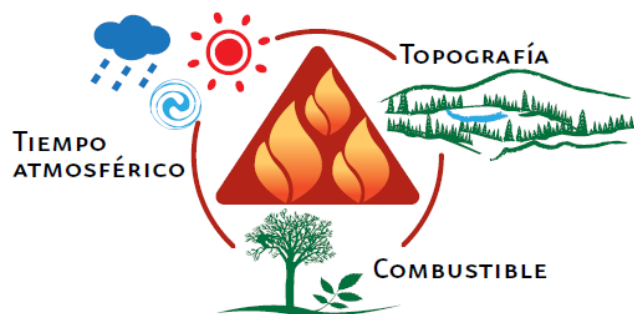


Figura 13. La gran triada [14].

A continuación se explicará cada uno de los elementos que conforman a la gran triada:

- *Topografía.*

Se encarga de estudiar las configuraciones de un terreno, los factores que influyen de manera importante en el desarrollo de un incendio son [1]:

*Pendiente:* corresponde a la inclinación del terreno y a su vez afecta de manera importante en el comportamiento del fuego, ya que al presentarse una mayor inclinación será mayor su velocidad de propagación, esto debido a que la columna de convección deshidrata los combustibles en la parte superior de la ladera permitiendo que su combustión sea más rápida a comparación de los situados en terreno plano [10] [1].

*Exposición:* es la orientación de las laderas respecto al sol, lo cual origina las condiciones climáticas y tipo de vegetación que influyen en el comportamiento del incendio, Rodríguez (1996) menciona que en el hemisferio norte las laderas de exposición sur reciben la mayor cantidad de radiación solar en el año en consecuencia son las más secas, en cambio, las laderas de exposición norte reciben menor radiación solar, por lo cual son más húmedas, en el hemisferio sur es el caso contrario [10] [1].

*Configuración:* se refiere a la forma del terreno y determina el microclima de cada lugar. Se menciona que en las quebradas o cañones el movimiento de los vientos durante el día y la noche ocasiona el rápido calentamiento de los combustibles, debido a la transferencia de calor entre las laderas, causando un comportamiento explosivo del incendio [10].

- *Tiempo atmosférico.*

Rodríguez (1996) lo define como el estado momentáneo de la atmósfera en un lugar determinado, este factor tiene una gran influencia en el comportamiento del incendio, además de ser el más variable, los factores que más interesan de él son [1]:

*Temperatura ambiente:* indica el grado de calor o frío que posee la atmósfera, esto esta determinado por la energía solar que llega a la superficie terrestre y la capacidad de absorción e irradiación de está misma. La energía proveniente del sol dependerá de la latitud y estación del año en que se encuentre un lugar [10].

*Humedad relativa:* es la cantidad de vapor de agua que contiene el aire con respecto al máximo que podría tener a la misma temperatura y presión atmosférica, la humedad relativa en ambientes secos tiene valores de 20% o menos [1].

Conforme el día avanza, la temperatura asciende y la humedad relativa disminuye haciendo que los combustibles se sequen, de acuerdo con Rodríguez (1996), esto influye en el peligro de incendio y en la velocidad de propagación del fuego [1].

*Viento*: es el resultado del movimiento de masas de aire debido a diferencias de presión que son originadas por temperaturas distintas en dos puntos de la superficie terrestre. Este parámetro es crítico en el combate y a su vez el más difícil de pronosticar debido a que cambia constantemente. Los efectos que tiene sobre los incendios son en su intensidad, su dirección y la velocidad de propagación del fuego [1] [10].

Los vientos de mayor importancia en el desarrollo de un incendio son los locales de origen de la columna de convección [10].

Precipitaciones: disminuyen la propagación y la intensidad calorífica de los elementos del incendio, ya que humedece y enfría a los combustibles [10].

- *Combustible.*

Este factor determina las propiedades de un incendio y es el único sobre el cual podemos actuar directamente, ya sea al modificarlo o eliminarlo. Los combustibles forestales son materia de origen vegetal, ya sea que estén vivos o muertos, que puede entrar en combustión al aplicarle calor, esto dependerá de otras características como son [10]:

*Cantidad de combustible*: es la cantidad de combustible que se encuentra por unidad de superficie, se mide en kilogramo por metro cuadrado o en tonelada por hectárea. A una mayor cantidad la intensidad calorífica y duración del incendio serán mayores [10].

*Tamaño*: los combustibles se dividen en dos categorías: livianos y pesados. Los livianos tienen la característica de tener un rápido encendido debido a que pierden humedad y absorben calor fácilmente, como ejemplos tenemos a pastos, arbustos, etc. Los combustibles pesados se caracterizan por tener una combustión lenta debido a que la pérdida de humedad es lenta, por esta razón se requiere más tiempo de precalentamiento, como ejemplos tenemos a troncos y raíces gruesas [10].

*Humedad*: es la cantidad de agua con respecto al peso anhidro (seco) del combustible, expresado en porcentaje. Los vegetales vivos absorben a través de sus raíces el agua del suelo y la transpiran por unas diminutas cavidades en las hojas llamadas estomas.



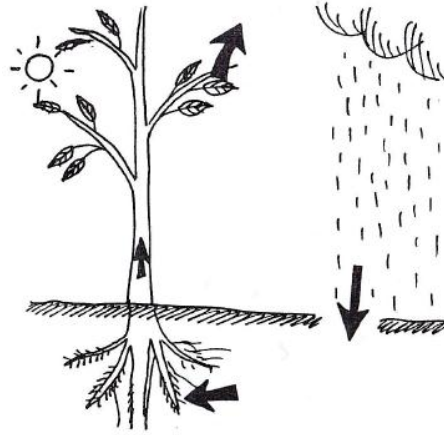


Figura 14. Movimiento del agua en los vegetales vivos [1].

Por otra parte, para los combustibles muertos su contenido de humedad está determinado por el contenido de humedad del ambiente, a esta propiedad se le llama higroscopía.

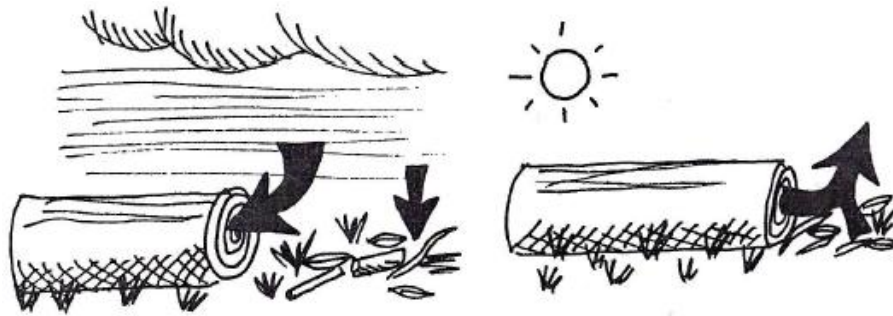


Figura 15. Movimiento del agua en los combustibles muertos, de izquierda a derecha, cuando el ambiente es más húmedo los combustibles ganan humedad y cuando el ambiente es más seco pierden humedad [1].

Cuando un combustible tiene una menor cantidad de humedad es más fácil iniciar la combustión y la propagación del fuego [1].

*Compactación:* es el grado de separación de las partículas, a medida que los combustibles están más compactos, el aire que circula entre ellos lo hace con menos libertad, lo que disminuye la cantidad de oxígeno y dificulta su combustión [10] [1].

*Continuidad:* los combustibles se pueden presentar en el terreno de forma continua o discontinua, de forma horizontal o vertical. Esto permite predecir la velocidad de propagación y la dirección de un incendio [10].

*Altura:* se refiere a la ubicación de los combustibles por altura, clasificándolos en subterráneos, superficiales y aéreos [1].

Con base en lo anterior, La Comisión Nacional Forestal, CONAFOR (2010) y Zárate (2004) mencionan que se pueden clasificar los incendios forestales en tres tipos: superficiales, subterráneos y de copa o aéreos [12] [14].

*Incendios superficiales.*

Como su nombre lo indica el fuego se desarrolla y propaga sobre la superficie, figura 16, consumiendo a su paso pastizales, hojas, ramas, arbustos, troncos, etc. Son los tipos de incendio más comunes.

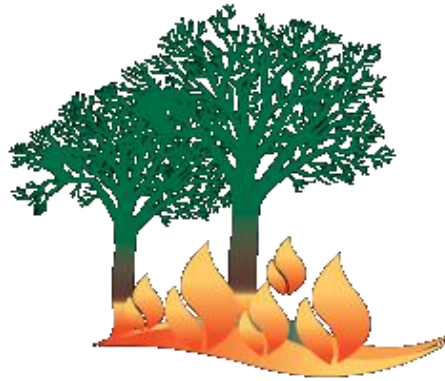


Figura 16. Incendio superficial [14].

*Incendios subterráneos.*

Este tipo de incendio tiene su origen en la superficie, pero al avanzar lo hace por debajo del suelo, figura 17. Puede ser identificado por el humo que produce, ya que no se producen llamas debido a la poca cantidad de oxígeno y la humedad. Estos incendios consumen a su paso básicamente materia orgánica como hojas muertas, raíces, humus, etc.

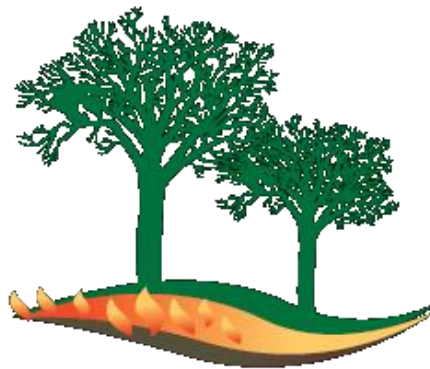


Figura 17. Incendio subterráneo [14].

*Incendio de copa o aéreo.*

Este tipo de incendio igualmente tiene su origen sobre la superficie, además que las llamas utilizan la vegetación de los árboles para subir y llegar a sus copas, figura 18, por lo cual consumen toda la vegetación de la zona.

Debido a las características mencionadas, los incendios de copa son los más destructivos y difíciles de controlar.

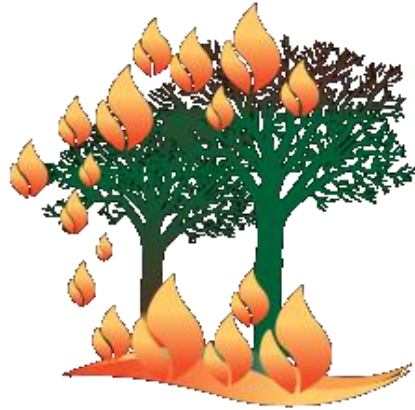


Figura 18. Incendio de copa o aéreo [14].

De acuerdo con el texto de Zárate (2004), un incendio forestal puede adoptar diversas formas de acuerdo a las condiciones del lugar donde se desarrolla, las más importantes son circulares, elípticas e irregulares, que se describen a continuación [12]:

Un incendio de forma circular se produce cuando el combustible es uniforme, no hay presencia de viento y el terreno es plano. En este caso el frente del fuego se propaga en todas las direcciones a partir del centro, figura 19.

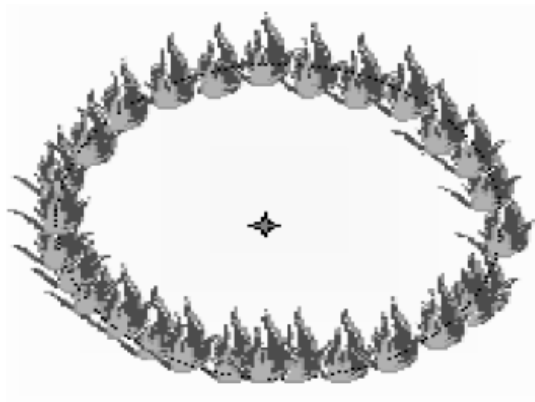


Figura 19. Incendio forestal de forma circular [12].

Un incendio de forma elíptica se origina cuando el viento tiene una dirección específica, el combustible que se consume es uniforme y el incendio se extiende sobre terrenos planos o con una pendiente, figura 20.

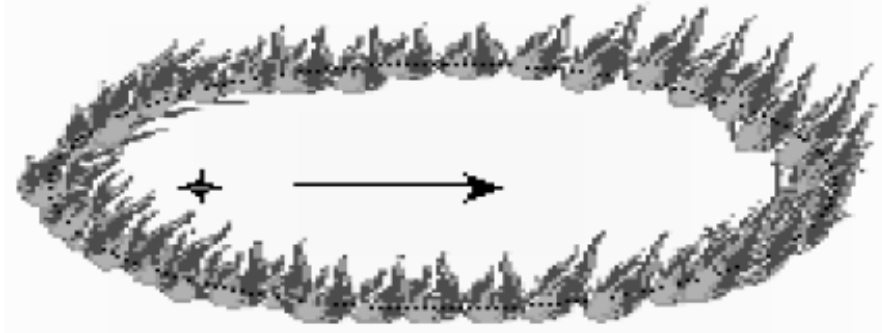


Figura 20. Incendio forestal de forma elíptica [12].

Por ultimo, se encuentra el incendio de forma irregular, el cual es el más común, se presenta al haber cambios en la intensidad y dirección del viento, cuando el combustible es heterogéneo y al propagarse sobre pendientes irregulares, figura 21.

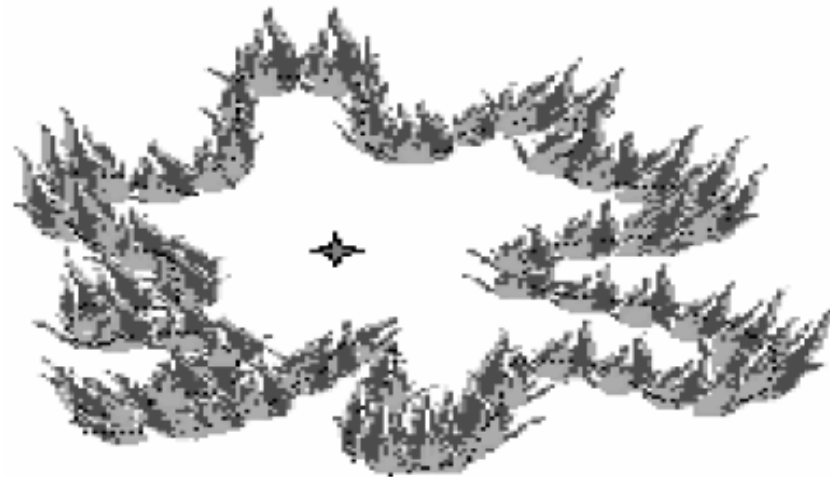


Figura 21. Incendio forestal de forma irregular [12].

Teniendo en cuenta hasta ahora sobre las condiciones, tipos y formas que pueden tener los incendios forestales, es importante conocer las partes que lo conforman, figura 22.

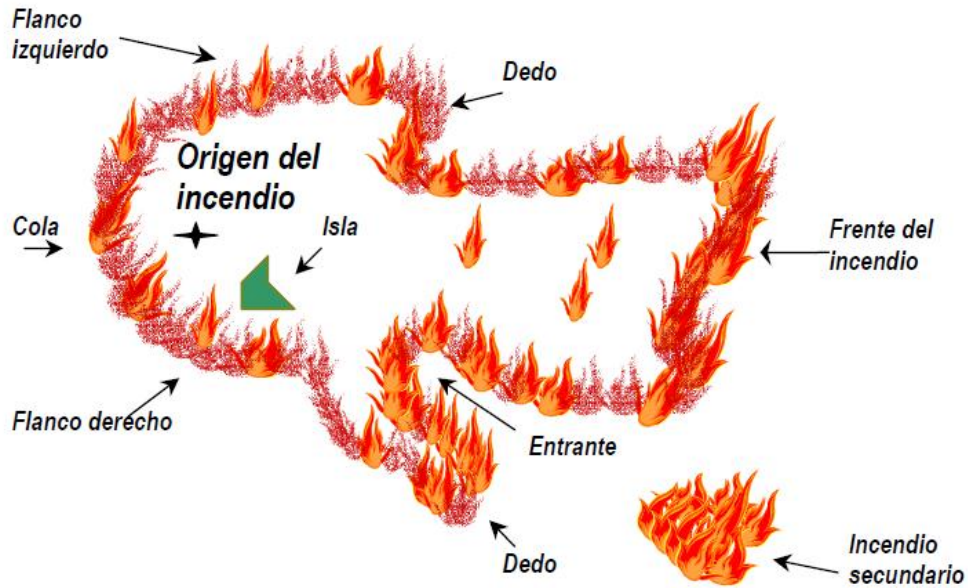


Figura 22. Partes de un incendio [12].

En la figura anterior podemos apreciar los siguientes elementos [12]:

*Frente:* es la parte del incendio que presenta la mayor velocidad de propagación y de generación de calor. Esta parte se ve influenciada por la velocidad del viento y la topografía de la zona.

*Cola:* es parte opuesta al frente y en general la más cercana al origen del incendio, esta parte se quema más lentamente y con poca intensidad.

*Flancos:* están ubicados entre el frente y la cola del incendio, extendiéndose en una dirección perpendicular a la línea de propagación principal. Estas zonas arden con una intensidad regular con respecto a las zonas anteriores.

*Dedos:* son fuegos que progresan detrás del frente. Cada dedo puede convertirse en nuevos frentes del incendio.

*Islas:* son zonas dentro del incendio en las cuales el combustible aún no se ha quemado.

*Entrantes:* son partes del incendio que se desarrollan de forma lenta, debido a obstáculos u otras condiciones desfavorables.

*Focos secundarios:* son incendios que se producen fuera del perímetro del incendio, se originan por las partículas incandescentes que se desplazan por los vientos de la zona, llamadas pavesas.

### 1.3 Causas y consecuencias de los incendios forestales

Como se mencionó en la sección 1.2, para la existencia del fuego se requiere la presencia de tres elementos perfectamente balanceados: calor, oxígeno y combustibles. Dentro de las zonas forestales sabemos que existe una gran diversidad de vegetación, lo cual puede actuar como combustible, además de contar con la presencia del oxígeno en la atmósfera, pero el calor de estas zonas es insuficiente para comenzar un incendio. Debido a lo anterior es necesaria la existencia de una fuente externa que genere temperaturas superiores a los  $200[^\circ\text{C}]$  [14].

De acuerdo con CONAFOR, el 99 por ciento de los incendios forestales son ocasionados por las acciones del hombre y el resto corresponde a causa de fenómenos naturales [14].

Dentro de las causas naturales que provocan los incendios, las más comunes son los rayos, le siguen con una menor frecuencia las erupciones volcánicas y efusiones de lava, las chispas provocadas por la caída de piedras, y los escasos incendios originados por la caída de aerolitos y cometas o fragmentos de éstos [1].



Figura 23. Causas naturales de incendios forestales, de izquierda a derecha: rayos, erupciones volcánicas, caída de aerolitos [15] [16].

Por su parte las causas de los incendios debido al hombre son clasificadas por CONAFOR (2010) y Rodríguez (1996) en tres categorías [14] [1]:

*Accidentales*: es cuando se provoca un incendio sin haber tenido la intención de iniciarlo y sin que se haya provocado por descuidos en el uso del fuego en el monte.

Por ejemplo: fallas en líneas eléctricas, accidentes automovilísticos, ferroviarios y aéreos, maniobras militares, chispas de chimeneas de industrias, fábricas o casas en el bosque, uso de cohetes y pirotecnia, escape del fuego en quemas prescritas.

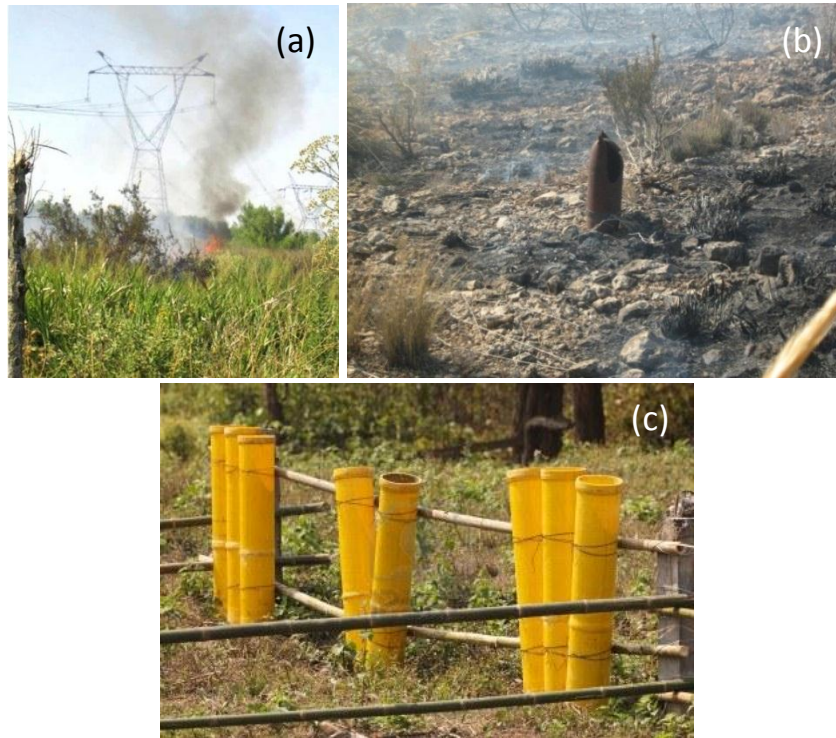


Figura 24. Causas accidentales de incendios forestales: (a) falla en línea eléctrica, (b) proyectil utilizado en maniobras militares, (c) tubos de mortero de fuegos artificiales instalados en el campo [17] [18] [19].

*Negligencias:* es cuando se deriva del uso del fuego en terrenos agrícolas o en el monte por no haber tomado medidas para evitar que escapara hacia el bosque.

Por ejemplo: fogatas mal apagadas por excursionistas, colillas y cerillos encendidos o mal apagados, quemas agropecuarias no controladas, quema de basureros, hornos de carbón, quema mal conducida de desechos de aprovechamiento, sistema roza tumba y quema.



Figura 25. Causas por negligencia de incendios forestales: (a) fogatas, (b) colillas de cigarro, (c) quema de matorrales, (d) quema de basura [20] [21] [22].

*Intencional:* Es cuando se provoca un incendio con un propósito determinado, cualquiera que este sea.

Por ejemplo: quemas realizadas por las personas debido a litigios de terrenos, problemas personales o contra dependencias gubernamentales, quemas realizadas por cazadores para acorrallar o hacer salir a sus presas, problemas psicológicos (pirómanos), eliminación de plagas de animales, insectos o vegetación y su uso por parte de contrabandistas para distraer a las patrullas de combate o las patrullas forestales de inspección y vigilancia.



Figura 26. Causas intencionales de incendios forestales, de izquierda a derecha se tiene: Cazadores, conflictos personales o con autoridades [23] [24].



Una vez que se conocen las causas de los incendios, también es importante reconocer las consecuencias que tienen estos en diversos ámbitos.

En el ámbito ecológico, los incendios forestales destruyen la vegetación, alteran las propiedades físicas y químicas del suelo haciéndola propensa a la erosión, el aire es contaminado por los compuestos químicos del humo (como son bióxido de carbono, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno y azufre, oxidantes e hidrocarburos) contribuyendo al cambio climático global, la fauna también se ve afectada por estos siniestros debido a que puede ser muerta o en la destrucción de su hábitat [1].



Figura 27. Daños a un bosque después de un incendio forestal [25].

En el aspecto político, la población al observar un incendio forestal tendrá una opinión negativa hacia las autoridades, a pesar que estas se encuentren trabajando para controlar el problema [1].

Las afectaciones en la operación de las agencias son evidentes, ya que en la medida que empeora el incendio se tendrá que destinar una mayor cantidad de recursos para atenderlo, esto en el mejor de los casos y en los peores, se tendrán áreas mínimamente protegidas y controlar estos siniestros con recursos financieros, humanos y materiales escasos [1].

En el aspecto económico, CONAFOR (2010) menciona que la pérdida de los recursos forestales afecta el potencial comercial. La evaluación de daños incluye las pérdidas materiales en productos y en servicios, es decir, los valores monetarios y no monetarios que proporcionan los bosques, como son: madera afectada, costos de reforestación, costos de rehabilitación, valores ecológicos, históricos, políticos, escénicos y los costos del combate de incendios [14].

Lamentablemente en la actualidad los incendios forestales siguen cobrando las vidas humanas en diversos países. Tan solo en Wisconsin durante el mes de octubre de 1871, un incendio cobró la vida de 1500 vidas. En la mayoría de los casos acontecen por descuidos y/o errores de los combatientes [1].

Con lo que se ha explicado de consecuencias que tienen los incendios, es común que la sociedad ligue la palabra fuego con daños y destrucción, pero algunos ecosistemas han creado relaciones con el obteniendo beneficios como son la ayuda en la reducción de maleza, incorporación de nutrientes al suelo, mejorar la germinación de las semillas, etc. Dichos entornos se conocen como ecosistemas dependientes del fuego, un aspecto a resaltar de estos lugares es que los árboles se han adaptado para soportar las condiciones extremas durante los incendios [14].

## 1.4 Combate de incendios forestales

### 1.4.1 Etapas para el combate de incendios forestales

Cuando se detecta un incendio forestal, las autoridades correspondientes realizan las siguientes etapas para combatir el siniestro [26]:

- *Reconocimiento y evaluación:* en esta etapa el jefe del grupo realiza una valoración de la situación y efectúa un plan sencillo de ataque, también solicitará los medios que crea necesarios para el combate.



Figura 28. Autoridades evaluando la situación de un incendio forestal [27].

- *Planificación:* El capataz de la cuadrilla recibe las instrucciones sobre el trabajo a realizar y distribuye las tareas entre los brigadistas.



Figura 29. Planificación de los brigadistas [28].

- *Despliegue:* Las cuadrillas terrestres salen hacia el lugar del incendio cuando lo autoriza el Centro Provincial de Mando. EL recorrido lo pueden hacer a pie, en coche o en casos puntuales en helicóptero.



Figura 30. Despliegue de los brigadistas hacia el incendio [29].

- *Primer ataque:* Al llegar a la zona del incendio, el jefe de la cuadrilla hace un reconocimiento del incendio con la finalidad de observar su comportamiento, tener rutas de escape, que herramienta utilizar, etc., posteriormente distribuye las tareas entre los brigadistas, los cuales se dirigen al frente del incendio para proceder a realizar las primeras acciones contra el fuego.



Figura 31. Primer ataque por parte de los brigadistas [30].

- *Control del incendio:* en esta etapa la cuadrilla de brigadistas han logrado evitar el avance del incendio. En este momento la cuadrilla enfoca sus esfuerzos para extinguirlo.



Figura 32. Control de un incendio forestal [31].

- *Extinción:* La cuadrillas logran la sofocación del fuego, es importante que la cuadrilla este alerta sobre puntos que causaran nuevamente un nuevo incendio para extinguirlo.



Figura 33. Extinción del incendio [32].

- *Desmovilización*: Concluidos los trabajos de extinción y cuando el jefe de extinción lo autoriza la cuadrilla se retira del lugar del incendio.



Figura 34. Desmovilización de los brigadistas [33].

- *Vigilancia postincendio*: esta etapa consiste en la vigilancia de la zona donde ocurrió el incendio con la finalidad de confirmar la extinción del incendio o solicitar a los brigadistas regresar al lugar.

### 1.4.2 Acciones y ataques contra incendios forestales

El manual de la Dirección de Protección Civil de la UNAM menciona que para realizar el combate de un incendio se debe eliminar uno de los tres elementos que los producen: calor, oxígeno y combustible; a su vez en el manual de Fernández (2002) se menciona las acciones a realizar sobre cada elemento, como se muestra en la siguiente tabla 1 [3] [34].

Fernández (2002) menciona que las acciones descritas se pueden realizar de dos formas, ya sea mediante un ataque directo o un ataque indirecto [34].

El ataque directo se realiza en el borde del incendio y cuando las características del mismo le permiten al combatiente trabajar con seguridad, como son la longitud de la llama, la velocidad de propagación, la existencia de rutas de escape [34].

Tabla 1. Acciones sobre los elementos del fuego.

<b>Elemento del fuego</b>	<b>Función de la acción</b>	<b>Medio u objeto para realizar la acción</b>
Calor	Bajar la temperatura del combustible	Agua, tierra
Oxígeno	Aislar el combustible del aire	Uso de tierra, rociando agua
	Disminuir la proporción de oxígeno aumentando la del vapor de agua	Agua pulverizada
	Desplazar violentamente el aire por unos instantes	Ramas, batefuegos, etc.
Combustible	Cortar su continuidad	Herramienta o maquinaria
	Aumentar la cantidad de humedad	Agua o sustancias retardantes

Entre las ventajas de emplear el ataque directo se tiene:

- La reducción de daños del fuego en una mínima superficie.
- Es más seguro para los combatientes.
- El rendimiento es óptimo al emplearse agua.

Entre las desventajas de emplear el ataque directo se tiene:

- Exposición de los combatientes al calor y humo.
- La forma del terreno puede representar un riesgo al momento de desplazarse.
- La emisión de pavesas puede originar focos secundarios encerrando a los combatientes.

El ataque indirecto se realiza cuando el calor y humo del incendio son muy intensos, en este caso Fernández (2002) describe que se debe establecer una línea de control, aprovechando para su construcción todas barreras naturales y artificiales, a una distancia del borde del incendio. Posteriormente las acciones que se puede realizar son: crear un fuego controlado entre la línea de control y el incendio, llamado contrafuego, o esperar a que el incendio consuma todo el combustible hasta la línea de control [14] [34].

El ataque indirecto permite a los brigadistas trabajar de forma segura y mantener un ritmo de trabajo intenso por periodos largos, ya que las condiciones son menos duras, sin embargo, el empleo de esta forma de ataque descuida la vegetación que existe entre el borde del incendio y la línea de control, la cual puede ser valiosa, y además de debe vigilar que el fuego no sobrepase el perímetro de la línea de control.

Para determinar que tipo de ataque utilizar en un incendio, se utiliza como criterio la altura de la llama, como se muestra en la siguiente tabla [34]:

Tabla 2. Tipo de ataque dependiendo de la altura de la llama

<b>Altura de la llama</b>	<b>Opción recomendada</b>
Menor a 1.5 [m]	Ataque directo con herramientas manuales y autobombas
De 1.5 a 2.5 [m]	No realizar el ataque directo con herramientas manuales, para realizar el ataque directo utilizar el tractor de cadenas, las autobombas y medios aéreos.
De 2.5 a 3.5 [m]	Se utilizará el ataque indirecto al frente del incendio, debido a que el calor generado no permitirá acercarse a menos de 10 [m].
Más de 3.5 [m]	Se utilizará el ataque indirecto al frente del incendio, utilizándose el contrafuego como la técnica más eficaz. Es probable la existencia de focos secundarios y fuegos de copas.

Como se mencionó para combatir un incendio es necesario eliminar uno de los tres elementos que lo producen: calor, oxígeno y combustible, para lo cual se utiliza agua, tierra, desplazando el aire con instrumentos o la eliminación del combustible [34].

El agua cumple varias funciones durante un incendio como son enfriar y aumentar la humedad del combustible, el oxígeno del aire es desplazado por el vapor de agua, forma una capa sobre él, aislándolo, y enfría el entorno.

El agua debe dirigirse a la base de la llama, siempre que sea posible, con la finalidad de reducir la temperatura del combustible por debajo de su temperatura de ignición. Esta acción se puede realizar lanzando el agua en forma de chorro o pulverizado [34].

La tierra, al lanzarla sobre el combustible, realiza las funciones de desplazar el aire, al cubrir el combustible lo separamos del oxígeno y enfriarlo. Para lograr lo anterior se emplea tierra mineral, la cual se arroja de golpe sobre la base de las llamas.

Si la aplicación con el personal y herramientas no es suficiente, se debe emplear maquinaria pesada, como son los tractores de cadenas [34].

Para eliminar el oxígeno durante un incendio se emplea la técnica llamada sofocación, que consiste en desplazar el aire violentamente alrededor de combustible ardiendo. Para realizarlo se emplea un batefuegos o una rama, con lo cual se dan golpes secos sobre la base de la llama y manteniendo por unos instantes la herramienta sobre el combustible sin separarlo del mismo, antes de realizar el siguiente golpe. Con la primera acción desplaza el aire alrededor del combustible ardiendo y la segunda refuerza la acción anterior sofocando, causando la extinción del fuego [34].

La eliminación del combustible, como su nombre lo indica, consiste el retirar todo el combustible de una franja delante de las llamas, dicha franja se puede hacer cerca o lejos del frente de acuerdo al tipo de ataque seleccionado, ya sea directo o indirecto [34].

### **1.4.3 Herramientas para el combate de incendios forestales**

Para realizar las acciones mencionadas anteriormente, los brigadistas utilizan las siguientes herramientas:

- *Extintor de mochila*

Es un depósito de agua con una capacidad de 17 litros, el cual cuenta con correas para transportarlo en la espalda y con una bomba de accionamiento manual en forma de lanza que esta conectada al depósito a través de un tubo flexible de goma.

Su función es lanzar agua, siempre de ser posible de forma pulverizada, a la base de la llama para enfriar el combustible. Habrá que tener presente que el agua se acaba, por lo tanto se debe utilizar de forma racional, economizando en lo posible, y prever que deberemos reabastecer.

Se puede combinar su acción con la del batefuegos, sofocando las llamas una vez que disminuye su intensidad, ahorrando con esto mucha agua. También se utiliza en las labores de liquidación al mezclar el agua con la tierra, con la ayuda de las herramientas para rascar el combustible [34].





Figura 35. Extintor de mochila [35].

- *Pulaski o hacha – azada*

Esta herramienta consta de una pieza de acero templado, la cual por un lado presenta la forma de una azada robusta y del lado opuesto a un hacha, esta pieza esta sobre un mango de madera [34].

Es una herramienta que se usa para cortar, raspar y retirar el combustible, y a veces se utiliza para obtener tierra y mezclar brasas y rescoldos calientes [36].



Figura 36. Pulaski o hacha – azada [37].

- *Macleod o rastrillo – azada*

Esta herramienta esta compuesta por una pieza de acero laminado con un borde con filo en pico de flauta en la cara externa (azada muy ancha) y el borde opuesto con dientes (rastrillo). Esta pieza esta sobre un mango de madera [34].

Se utiliza para cortar y retirar combustibles ligeros debido a tener una menor capacidad de corte que otras herramientas, pero más anchura de azada. También es empleado para cavar en suelos blandos. Su función es eliminar combustible o dispersar brasas en el borde del incendio, incluso mezclar el combustible que está ardiendo con la tierra [36].



Figura 37. Macleod o rastrillo – azada [38].

- *Pala*

Es una herramienta que esta formada por una pieza de acero templado, de forma ligeramente cóncava y con un agujero en la parte posterior para encajar un mango de madera. Es recomendable hacer un filo en bisel en el borde (del lado cóncavo), comenzando a unos 5 [cm] desde el hombro y hasta la punta.

Es la herramienta más efectiva para arrojar tierra sobre la base de las llamas. También se puede emplear para realizar funciones de corte, cavado y raspado aunque con una menor eficacia, y es empleado en la fase de liquidación del incendio debido a su eficacia para dispersar brasas y mezclarlos con tierra o agua [36].



Figura 38. Pala [39].

- *Batefuegos*

Es una herramienta compuesta por una pala de goma al final de un mango metálico, que cuenta con un fleje interno proporcionándole la rigidez suficiente para recuperar la posición inicial [34].

Esta herramienta realiza una única acción: la sofocación. Es muy eficaz sobre combustibles ligeros. Se utiliza golpeando con la parte de goma la base de las llamas y manteniéndolo unos instantes sobre el combustible (alrededor de un segundo). Debido a la existencia de brasas y restos calientes, el golpe debe dirigirse desde una zona sin quemar hacia la quemada, evitando que las brasas caigan sobre el combustible verde [36].



Figura 39. Batefuegos. [40]

- *Motosierra y motodesbrozadora*

Son máquinas compuestas por un conjunto de elementos cortantes movidos por un motor de dos tiempos, cuya función es cortar el combustible.

Por norma general no se emplean en ataque directo debido a que contienen combustibles y el trabajo es muy cerca de las llamas. Se usan como herramientas de corte en el ataque indirecto, solo en ocasiones, debido a la incomodidad de su transporte y a la escasa utilización de la herramienta local [34].



Figura 40. A la izquierda, Motosierra y a la derecha, motodesbrozadora [41] [42].

- *Herramientas locales*

En la extinción de incendios forestales se emplean otras herramientas utilizadas en los trabajos habituales en la zona como son: azadas, hachas, podones, machetes, tajamatas, etc.

Dichas herramientas funcionan muy bien en determinadas zonas debido a las características de terreno y a que el personal está acostumbrado a utilizarlas, sin embargo, no son muy versátiles por lo que su uso no se ha extendido [34].



Figura 41. Herramientas locales, en el sentido de las manecillas del reloj se tienen: hacha, podón, machete, tajamata [43] [44] [45] [46].

En ocasiones es necesario utilizar medios con una mayor capacidad de trabajo como son las autobombas, medios aéreos y maquinaria pesada.

- *Autobomba*

La forma de actuar de estos medios es el ataque directo. Fernández (2002) menciona que el número de personal para operar estos vehículos son dos, el conductor y el ayudante, siendo suficientes para operar la bomba y realizar el tendido de la manguera, no mayor de dos tramos que corresponden a 40 [m].

Sin embargo, a veces por las características del terreno o por cuestiones de seguridad, no es posible el acceso de la autobomba hasta el frente del incendio. En este caso se requiere el apoyo del personal, que no está acostumbrado a los equipos de la autobomba, para realizar tendidos de manguera de mayor longitud y así el agua llegue al frente de las llamas [34].



Figura 42. Autobomba en acción [47].

- *Medios aéreos*

Los aviones y helicópteros son utilizados como bombarderos de agua y han adquirido un importante papel muy importante durante estos siniestros, debido a su efectividad y rapidez.

Estos se encargan de los frentes de llamas que por su intensidad, o por seguridad no permiten la acción directa de otros medios. Una vez que se realizó la descarga de agua, y si las normas de seguridad lo permiten, los brigadistas en tierra deben entrar con herramienta manual a rematar la tarea y extinguir el fuego [34].



Figura 43. Helicóptero en un incendio forestal [48].

- *Maquinaria pesada*

Es un medio potente para eliminar combustible y sofocar a las llamas con tierra. Cuando el terreno es favorable, destacan los tractores de cadenas debido a su gran capacidad de trabajo y eficacia.

Las condiciones de visibilidad y maniobrabilidad para el conductor son limitadas, impidiéndole prestar atención a puntos que podrían reavivar el incendio, por lo cual los brigadistas se reparten a una distancia de seguridad del perímetro del incendio extinguido para estar atentos a estos puntos [34] [36].



Figura 44. Tractor de cadenas [49].

## 1.5 Robots para el combate de incendios

De acuerdo con el trabajo de Avilés (2011), la robótica se define como la ciencia que estudia la conexión entre percepción y acción. A su vez un robot es un sistema mecánico multipropósito fijo o móvil que puede ser controlado automáticamente, reprogramable y de varios grados de libertad. El principal componente de un robot es su sistema mecánico, teniendo generalmente un aparato de locomoción, como son ruedas, orugas y piernas mecánicas, y un aparato de manipulación, como un brazo mecánico, un extremo actuante, manos artificiales. Un sistema robótico esta conformado por los siguientes subsistemas [50]:

- *Mecanismo*: es la estructura mecánica articulada accionada por actuadores que transmiten su movimiento a las juntas y la elección de los materiales.
- *Capacidades de percepción*: le permiten al sistema mecánico del robot adaptarse a las perturbaciones y los cambios impredecibles en el ambiente donde trabaja. Consiste en sensores internos y externos, con los primeros se obtiene información sobre su estado, y con los segundos obtiene información sobre su ambiente.
- *Controlador*: se encarga de ejecutar las acciones para lograr los objetivos fijados por el método de planeación de tareas, así como las restricciones impuestas por el robot y el ambiente. También genera las señales de entrada para los actuadores debido a las salidas de los sensores y de las instrucciones del usuario.
- *Interfaz de comunicación*: Esta es utilizada por el usuario para programar las tareas que el robot debe llevar a cabo.
- *Fuente de energía*: Es el dispositivo que se encarga de suministrar la energía necesaria para el funcionamiento del robot.

Los robots se pueden clasificar en tres tipos [50]:

- *Manipuladores*: aquellos que imitan el brazo humano.



Figura 45. Robot manipulador [51].

- *Caminantes*: aquellos que imitan el movimiento de humanos, insectos y otros tipos de animales.



Figura 46. Robot ASIMO [52].

- *Móviles*: aquellos que basan su movimiento en ruedas.



Figura 47. Robot Mars Rover [53].

En la última década, han surgido nuevas áreas de aplicación para los robots como son las medicas, de servicio, espaciales, transporte, submarinas, entre otros.

La robótica esta siendo cada vez más importante en nuestras economías y sociedades, al principio los adelantos estaban enfocados a la producción industrial, pero en la actualidad han pasado al área de servicios. Lo anterior es debido a que los robots evitan que las personas trabajen en entornos peligrosos, reducen los costos de operación y mejoran el nivel tecnológico y la productividad de la industria de servicios.



Los robots de servicio no tienen una definición exacta que sea aceptada internacionalmente, sin embargo, la IFR (International Federation of Robotics) proporciona la siguiente definición: “Un robot de servicio, es un robot que opera de manera parcial o totalmente autónoma, para realizar servicios útiles para el bienestar de los humanos y del equipamiento, excluyendo operaciones de manufactura.”.

Dentro de las proyecciones para 2010 – 2013, las áreas de aplicación de los robots como son la de defensa, rescate y aplicaciones de seguridad, robots de campo, sistemas logísticos, robots para exploración, aplicaciones médicas y plataformas robóticas para uso múltiple presentarán un intenso crecimiento [50].

Dentro de los robots de servicio, existen o están en desarrollo robots que son utilizados para realizar las labores del combate de incendios y así evitar que las personas realicen estas acciones, a continuación se mencionan algunos de ellos:

- *LUF – 60*

Este robot móvil teleoperado, creado por la empresa española Roboserv, con la finalidad de combatir los incendios en lugares de alto riesgo y de difícil acceso para los bomberos como son: túneles, instalaciones subterráneas, naves industriales, fábricas, etc.

Sus características son las siguientes:

- Sus dimensiones son 2.3 [m] de largo, 1.35 [m] de ancho, 2 [m] de altura y con un peso de 2,000 [Kg].
- Puede ser operado a control remoto con un radio de hasta 300 [m].
- Cuenta con un motor de diesel con una potencia de 104 [KW].
- Su velocidad máxima de 6 [Km/h].
- Puede desplazarse sobre cualquier terreno gracias a su sistema de tracción de orugas, con el cual puede superar pendientes de 30°.

Para su funcionamiento cuenta con un cañón de agua con 360 boquillas por donde se expulsa el agua a una presión de 15 a 25 [bares] y gracias a la acción de un ventilador logra la dispersión del agua, en forma pulverizada, con un gran alcance [54] [55].



Figura 48. LUF – 60 [54].

- *Thermite*

Este robot fue creado por la empresa Howe and Howe Technologies, que consiste en un vehículo operado a control remoto, hecho de acero y aluminio con la finalidad de poder resistir cualquier tipo de ambiente, con lo cual los bomberos evitan exponerse directamente al peligro.

Este robot es capaz de bombear alrededor de 160 litros de agua por minuto y lanzarla a presión contra las llamas del incendio.

Tiene un precio de 96,000 dólares [56].



Figura 49. De izquierda a derecha: Robot Thermite y robot Thermite en acción [56] [57].

- *Robot OLE.*

Es un robot en fase de desarrollo creado por la universidad alemana de Madgeburg – Stendal, el cual cuenta con la forma de un escarabajo, que puede resistir temperaturas de hasta 1,300 [°C].

Debido a su forma cuenta con dos tipos de movimiento: el primero es rodando sobre su caparazón para protegerse del fuego o utilizando sus seis patas para caminar.

El robot OLE tendría la capacidad de trabajar de forma autónoma y podría ser guiado por GPS, contaría con antenas inteligentes y sensores infrarrojos y de calor.

A su vez estaría equipado con tanques de agua y agentes de extinción en su interior [58] [59].

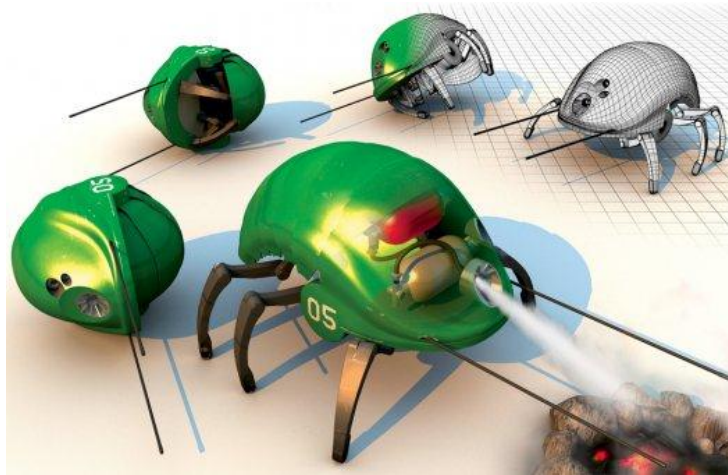


Figura 50. Concepto del Robot OLE [58].

En la red se encuentran diversos modelos de robots para la detección y extinción de fuego, en la mayoría de los casos este lo produce una vela. Las pruebas consisten en dejar que el robot se mueva dentro de un laberinto y al momento de detectar la presencia de una vela encendida acercarse y apagarla con un ventilador incorporado en la estructura, a continuación se muestran algunas imágenes de este tipo de modelos.

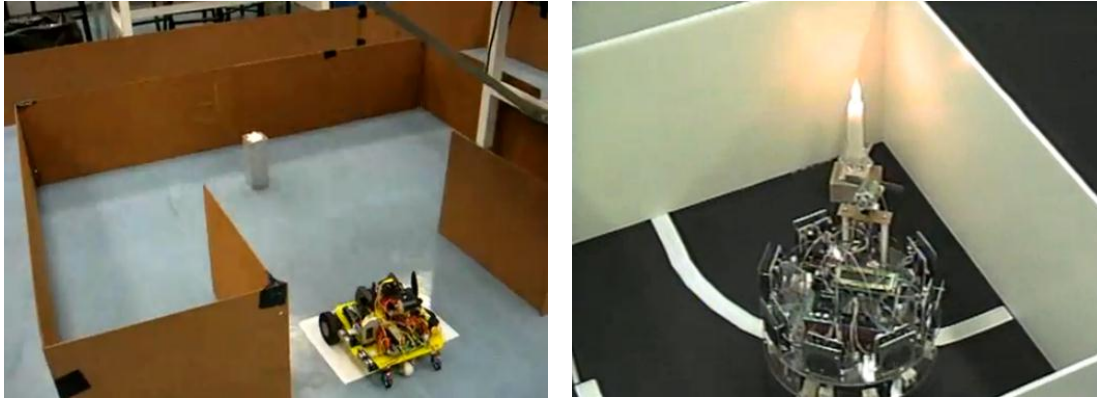


Figura 51. Propuestas de robots para combate de fuego [60] [61].

También se han creado propuestas de robots con el objetivo de apagar fuego, pero haciendo uso de la plataforma de LEGO MINDSTORMS, debido a que está facilita la construcción de los modelos.



Figura 52. Proyecto final del curso de robótica móvil de la Universidad Lund [62].



Figura 53. Robot creado usando el LEGO MINDSTORMS RCX [63].

## 1.6 Los incendios forestales en México y sus consecuencias

Nuestro país cuenta con una gran diversidad de ecosistemas, es el 4° país en biodiversidad a nivel mundial, además de ser el 1<sup>er</sup> lugar en reptiles con 717 especies, el 2° en mamíferos con 229 especies y el 1<sup>er</sup> lugar en diversidad de especies del género *Pinus*, el cual es de gran importancia para la industria forestal del país.

El país cuenta con 141.7 millones de hectáreas de bosque, selvas y zonas áridas, representando el 70 % de la superficie de territorio mexicano.

Una de las amenazas de los ecosistemas forestales son los incendios, los cuales solo causan el 2% de la deforestación a nivel nacional, el resto corresponde a las actividades de desmontes con fines agropecuarios [64].

En la obra de Rodríguez (1996) se menciona que entre las 10:00 horas y las 18:00 horas se presenta el mayor peligro de incendio debido al aumento de la temperatura ambiente y la disminución de la humedad relativa [1].

Los tipos de incendios que se presentan en el territorio nacional son principalmente superficiales correspondiéndole un 90%, le siguen los subterráneos con un 3% y por último, los de copa con un 7% del total. Debido a lo anterior la vegetación más afectada son los pastizales, matorrales y vegetación herbácea, los cuales se recuperan en las temporadas de lluvia.

Las causas de los incendios forestales en nuestro país son las mismas descritas en el subcapítulo 1.3, siendo las actividades agropecuarias las principales causas, se muestra a continuación una tabla extraída de la obra de Flores y Rodríguez (2006), donde se expone las causas de los incendios ocurridos en 2003 y su correspondiente aportación porcentual del total. También de la misma obra se extrajo la imagen que representa las principales causas de incendios forestales en diversas regiones del país [64].

Tabla 3. Causas de incendios forestales y su ocurrencia en el año 2003

Causas	Ocurrencia (%)
Actividades agropecuarias	41
Intencional	26
Fumadores	12
Fogatas	11
Otras causas (cultivos ilícitos, rayos, trenes, líneas eléctricas)	6
Actividades silvícolas	2
Derechos de vía	1
Otras actividades productivas	1
Total	100

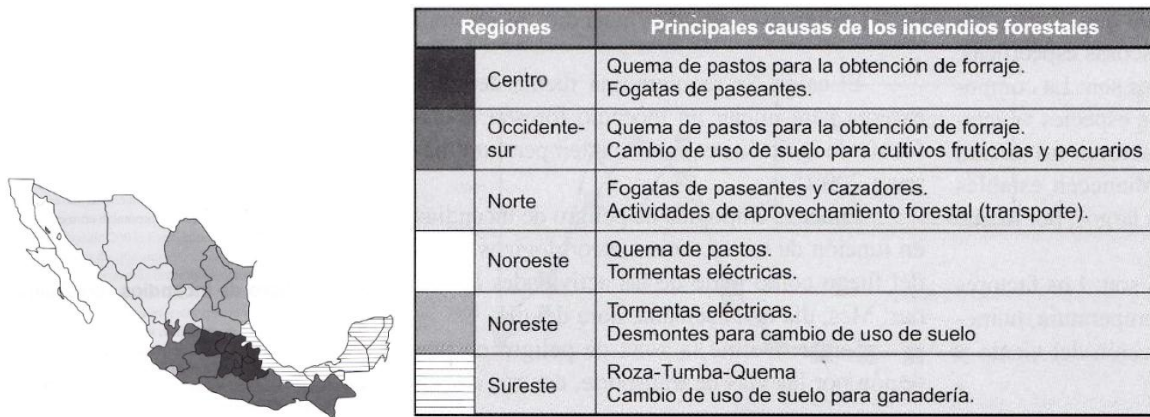


Figura 54. Causas de los incendios por regiones en México [64].

Las consecuencias que tienen los incendios forestales en nuestro país son las mismas descritas en el subcapítulo 1.3, sin embargo, las más graves corresponden a las pérdidas de vidas humanas, por ejemplo, durante el año de 1998, el año más devastador en este tipo de incendios, se registró el fallecimiento de 70 personas.

En la tabla 4 y figura 55 se muestra las entidades donde se presentaron la mayor parte de los incendios forestales del 2011 [65].

Tabla 4. Cifras de las entidades más afectadas por incendios forestales en 2011

Lugar	Entidad Federativa	Número de incendios	Superficie Afectada (Ha)
1	México	2,419	9,283.84
2	Chihuahua	1,687	87,920.05
3	Distrito Federal	1,355	4,384.27
4	Michoacán	1,211	11,840.10
5	Jalisco	646	28,781.00
6	Puebla	640	10,855.64
7	Veracruz	409	3,558.75
8	Tlaxcala	404	1,602.25
9	Hidalgo	342	4,076.38
10	Chiapas	331	14,427.87
Subtotal		9,444	176,730.14
% del Total Nacional		78.30	18.51
Otros		2,617	778,206.26
Total Nacional		12,061	954,936.40

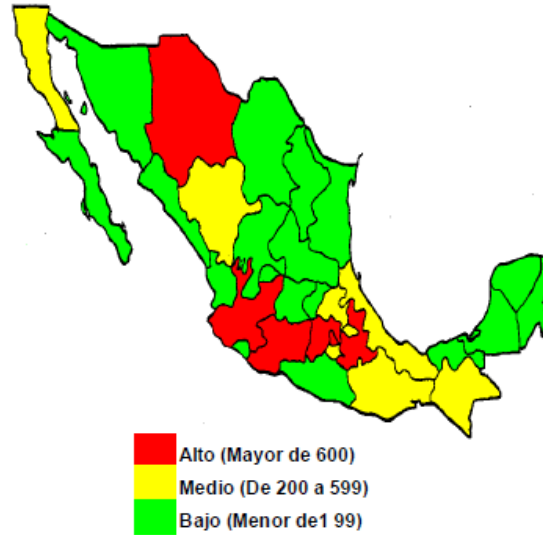


Figura 55. Entidades más afectadas por incendios forestales en 2011 [65].

Con respecto a la superficie afectada por estos siniestros, las entidades que ocuparon los primeros lugares fueron Coahuila, Chihuahua y Quintana Roo, como se muestra en la tabla 5 y figura 56 [65].

Tabla 5. Cifras de las entidades con mayor superficie afectada debido a los incendios forestales en 2011

Lugar	Entidad Federativa	Número de incendios	Superficie Afectada (Ha)
1	Coahuila	161	424,539.73
2	Chihuahua	1,687	87,920.05
3	Quintana Roo	132	79,022.20
4	Sonora	64	62,171.00
5	Zacatecas	132	42,188.50
6	Durango	248	41,999.40
7	Jalisco	646	28,781.00
8	Baja California	304	19,508.56
9	Oaxaca	329	18,165.00
10	Nuevo León	96	17,917.17
Subtotal		3,799	822,212.62
% del Total Nacional		31.50	86.10
Otros		8,262	132,723.79
Total Nacional		12,061	954,936.40

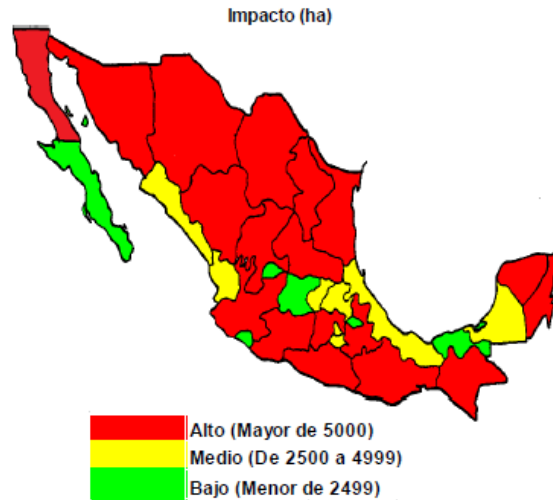


Figura 56. Entidades con mayor superficie afectada por incendios forestales en 2011 [65].

Para el combate de incendios, la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) cuenta con la colaboración de otras organizaciones como son: Secretaría de la Defensa Nacional (SEDENA), Secretaría de Marina (SECMAR), Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA), Secretaría de Gobernación (SEGOB), Secretaría de Seguridad Pública (SSP), Secretaría de Salud (SSA), Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), Procuraduría General de la República (PGR), Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL), Secretaría de Educación Pública (SEP), Secretaría de la Reforma Agraria (SRA), Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA), Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad (CONABIO), Comisión Nacional para el Desarrollo de los Pueblos Indígenas (CDI), Gobiernos estatales y municipales, bomberos y el apoyo de organizaciones sociales, políticas, instituciones académicas y de investigación [64].



## **2. Desarrollo**

### **2.1 Campo de oportunidad**

Como se hizo mención en el marco teórico los incendios forestales tienen diversas consecuencias, algunas positivas y otras negativas; también se explicaron las acciones y métodos utilizados por los combatientes para poder controlar y extinguir los incendios, incluso apoyándose en la robótica de servicio para lograr este objetivo y mantener a salvo a los combatientes de situaciones peligrosas.

En México se han identificado las causas, consecuencias y los tipos principales de incendios forestales, los cuales combate la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) con apoyo de otras instituciones (Secretaría de la Defensa Nacional (SEDENA), Secretaría de Gobernación (SEGOB), Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad (CONABIO), etc.), sin embargo, dentro de los métodos y recursos utilizados para su extinción todavía no involucran el uso de herramientas tecnológicas que permitan la protección de las personas para esta labor.

Con base en lo anterior, se identificó un campo de oportunidad para el diseño e implementación de un dispositivo cuya función sea la prevención de los incendios forestales en México; además de proteger la vida de los combatientes evitando realicen labores de extinción en zonas peligrosas y de difícil acceso.

Para generar un dispositivo que de solución al campo de oportunidad identificado se tomó como base la metodología de diseño que plantea Ulrich (2009), en su libro “Diseño y desarrollo de productos” [66].

### **2.2 Identificación de necesidades**

Una necesidad se define como una característica deseada por el cliente de un producto [66]. Las necesidades para el presente trabajo provienen del campo de oportunidad identificado, que igual como un cliente, requiere que el dispositivo cumpla con la tarea de la prevención de los incendios forestales.

A continuación se presentan las necesidades identificadas para el inicio del diseño del dispositivo:

- 1) El dispositivo previene los incendios forestales.
- 2) El manejo del dispositivo es comprensible para el usuario.
- 3) El dispositivo opera de forma autónoma.
- 4) El dispositivo utiliza un método convencional para combatir el incendio.
- 5) El método empleado por el dispositivo evitará hacer uso de elementos nocivos para el medio ambiente.
- 6) El dispositivo opera correctamente sin importar el estado del medio que lo rodea.
- 7) El tiempo en que el dispositivo detecta y extingue el fuego es mínimo.
- 8) El volumen y peso del dispositivo es mínimo.

### **2.3 Planteamiento de las especificaciones**

Una vez identificadas las necesidades del campo de oportunidad, es necesario tener una descripción más detallada de lo que tiene que realizar el dispositivo para satisfacerlas, esto último se conoce como especificación.

Las especificaciones están compuestas por una métrica y un valor, la primera se refiere a la medición de una magnitud como es la longitud, el tiempo, la presión, etc., y el valor corresponde a la cantidad de dicha métrica, esta puede estar expresada en un valor único, un rango o una desigualdad [66].

Existen dos tipos de especificaciones que son los objetivos y las finales. Las primeras se establecen después de identificar las necesidades del cliente, en ellas se observan las aspiraciones del equipo de trabajo sobre la realización del producto, sin conocer las limitaciones que impondrá su construcción. Las especificaciones finales se establecen una vez seleccionado el concepto del producto y son evaluadas junto con las especificaciones objetivo, las restricciones reales y los costos de producción.

Con base en las necesidades identificadas para el dispositivo, a continuación se muestra la tabla 6 con las especificaciones objetivo, en la que se indica la necesidad a la que esta ligada la especificación, la unidad con la que se medirá y se asigna a criterio del diseñador una calificación de importancia, considerando que especificaciones permiten al dispositivo cumplir su función de prevenir incendios forestales, los valores van del 1 al 5, siendo el 1 la menor importancia y el 5 para la de mayor importancia.

Tabla 6. Especificaciones objetivo

Número de especificación	Especificación	Número de necesidad relacionada	Unidad	Importancia
1	Número de incendios	1	Numérico	5
2	Instrucciones claras y detalladas	2	Subjetivo	2
3	Número de intervenciones del usuario	3 , 6	Numérico	4
4	Lista de instrumentos de combate de incendios forestales	4	Lista	3
5	Evaluación de las propiedades del suelo	5	Lista	2
6	Pruebas de desempeño	6	Lista	4
7	Tiempo de detección	7	Minuto	5
8	Tiempo de extinción	7	Minuto	5
9	Peso del modelo	8	Kilogramo	4
10	Dimensiones del dispositivo	8	Metro	4

La especificación del número de incendios implica que la cantidad de los mismos, dentro de una zona determinada, es el menor posible. Al realizar esto, el dispositivo cumpliría el objetivo del campo de oportunidad identificado, que es prevenir incendios forestales, por lo cual se le asigna la calificación más alta debido a que es muy importante el cumplimiento de esta especificación.

Con base en la comprensión que tenga el usuario sobre las instrucciones de funcionamiento del dispositivo, se evaluará su manejo, por lo cual se le asigna una unidad subjetiva.

El número de intervenciones que realice el usuario para asegurar el funcionamiento del dispositivo, determinará su grado de autonomía y su desempeño en cualquier medio.

En las necesidades identificadas se mencionó emplear algún método convencional para combatir el incendio, éste corresponde al uso de alguno de los instrumentos utilizados por los brigadistas durante las labores de extinción, por lo cual es necesario considerar una lista de estos instrumentos para seleccionar el más efectivo. Después de utilizar el instrumento, se tendría que realizar un análisis de las propiedades del entorno en donde opere el dispositivo con la finalidad de determinar si su empleo causa algún daño al mismo, aunque para el presente trabajo no se contempla dicha evaluación.

La capacidad del dispositivo para operar independientemente del estado del medio que lo rodea se determinará mediante una serie de pruebas como son la movilidad sobre terrenos irregulares, funcionamiento bajo la lluvia, entre otras.

Otras especificaciones que recibieron una mayor importancia corresponden a los tiempos de detección y extinción del fuego, debido a que una detección oportuna de un incendio en su etapa inicial y su pronta extinción asegura que el incendio no se propague a un área mayor y, por lo tanto, sea más difícil de controlar.

Por último, se tienen las especificaciones correspondientes al peso y las dimensiones del dispositivo, ya que el primero determinara su capacidad para desplazarse a través de los terrenos sin complicaciones. Y con base en las dimensiones del mismo, se decidirá si es posible transportarlo hasta su área de trabajo o que el mismo llegue a ese lugar.

## **2.4 Generación de conceptos**

Una vez que se conocen las necesidades y especificaciones a satisfacer por un producto, el siguiente paso es la generación de conceptos, que proporcionan una idea del mismo en cuanto a su forma, las tecnologías que empleará y como éstas se acoplaran para realizar la función deseada. Es posible que en éste proceso surjan varios conceptos, por lo que será necesario realizar una selección para determinar cuales se implementaran físicamente.

Determinadas las especificaciones que debe poseer el dispositivo, se procede a realizar el concepto del mismo considerando que dentro del campo de oportunidad se menciona que el dispositivo debía realizar la prevención de incendios forestales y proteger la vida de los brigadistas, al evitar que realicen labores de extinción en zonas peligrosas y de difícil acceso; para que el concepto logre lo anterior se toma en cuenta la información presentada en el marco teórico en donde se exponen las actividades y medios que se utilizan para el combate de incendios forestales y también considera el uso de la robótica de servicio.

Dentro de los medios utilizados por los brigadistas para el combate de incendios forestales se encuentran las autobombas, los helicópteros y la maquinaria pesada. Se descarta la opción del helicóptero para el concepto a generar, debido a que la única forma para poder desplazarse éste será sobre la superficie de un terreno.

Para lograr el objetivo de proteger la vida de los brigadistas durante las labores de extinción se consideró el uso de la robótica de servicio, ya que un robot realizará las acciones de combate del incendio sin poner en riesgo la vida de una persona, es por esto que los robots móviles, como son el LUF – 60 y el Thermite, comienzan a tener una mayor aplicación en estas situaciones.

Para el concepto del dispositivo se toman como base las características con las que cuentan los dos robots mencionados anteriormente, entre ellas: el evitar que las personas se acerquen a la zona del incendio, ser operados a distancia, tener una mayor capacidad de trabajo para realizar su labor y poder desplazarse sobre cualquier terreno, estas dos últimas propiedades son compartidas por las autobombas y maquinaria pesada utilizadas por los brigadistas.

Con base en lo anterior, se decide realizar un robot móvil, que esté en constante vigilancia, dentro de un área determinada, y detecte la presencia de fuego en su etapa inicial para dirigirse hacia él; cuando el robot esté frente al fuego, utilizará un método de extinción para evitar su propagación, posteriormente continuará con la vigilancia.

El concepto anterior puede ser descompuesto en diversos subsistemas, los cuales pueden ser resueltos de forma individual, sin olvidar las interacciones entre ellos, de una mejor manera en vez de querer resolverlo como un todo. La unión de las soluciones encontradas para cada una de ellas proporcionará la solución al problema. La primera forma de visualizar el concepto es a través del diagrama de caja negra, como se presenta en la figura 57.

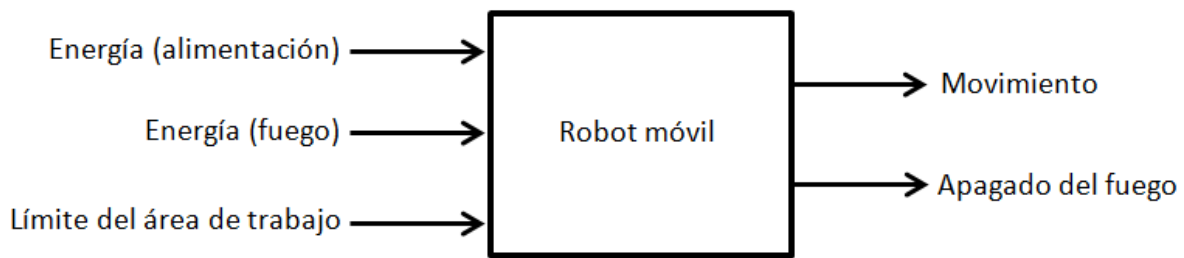


Figura 57. Diagrama de caja negra del robot móvil.

En la figura anterior, se observan las entradas del robot móvil:

- Energía (alimentación): permite el funcionamiento del robot móvil, para que realice todas sus funciones.
- Energía (fuego): la existencia de esta entrada, indica al robot móvil sobre la presencia de un incendio.
- Límite del área de trabajo: es una indicación de que el robot está por salir de su zona de vigilancia.

Como salidas del robot móvil se tienen:

- Movimiento: es la trayectoria que realiza el robot para desplazarse dentro de su área de trabajo o para dirigirse hacia el incendio detectado.
- Apagado del fuego: acciones realizadas por el robot móvil para extinguir un incendio.

Una vez determinadas las entradas y salidas del robot móvil, se procede a la visualización más detallada de su caja negra para conocer los subsistemas que lo componen. El diagrama de subsistemas se presenta en la figura 58.

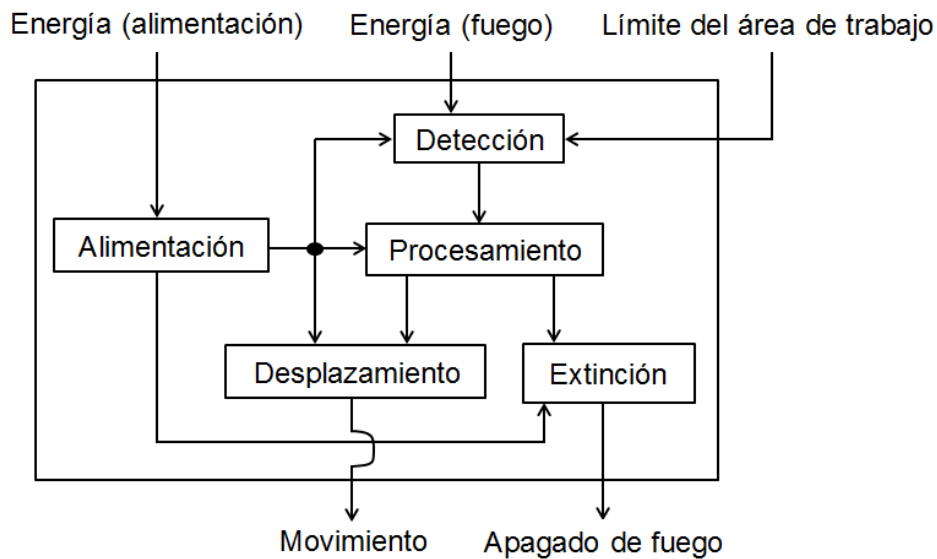


Figura 58. Diagrama de subsistemas del robot móvil.

En la figura anterior se observan los siguientes subsistemas:

- Subsistema de alimentación: proporciona la energía adecuada a los otros subsistemas para su funcionamiento.
- Subsistema de detección: permite la medición de la energía proveniente del fuego como lo son el incremento en la temperatura del medio y la radiación proveniente de las llamas, además determina si el robot se encuentra en los límites de su área de trabajo, la información recopilada es enviada al subsistema de procesamiento.
- Subsistema de procesamiento: la información que genera el subsistema de detección será analizada por éste subsistema, que será capaz de tomar decisiones y generar información para el funcionamiento de los subsistemas de desplazamiento y extinción del robot.
- Subsistema de desplazamiento: éste subsistema requiere de la información proporcionada por el subsistema de procesamiento y de la energía de alimentación

para permitirle al robot moverse a través del terreno en la búsqueda de fuego o modificar su trayectoria al localizar uno cercano.

- Subsistema de extinción: este subsistema realizará un conjunto de acciones con la finalidad de sofocar el fuego detectado, únicamente cuando el robot está a una distancia apropiada del fuego.

Lo siguiente a realizar es la búsqueda de soluciones que permitan a cada subsistema del robot cumplir con su función descrita anteriormente, en la tabla 7 se presentan algunas propuestas de solución que se encontraron para cada subsistema.

Tabla 7. Propuesta de soluciones para los subsistemas del robot móvil.

Subsistema	Soluciones para el subsistema
Alimentación	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baterías</li> <li>• Corriente alterna y reguladores de voltaje</li> <li>• Panel fotovoltaico</li> <li>• Celda de combustible</li> </ul>
Detección	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Termistor</li> <li>• Sensor de temperatura (LM35)</li> <li>• Fotorresistencia (LDR)</li> <li>• Sensor piroeléctrico</li> <li>• Sensor infrarrojo reflectivo</li> </ul>
Procesamiento	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tarjeta arduino</li> <li>• Microcontrolador PIC</li> <li>• Bloque NXT</li> </ul>
Desplazamiento	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ruedas</li> <li>• Ruedas especiales</li> <li>• Oruga</li> <li>• Locomoción con patas</li> </ul>
Extinción	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pala</li> <li>• Batefuego</li> </ul>

A continuación se describen las soluciones propuestas en la tabla 7:

- *Subsistema de alimentación*

*Batería:* es un dispositivo que almacena energía eléctrica, la cual devuelve posteriormente casi en su totalidad durante el proceso de descarga, este ciclo puede repetirse un determinado número de veces. Su principio de funcionamiento se basa en el proceso reversible llamado reducción – oxidación (redox), en el cual uno de los componentes se oxida (pierde electrones) y el otro se reduce (gana electrones), cambiando únicamente su estado de oxidación esto les permite regresar a su estado original bajo las condiciones adecuadas. Estos dispositivos se encuentran en diversas formas y tamaños, pero las más

conocidas comercialmente son la pila alcalina y la batería de níquel – cadmio. La primera cuenta con las características de producir un voltaje nominal de 1.5 [V] y poder obtener múltiplos de este voltaje se conectan varias pilas en serie, la cantidad de corriente que puede producir es proporcional a su tamaño aunque una regla general indica que la batería alcalina AA puede entregar 700 [mA] sin un calentamiento significativo. Para las baterías de níquel – cadmio la configuración de sus materiales les permite recargarse un vez que está agotada, el voltaje que proporcionan es de 1.2 [V] y la corriente es de 0.5 a 1 [A] en su presentación AA [67] [68].



Figura 59. Algunas baterías en el mercado [69].

*Corriente alterna y reguladores de voltaje:* la corriente alterna es un tipo de corriente eléctrica en la cual la magnitud y el sentido varían cíclicamente, su forma de oscilación más utilizada es la sinusoidal debido a que permite una transmisión más eficiente de la energía. Su amplio uso se debe a su facilidad de transformación, permitiendo regular su tensión con la ayuda de un dispositivo llamado transformador, véase figura 4 [70].

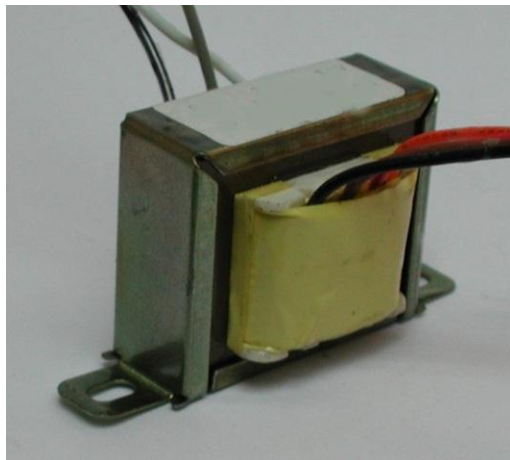


Figura 60. Transformador de línea [71].



Un regulador de tensión o de voltaje, es un dispositivo electrónico utilizado para proteger aparatos eléctricos y electrónicos sensibles a variaciones de diferencia de voltaje o ruido que existe en la corriente alterna. Es común encontrar reguladores integrados, véase figura 61, los cuales proporcionan una gran variedad de voltajes y corrientes de funcionamiento, siendo las más conocidas la serie 78XX para voltajes positivos y la 79XX para voltajes negativos [72] [73].

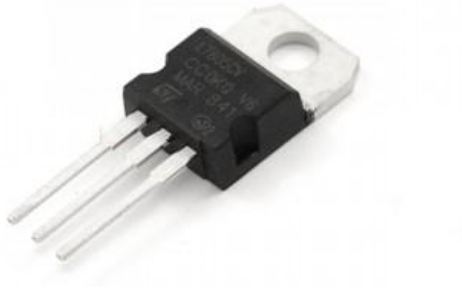


Figura 61. Regulador integrado LM7805 [74].

*Panel fotovoltaico:* está formado por numerosas celdas, llamadas células fotovoltaicas, las cuales se encargan de convertir la luz en electricidad mediante el efecto fotovoltaico en donde la energía luminosa produce cargas positiva y negativa en dos semiconductores próximos de diferente tipo causando un campo eléctrico capaz de producir una corriente. Los materiales típicos para fabricar las celdas son Silicio cristalino y Arseniuro de Galio. Son utilizados en la industria aeroespacial como medio para suministrar energía a un satélite o a una sonda, aunque también se utiliza en la superficie terrestre para proporcionar electricidad a casas o a gran escala por medio de redes de distribución y a diversos aparatos autónomos [75].

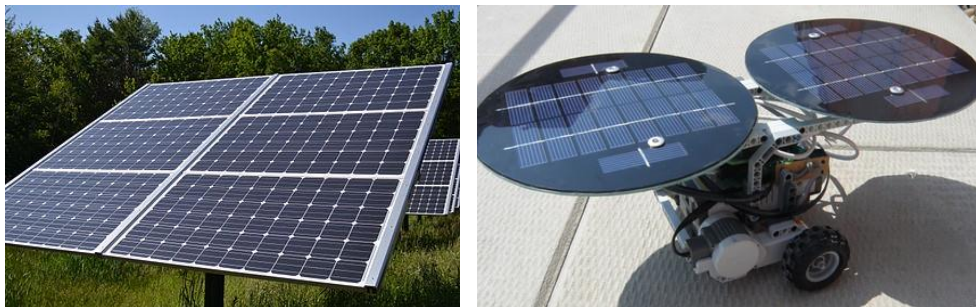


Figura 62. Izquierda, panel fotovoltaico y a la derecha, robot LEGO haciendo uso de dos paneles solares [76] [77].

*Celda de combustible*: es un dispositivo electroquímico de conversión de energía similar a una batería, con la diferencia de poder reabastecer continuamente de los reactivos consumidos, los cuales son por lo general hidrógeno y oxígeno. El voltaje que proporciona en circuito abierto es de 1.2 [V], para crear un voltaje mayor las celdas se agrupan combinándolas en serie y en paralelo conocido como pila de células de combustible (Fuel Cell Stack). Sus aplicaciones son en naves espaciales, estaciones meteorológicas, en localidades rurales y en usos militares, aunque en los últimos años se han realizado numerosos prototipos de vehículos impulsados por esta tecnología como son automóviles, submarinos y aviones [78].

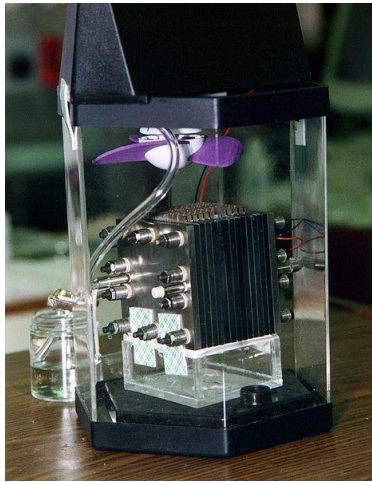


Figura 63. Celda de combustible [79].

- *Subsistema de detección*

*Termistor*: es un sensor resistivo de temperatura cuyo funcionamiento se basa en el cambio de la resistencia de un semiconductor con la temperatura. Existen dos tipos de termistores: los de coeficiente de temperatura negativo y los de coeficiente de temperatura positivo, al aumentar la temperatura del medio el primero disminuye su resistencia y el segundo lo contrario. Los más utilizados para medición de temperatura son los de coeficiente negativo.

Los valores más comunes para estos son de 2252 [ $\Omega$ ], 5 [K $\Omega$ ] y 10 [K $\Omega$ ]. Su principal desventaja es que presenta un comportamiento no lineal [80] [81].



Figura 64. Termistores de 10 [K $\Omega$ ] [82].

*LM35*: es un sensor de temperatura con un rango de medición desde los  $-55[^\circ C]$  hasta los  $150[^\circ C]$ , cuya salida es lineal y proporcional a  $10[mV]$  por cada grado centígrado, otras características importantes de este dispositivo son: tener una precisión garantizada de  $0.5[^\circ C]$  a  $25[^\circ C]$ , el rango de su voltaje de operación es de los 4 a los 30 volts, es baja su impedancia de salida y corriente de alimentación, su costo también es bajo, se encuentra en diversas presentaciones aunque la más común es encontrarlo en el encapsulado TO – 92 y no requiere de otros circuitos para calibrarlo [83].

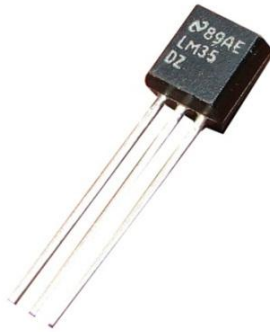


Figura 65. Sensor LM35 [84].

*Fotorresistencia*: es un componente electrónico que disminuye su resistencia con el aumento de luz incidente. También es llamado fotoconductor, célula fotoeléctrica o resistor dependiente de la luz (LDR). EL valor de su resistencia es bajo cuando la luz incide sobre el y muy alto en la oscuridad. Su cuerpo esta formado por dos patillas y una celda hecha de un semiconductor como el Sulfuro de Cadmio, debido a su capacidad de variar su resistencia según la cantidad de luz, véase figura 10. La celda es capaz de reaccionar a una amplia gama de frecuencias como son el infrarrojo, la luz visible y el ultravioleta. Han sido utilizados en cámaras, medidores de luz, relojes de radio, alarmas de seguridad o sistemas de encendido y apagado del alumbrado de las calles [85].

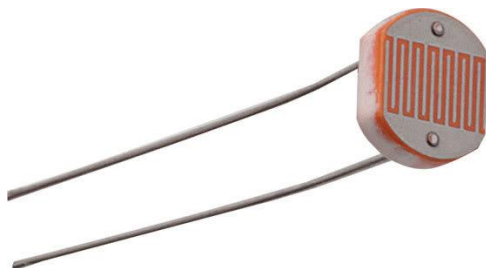


Figura 66. LDR [86].

*Sensor piroeléctrico:* esta constituido por un material cristalino que produce una pequeña carga eléctrica cuando es expuesto al calor en forma de radiación infrarroja. Para medir los cambios en la carga se utiliza un dispositivo FET construido dentro del sensor. Debido a que los elementos de este sensor son sensibles a la radiación en un amplio rango, se agrega una ventana para limitar la radiación de entrada en un rango de 8 a 14 [ $\mu\text{m}$ ]. Son empleados en pirómetros, detección de llamas, analizadores de rayos infrarrojos, etc. [87] [88].



Figura 67. Sensor piroeléctrico [89].

*Sensor infrarrojo reflectivo:* Estos sensores presentan en la cara frontal un led y un fototransistor. La función del fototransistor es medir la radiación proveniente del reflejo de la luz emitida por el led. Es importante resaltar que estos sensores son sensibles a la luz ambiente afectando las medidas, por lo que es importante que trabajen en ambientes de luz controlada, y que su funcionamiento será diferente dependiendo del tipo de superficie [90].



Figura 68. Ejemplo de un sensor infrarrojo reflectivo: QRD1114 [91].

- *Subsistema de procesamiento*

*Arduino*: Es una plataforma de hardware libre diseñada para facilitar el uso de la electrónica en proyectos multidisciplinarios. La placa está constituida por un microcontrolador ( $\mu\text{C}$ ) Atmel AVR y terminales que permiten el uso de varios de sus periféricos. Entre los  $\mu\text{C}$  más utilizados por su sencillez y bajo costo permitiendo el desarrollo de múltiples diseños se encuentran el Atmega168, Atmega328, Atmega1280 y Atmega8, en la tabla 8 se presenta las especificaciones para los tres primeros.

Cuenta con un set de instrucciones que permiten una programación basada en lenguaje de alto nivel, incluso pueden usarse otros programas ajenos a Arduino para su programación como son Labview, Python, entre otros [92].

Tabla 8. Especificaciones de los  $\mu\text{C}$  Atmega.

<b>Especificaciones</b>	<b>Atmega168</b>	<b>Atmega328</b>	<b>Atmega1280</b>
Voltaje operativo [V]	5	5	5
Pines de entrada/salida digital	14	14	54
Pines de PWM	6	6	14
Pines de entrada analógica	6	6	16
Intensidad de corriente [mA]	40	40	40
Memoria Flash [KB]	16	32	128
SRAM [kB]	1	2	8
EEPROM [kB]	0.5	1	4
Frecuencia de reloj [MHz]	16	16	16



Figura 69. Placa Arduino Uno [93].

*Microcontrolador PIC*: Pertenece a una familia de  $\mu\text{C}$  fabricados por Microchip Technology Inc. En la tabla 9 se muestran las especificaciones de tres PIC (Controlador de Interfaz Periférico) [94].

Tabla 9. Especificaciones de algunos  $\mu$ C PIC [95] [96] [97].

Especificaciones	PIC16C57	PIC16F877	PIC18F4550
Voltaje operativo [V]	2.5 – 6.25	2 – 5.5	2 – 5.5
Pines de entrada/salida digital	20	33	35
Módulos de PWM	NO	2	1
Pines de entrada analógica	NO	8	13
Número de instrucciones	33	35	75
Temporizador	1	3	4
RAM [bytes]	72	368	2,048
EEPROM [bytes]	2000	256	256
Frecuencia de reloj [MHz]	40	20	48
Canal USB	No	No	Si

Con respecto al software, Microchip proporciona un entorno de desarrollo llamado MPLAB, que incluye un simulador software y un ensamblador. Otras empresas como microEngineering Labs y CCS, Inc. (Custom Computer Services, Inc.) realizan compiladores en lenguaje C y BASIC. [94] [98] [99]



Figura 70. PICkit – 3 [100].

*Bloque NXT:* Es un dispositivo que pertenece a la plataforma de LEGO MINDSTORMS e integra toda la parte lógica y electrónica que permite las acciones del dispositivo que se esté construyendo. El sistema cuenta con una variedad de sensores fabricados por la empresa LEGO, aunque también existen otros que son diseñados por otras empresas, por ejemplo Hitechnic, ampliando el número de variables físicas que se pueden medir con el bloque. En la tabla 10 se comparan las especificaciones entre el bloque NXT y su antecesor el bloque RCX.

Tabla 10. Especificaciones del bloque RCX y el bloque NXT

Especificaciones	Bloque RCX	Bloque NXT
Microcontrolador	Hitachi H8/3292	ARM7 de 32 bits
Memoria ROM [KB]	16	256
Memoria RAM [kB]	32	64
Pantalla	LCD	LCD
Comunicación con CPU	Infrarrojo	USB
Alimentación	6 baterías AA	6 baterías AA o Batería recargable 9693
Puertos de entrada para sensores	3	4
Puertos de salida para motores	3	3

Puede ser programado mediante el software NXT-G, el cual contiene el firmware del dispositivo y un programa que simula un árbol de decisiones, aunque también se pueden utilizar otras interfaces para programarlo como son: Labview, LejOS, RobotC, entre otros [101].



Figura 71. A la izquierda, bloque RCX y a la derecha, bloque NXT [102] [103].

- *Subsistema de desplazamiento*

*Rueda:* es una pieza mecánica circular que gira alrededor de un eje. Se pueden clasificar en tres tipos por la posición del eje de rotación respecto a la rueda [104] [105].

La rueda simple permite solamente trasladarse en la dirección de la velocidad de la rueda, por lo que su eje de rotación no puede moverse salvo en la dirección del desplazamiento.

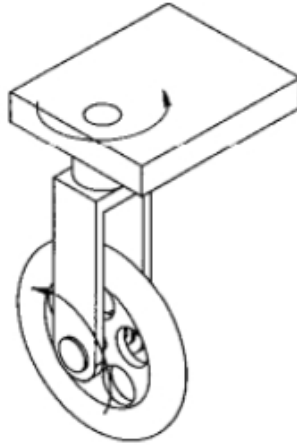


Figura 72. Rueda tipo convencional simple [105].

Rueda tipo Forward Offset Steered, también conocida como castor, permite que el eje de rotación se mueva en cualquier dirección sin posicionar la rueda anteriormente.

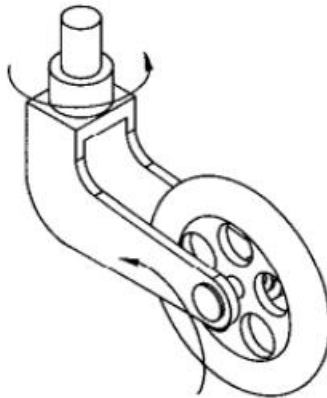


Figura 73. Rueda convencional de tipo Forward Offset Steered [105].

Por último, la rueda tipo lateral Offset Steered permite que el eje rote sobre el punto de contacto entre la rueda y el suelo.



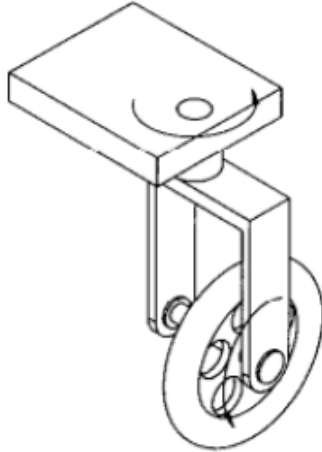


Figura 74. Rueda convencional de tipo lateral Offset Steered [105].

*Ruedas especiales:* Se basan en la idea de poseer una componente activa que provee tracción en una dirección y una componente pasiva en la otra dirección. El uso de estas ruedas le permite al dispositivo que las posea realizar trayectorias complejas que estén compuestas por un desplazamiento y rotación simultáneamente, para así poder alcanzar el destino con un ángulo deseado. Las ruedas que cuentan con estas características son las ruedas Universales, las ruedas Mecanum y las ruedas Esféricas.

Las ruedas Universales cuentan con rodillos ubicados alrededor de la rueda principal, con la finalidad de que éstas proporcionen tracción en otra dirección a la que sigue la rueda. Entre las características de estas ruedas se encuentran que su capacidad de carga está limitada por el único punto de contacto entre la rueda y la superficie sobre la que se desliza, su diseño es simple y solo necesita un motor por cada rueda, el radio de la rueda puede ser variable, la fricción es baja y se tiene una mayor sensibilidad a la superficie respecto de otros tipos de rueda.



Figura 75. Rueda Universal [106].

Las ruedas Mecanum son similares a las ruedas Universales con la diferencia que los rodillos poseen una rotación de cierto ángulo, generalmente de  $45^\circ$ , respecto de la circunferencia exterior de la rueda. Estas ruedas tienen como propiedades el tener una capacidad de carga reducida, su diseño es complejo, el radio de la rueda es constante, la fricción es baja y tienen una mayor sensibilidad a la superficie respecto de otros tipos.



Figura 76. Rueda Mecanum [107].

Las ruedas esféricas son impulsadas a través de motores los cuales mediante fricción aplican una fuerza sobre la esfera. Su ventaja es permitir la movilidad en todas las direcciones, pero su desventaja es que se debe ejercer una gran potencia sobre los motores para lograr la fricción deseada en algunos casos [105].



Figura 77. Robot utilizando una rueda esférica. [108]

*Oruga:* consiste en un conjunto de eslabones modulares que permiten un desplazamiento estable aún en terrenos irregulares.

La mayoría de las orugas forman parte de un cinturón flexible con un conjunto de eslabones rígidos unidos unos a otros fuertemente, estos últimos permiten al vehículo distribuir su peso en una superficie mayor a comparación del uso de ruedas, haciendo posible el desplazarse en un número mayor de superficies sin hundirse por su propio peso [109].

Son utilizadas en maquinaria de uso militar (tanques), en vehículos para la construcción y la agricultura (grúas, tractores, excavadoras) o para transportar al transbordador espacial hasta su base de lanzamiento [110].



Figura 78. Robot autónomo NR3 utilizando orugas [111].

*Locomoción con patas:* los dispositivos que cuentan con este sistema de desplazamiento superan con facilidad los problemas de los terrenos irregulares, gracias a los grados de libertad que presentan sus articulaciones. De acuerdo a su número de patas pueden denominarse como bípedos, cuadrúpedos, hexápodos y octópodos [112].

Entre las desventajas de utilizar esta tecnología se encuentra el complejo manejo por el número de grados de libertad, el mantener la estabilidad y el consumo de grandes cantidades de energía [113].

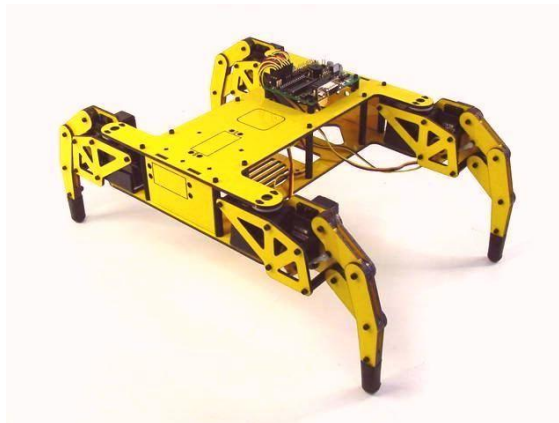


Figura 79. Robot cuadrúpedo [114].

- *Subsistema de extinción*

*Pala:* herramienta compuesta por una pieza de acero templado cóncava con un agujero en donde se inserta un mango de madera. Es empleada en el combate de incendios forestales por ser una herramienta efectiva para arrojar tierra sobre la base de las llamas, ya sea para aislar el combustible del aire o para bajar su temperatura, aunque también puede ser utilizada para cortar, cavar y raspar [36].

*Batefuegos*: herramienta compuesta por una pala de goma al final de un mango metálico, en su interior cuenta con un fleje para proporcionarle rigidez a fin de recuperar su posición inicial. Se utiliza golpeando con la parte de goma la base de las llamas y dejándolo unos instantes sobre el combustible, realizando así la acción de sofocación del fuego [34] [36].

## 2.5 Combinación de soluciones para los subsistemas

Una vez que se conocen las soluciones para cada subsistema del robot móvil, se procede a realizar las combinaciones de las mismas para obtener las configuraciones que le permitan cumplir con su objetivo, es decir, la prevención de incendios forestales.

Para lograr lo anterior se utiliza el método de tabla de combinación de conceptos, en cuyas columnas se encuentran los subsistemas del robot y como entradas las soluciones encontradas, como se observa en la tabla 11.

Tabla 11. Tabla de combinación de conceptos para el robot móvil.

Subsistema de alimentación	Subsistema de detección	Subsistema de procesamiento	Subsistema de desplazamiento	Subsistema de extinción
Baterías	Termistor	Tarjeta Arduino	Ruedas	
Corriente alterna y reguladores de voltaje	LM35		Ruedas especiales	Pala
Panel fotovoltaico	LDR	Microcontrolador PIC	Oruga	Batefuego
Celda de combustible	Sensor piroeléctrico			
	Sensor infrarrojo reflectivo	Bloque NXT	Locomoción con patas	

Para realizar la primera combinación de las soluciones propuestas en la tabla anterior se considera que elementos pueden trabajar correctamente en conjunto, ya para las subsecuentes combinaciones solo se realizan algunos cambios explicando que ventaja se obtiene de ello.

Tabla 12. Soluciones para la combinación número 1

Subsistema de alimentación	Subsistema de detección	Subsistema de procesamiento	Subsistema de desplazamiento	Subsistema de extinción
Corriente alterna y reguladores de voltaje	LM35 LDR Sensor infrarrojo reflectivo	Tarjeta Arduino	Ruedas	Pala

En esta combinación se presenta el uso de la corriente alterna y reguladores de voltaje para el subsistema de alimentación, como se mencionó la corriente alterna es la más utilizada debido a su eficacia de transmisión además de poder ser regulada con la ayuda de un transformador, pero como el voltaje de salida de éste último continua siendo grande respecto a lo que necesitan los demás subsistemas para su funcionamiento esto podría llegar a dañarlos, haciendo necesario el uso de los reguladores de voltaje que disminuyan el mismo hasta el valor óptimo para el funcionamiento adecuado de todos los dispositivos y sensores.

El sistema de detección hará uso de un conjunto de fotorresistencias (LDR), para percibir la radiación térmica proveniente del fuego dentro del área que vigila el robot, las señales de estos sensores serán enviadas a los canales analógicos de la tarjeta Arduino para su procesamiento.

Una vez detectado el fuego se empleará el sensor LM35 para determinar su localización en la trayectoria del robot, esto será posible ya que el voltaje de salida del sensor es proporcional a la temperatura del medio que lo rodea, de acuerdo con Zárate (2004) dependiendo de la zona del incendio que se observe se registraran valores distintos de temperatura como se muestra en la figura 80. Por lo tanto, cuando el robot avance y se acerque al fuego el voltaje de salida del sensor se elevará y será procesada por un puerto digital de la tarjeta Arduino [12].

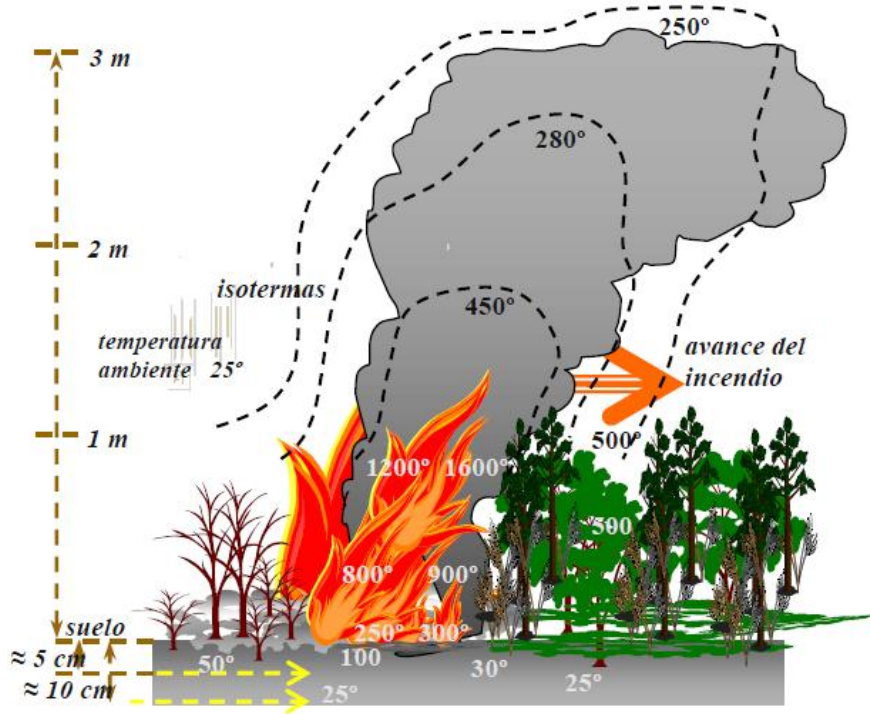


Figura 80. Distribución de temperaturas en el frente de un incendio de matorral. [12]

Para resolver el problema de que el robot permanezca dentro de un área de trabajo, se utiliza un sensor infrarrojo reflectivo, como el QRD1114, el cual monitorea el terreno durante su trayectoria para localizar una línea indicando que está a punto de salir de dicha área, la indicación será una señal que será enviada a la tarjeta Arduino.

Para el sistema de procesamiento se seleccionó para esta combinación a la tarjeta Arduino, debido a su fácil manejo y programación, a ella ingresarán las señales provenientes de los sensores mencionados y con base a una serie de instrucciones proporcionará las señales necesarias para el funcionamiento de los motores en los subsistemas de desplazamiento y extinción.

Para realizar el desplazamiento del robot se seleccionó el uso de llantas, las cuales estarán acopladas a motores cuyo funcionamiento estará determinado por las señales que proporcione la tarjeta Arduino.

Por último, para el sistema de extinción se optó por hacer uso de un conjunto de palas unidas de forma perpendicular al eje de un motor. Cuando el sensor LM35 determine que el fuego está frente al robot, la tarjeta Arduino activará dicho motor, con lo cual la pala que pase por el suelo recogerá tierra y la arrojará hacia el fuego debido a la fuerza centrípeta que genera el movimiento de la pala.

Tabla 13. Soluciones para la combinación número 2

Subsistema de alimentación	Subsistema de detección	Subsistema de procesamiento	Subsistema de desplazamiento	Subsistema de extinción
Baterías	LM35 LDR Sensor infrarrojo reflectivo	Bloque NXT	Oruga	Batefuego

El uso de baterías para esta combinación tiene la ventaja de evitar el uso de un cable de conexión como el caso de la corriente alterna permitiéndole al robot tener un rango de desplazamiento que no este limitado por la longitud del mismo. Otra ventaja de su empleo es el hecho de que pueden recargarse disminuyendo la adquisición de nuevos consumibles y la cantidad de desechos al medio ambiente.

Ya que en el sistema de procesamiento se hace uso del bloque NXT, la energía proveniente de las baterías deberá ser regulada al voltaje necesario para los sensores que se utilizaran, además de proporcionarle la energía adecuada a los motores de las orugas y el batefuego.

Para el subsistema de detección se hará uso de los mismos sensores propuestos en la combinación número 1, sus señales ingresaran al bloque NXT para que el robot con base en su programación ponga en funcionamiento los motores permitiéndole desplazarse dentro de su área de servicio y extinguir el fuego.

El empleo de orugas en esta combinación permite una mayor distribución del peso del dispositivo sobre la superficie, lo cual representa una ventaja en la tracción y desplazamiento del modelo comparado con el uso de ruedas, ya que estas concentran todo el peso en un solo punto

Ya que el objetivo del robot es prevenir el desarrollo de incendio, el cual en su etapa inicial no tiene grandes dimensiones, el emplear el batefuego asegura que se sofocará al mismo con un mínimo de golpes sobre el combustible ardiendo comparado con la cantidad de intentos que realizarían las palas al arrojar tierra antes de extinguirlo.

Tabla 14. Soluciones para la combinación número 3

Subsistema de alimentación	Subsistema de detección	Subsistema de procesamiento	Subsistema de desplazamiento	Subsistema de extinción
Baterías	Termistor Sensor piroeléctrico Sensor infrarrojo reflectivo	Bloque NXT	Oruga	Batefuego

Esta combinación es una variación de la número 2, únicamente con la diferencia del uso del termistor y el fototransistor para el subsistema de detección.

El termistor cumplirá la misma función del LM35, la detección del fuego durante el avance del robot. La alta sensibilidad de éste sensor permitirá mandar una señal de voltaje con mejores características al bloque NXT cuando el sensor se encuentre frente al fuego, como consecuencia de esto el robot se detendrá y se activará el motor con el batefuego incorporado.

El sensor piroeléctrico permitirá identificar la dirección en la cual se detecte la presencia de radiación infrarroja proveniente de una fuente de fuego dentro del área de trabajo para así indicar al bloque NXT que debe realizar un giro para orientar su desplazamiento en la misma dirección, posteriormente avanzará hasta que los termistores realicen la función descrita anteriormente.

Tabla 15. Soluciones para la combinación número 4

Subsistema de alimentación	Subsistema de detección	Subsistema de procesamiento	Subsistema de desplazamiento	Subsistema de extinción
Celda de combustible	Termistor LDR Sensor infrarrojo reflectivo	Microcontrolador PIC	Ruedas especiales	Batefuego



Para esta combinación se hace uso de la celda de combustible para proveer energía a los demás subsistemas y en comparación a las otras propuestas de solución ésta permite reabastecer continuamente los reactivos que se consumen para generar electricidad, como es el hidrógeno y el oxígeno.

Los sensores empleados en el subsistema de detección proporcionan información al  $\mu\text{C PIC}$ , con la finalidad de que este determine que motores se deben activar en el subsistema de desplazamiento o el motor que tiene incorporado el batefuego.

El empleo de ruedas especiales permite al robot hacer su movimiento más simple, es decir, no tener que girar primero para cambiar su dirección como sucede al emplear ruedas convencionales o las orugas. El tiempo que se ahorra al no realizar esta acción, puede ser empleado por el robot para llegar al fuego lo más pronto posible y evita su propagación en una mayor área.

## 2.6 Selección del concepto

A partir de las combinaciones que permiten a cada subsistema cumplir con su función y conocer sus características, se procedió a determinar las ventajas y desventajas de cada una de ellas, las cuales se presentan en las siguientes tablas, a fin de crear el modelo funcional de un concepto.

Tabla 16. Ventajas y desventajas de las soluciones propuestas en la combinación número 1

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Suministro permanente de energía.</li> <li>• La señal de salida de los sensores requiere poco acondicionamiento.</li> <li>• Programación del robot mediante lenguaje de alto nivel.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Inactividad del robot durante cortes de luz.</li> <li>• Desplazamiento limitado por la longitud del cable.</li> <li>• Necesidad de una fuente de alimentación.</li> <li>• Ruido en la señal de salida de los sensores por factores ambientales.</li> <li>• El uso de librerías ocasiona un retraso en la ejecución de instrucciones.</li> <li>• Hundimiento del robot en algunas superficies debido a la concentración del peso en un punto.</li> <li>• Mayor tiempo utilizado en las acciones de extinción.</li> </ul>

Tabla 17. Ventajas y desventajas de las soluciones propuestas en la combinación número 2

<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Autonomía del robot gracias a su sistema de alimentación.</li> <li>• No es necesario el empleo de otros componentes en la regulación de voltaje para sensores y actuadores.</li> <li>• La señal de salida de los sensores requiere poco acondicionamiento.</li> <li>• Programación del robot mediante bloques.</li> <li>• Mejor distribución del peso del robot sobre la superficie.</li> <li>• Menor número de acciones para realizar la extinción de fuego.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ruido en la señal de salida de los sensores por factores ambientales.</li> <li>• Tiempo limitado de funcionamiento de la batería.</li> </ul>

Tabla 18. Ventajas y desventajas de las soluciones propuestas en la combinación número 3

<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Autonomía del robot gracias a su sistema de alimentación.</li> <li>• No es necesario el empleo de otros componentes en la regulación de voltaje para sensores y actuadores.</li> <li>• La señal de salida de los sensores requiere poco acondicionamiento.</li> <li>• Mejora en la detección de fuego al utilizar sensores para registrar la radiación infrarroja del medio.</li> <li>• Programación del robot mediante bloques.</li> <li>• Mejor distribución del peso del robot sobre la superficie.</li> <li>• Menor número de acciones para realizar la extinción de fuego.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ruido en la señal de salida de los sensores por factores ambientales.</li> <li>• Tiempo limitado de funcionamiento de la batería.</li> </ul>

Tabla 19. Ventajas y desventajas de las soluciones propuestas en la combinación número 4

<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reabastecimiento continuo de los reactivos empleados en la generación de energía.</li> <li>• Menor número de acciones para realizar la extinción de fuego.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Uso de varias celdas de combustible, a fin de obtener el voltaje necesario para el funcionamiento del robot.</li> <li>• Ruido en la señal de salida de los sensores por factores ambientales.</li> <li>• Es necesario un control muy complejo para realizar los desplazamientos del robot.</li> </ul>

De las tablas anteriores, se observa que las combinaciones número 2 y número 3, proporcionan un mayor número de ventajas para dar solución al problema a resolver por el robot móvil, es decir, la prevención de incendios.

Otra característica a favor para estas dos combinaciones, es que en ambas se emplean las orugas para el desplazamiento, lo cual coincide con los tractores de cadena empleados por los brigadistas para el combate de los incendios y los robots utilizados para el mismo fin.

La única diferencia entre las dos combinaciones es la tecnología de sensado. Como el LDR y el LM35 no requieren mucho acondicionamiento de su señal de salida, entonces se decide realizar el modelo funcional del concepto de la combinación número 2 (Baterías, LM35, LDR, Sensor infrarrojo reflectivo, Bloque NXT, Oruga y Batefuego).

## 2.7 Implementación

Dentro del concepto a implementar se hace uso del ladrillo NXT para el subsistema de procesamiento, el cual es un elemento de la plataforma de desarrollo LEGO MINDSTORMS. LEGO MINDSTORMS consiste en un juego de robótica formado por un conjunto de piezas, sensores y motores, los cuales permiten la construcción a escala de objetos desde los utilizados cotidianamente, como son sillas, hasta la elaboración de medios de transporte y simulación de algunos animales [115].

Entre las ventajas de utilizar la plataforma de LEGO MINDSTORMS se encuentran:

- No se invierte en la manufactura de piezas.
- Permite la construcción de estructuras mecánicas, desde simples hasta aquellas con cierta complejidad.
- La facilidad de ensamble de las piezas permite realizar las iteraciones necesarias hasta obtener la estructura solicitada para la tarea.
- Permite probar el funcionamiento de un modelo, el cual pueda ser desarrollado de forma más robusta en un futuro.

El empleo de esta tecnología permitirá demostrar el principio de funcionamiento que debe realizar el robot móvil para combatir un incendio, ya que en una situación real su capacidad es muy limitada.

A continuación se muestra el proceso realizado para la implementación del modelo funcional, el cual se divide en tres partes: mecánica, electrónica y programación. Y se explican las iteraciones que se realizan en cada etapa para cumplir con la función principal.

### 2.7.1 Mecánica

En este apartado se explica el proceso realizado para la construcción del modelo haciendo uso de las piezas del LEGO MINDSTORMS.

Se comienza la construcción del modelo con la implementación de la oruga para el subsistema de desplazamiento.

LEGO en su catálogo de productos ofrece dos tipos de orugas, ya sea en mono pieza y en multi pieza.

La oruga en mono pieza, como se observa en la figura 81, está hecha de goma lo que le proporciona una mejor adherencia al terreno, su forma se puede modificar teniendo presente en no exceder la longitud máxima predefinida [116].



Figura 81. Oruga mono pieza de Lego [116].

La oruga en multi pieza está conformada por un conjunto de eslabones, como se muestran en la figura 82, esto permite construir una oruga con la dimensiones que se necesite, siendo una ventaja con respecto al anterior tipo de oruga, sin embargo, el uso de este tipo de eslabones presenta el inconveniente de resbalar en la mayoría de las superficies, a excepción de la tierra, arena o nieve donde presentan mayor tracción. Ante esta situación varios usuarios en la red han dado soluciones a este problema [116].

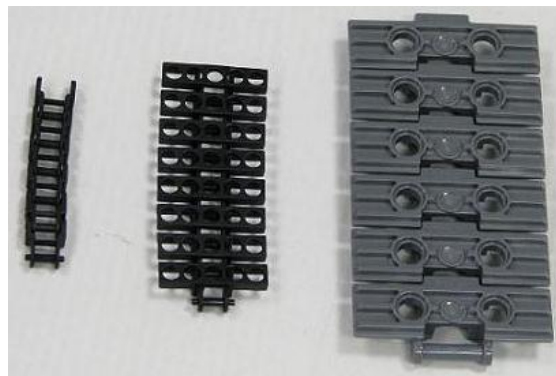


Figura 82. Eslabones empelados para la construcción de orugas, de izquierda a derecha: eslabón 3711, eslabón 3873 y eslabón 57518 [116].

En primera instancia se propuso hacer uso de la oruga mono pieza apoyada en los rines para llantas que vienen en el kit comercial de LEGO MINDSTORMS, como se puede apreciar en la figura 83.



Figura 83. Propuesta para el uso de una oruga mono pieza, a la izquierda vista frontal y a la derecha vista trasera mostrando las vigas de apoyo para los rines.

Como se observa en la figura anterior, la dimensión para esta propuesta esta condicionada a la longitud máxima de la oruga. Si se quisiera hacer más larga la estructura con la misma oruga, la tensión que está ejercer causaría que no se movieran los rines por donde se desplaza o la ruptura de los ejes que sostienen a estos últimos.

El largo alcanzado en está propuesta deja un espacio muy reducido para integrar los otros elementos como son los motores, el batefuego y el bloque NXT, causando inestabilidad durante el desplazamiento del robot.

Debido a lo anterior, se propone una nueva estructura la cual hace uso de dos orugas, una de ellas en la parte de enfrente y la otra en la parte posterior, como se observa en la figura 84.

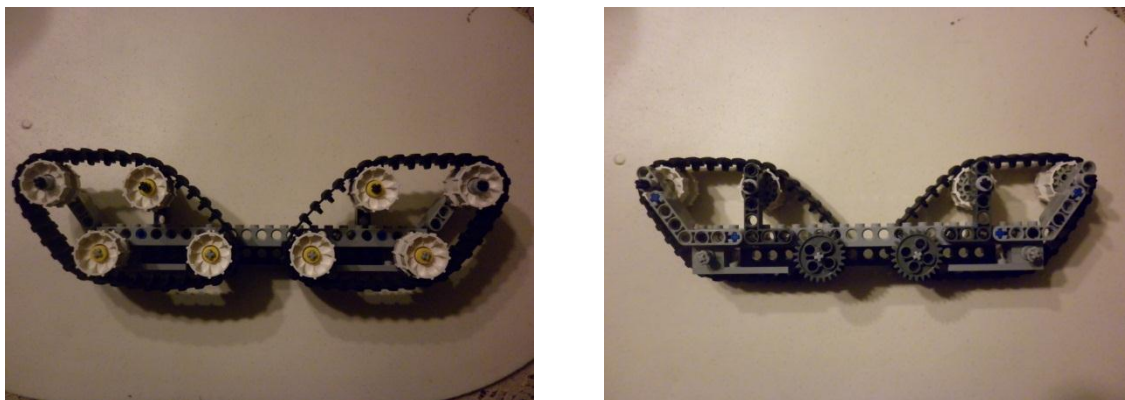


Figura 84. Segunda propuesta haciendo uso de dos orugas mono pieza, a la izquierda vista frontal y a la derecha vista trasera.

Como se aprecia en la figura anterior, al hacer uso de dos orugas distribuidas de esta forma, se incrementa el largo de la estructura, la cual podría ser ocupada por los motores, el batefuego y el bloque NXT.

Otra ventaja de esta propuesta es la incorporación de un ángulo de inclinación al frente y atrás, con la cual el robot podría superar obstáculos cuyo tamaño no rebase la altura de la pendiente, sin embargo, se identifica una zona en la parte inferior de la estructura que está muy cercana al suelo como se observa en la figura 85. Lo anterior podría impedir el desplazamiento del robot cuando esta zona estuviera en contacto con la superficie del obstáculo.

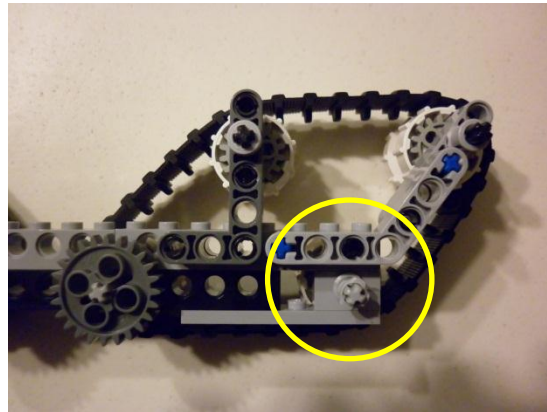


Figura 85. Zona propensa a fallo durante el desplazamiento del robot.

Otro inconveniente de esta propuesta es la presencia de un espacio libre entre las dos orugas, figura 86, ya que existe la posibilidad de que un objeto se introduzca allí mismo durante el desplazamiento del robot sobre terrenos irregulares, impidiendo su movimiento.

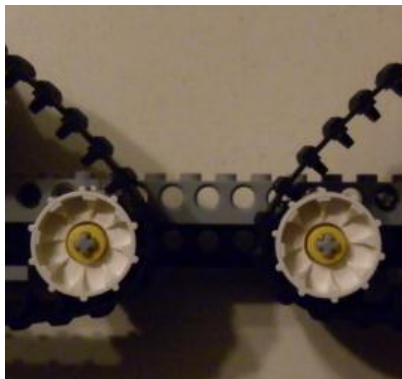


Figura 86. Espacio entre las orugas de la estructura.

Debido a las desventajas que presenta el uso de la oruga mono pieza, se decide hacer uso de la versión en multi pieza, ya que ésta ofrece la oportunidad de crear una oruga del tamaño y forma que se necesite, el elemento a utilizar es el eslabón para banda transportadora 3873 de LEGO, que se presenta en la figura 87.

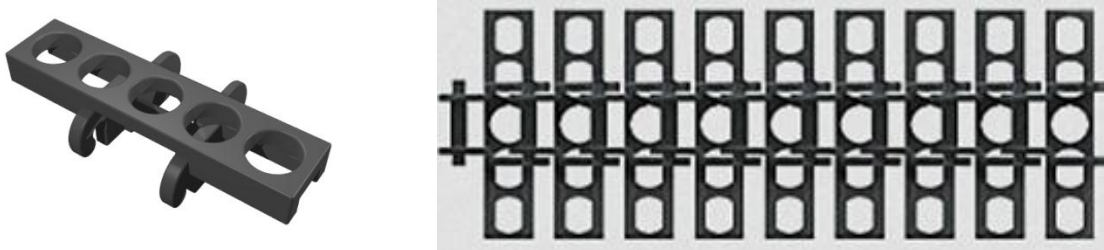


Figura 87. Eslabón de banda transportadora 3873, a la izquierda una sola pieza y a la derecha unión de múltiples piezas [117] [118].

Para identificar la mejor forma de ensamblar los eslabones de la oruga multi pieza, los motores para el movimiento y el bloque NXT en el modelo se hace uso de un programa CAD distribuido por LEGO llamado LEGO Digital Designer, el cual contiene todas las piezas creadas por esta empresa, permite crear modelos virtuales con ellas y generar manuales de construcción de lo realizado.

A continuación se presenta la imagen del primer modelo generado con el software anterior, el cual se conocerá como modelo número 1.

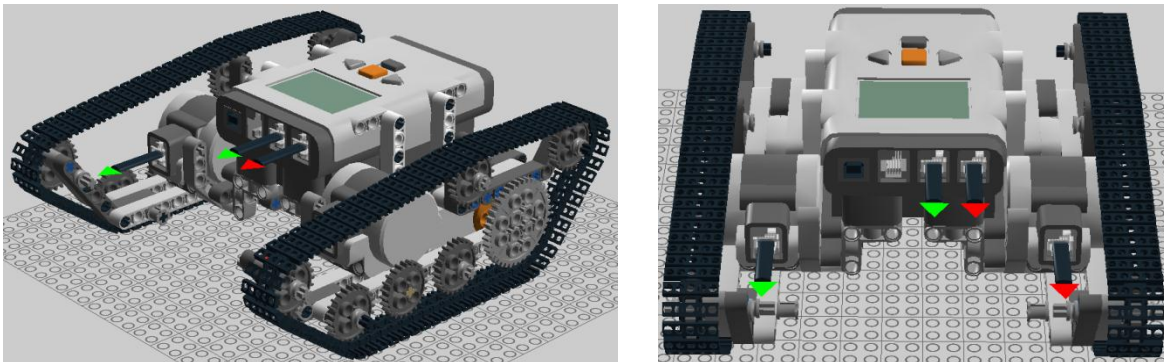


Figura 88. Modelo número 1, a la izquierda vista lateral y a la derecha vista frontal.

Como se observa en la imagen anterior, a ambos lados del bloque NXT se encuentran los motores de LEGO MINDSTORMS, y cada uno tiene acoplado a su eje un engrane donde se transmitirá el par del motor hacia los eslabones de la oruga, permitiendo al robot moverse. También con la finalidad de proporcionar firmeza a la banda se utilizaron engranes unidos a la estructura mediante ejes, haciendo posible que giren libremente y a la velocidad de desplazamiento de los eslabones.

Una vez terminado este modelo virtual se genera el manual de construcción del mismo, el cual se puede consultar en el disco que se anexa a este trabajo con el nombre “modelo 1”. Con el manual se puede realizar la implementación física del modelo número 1, quedando como se muestra en la figura 89.



Figura 89. Implementación física del modelo número 1.

Con el modelo físico se realiza una prueba sobre una superficie lisa para determinar su desempeño en cuanto al desplazamiento; se observa que las orugas permiten una correcta movilidad del modelo en esta superficie por lo cual es una solución bien definida. También como resultado de esta prueba, se observa que el modelo presenta una deformación en la parte inferior de la estructura, que se ejemplifica en la figura 90, y se identifica que esto se debe al peso del bloque NXT junto con los motores; además que los puntos de apoyo del modelo, las orugas en contacto con el suelo, se encuentran alejados del centro.

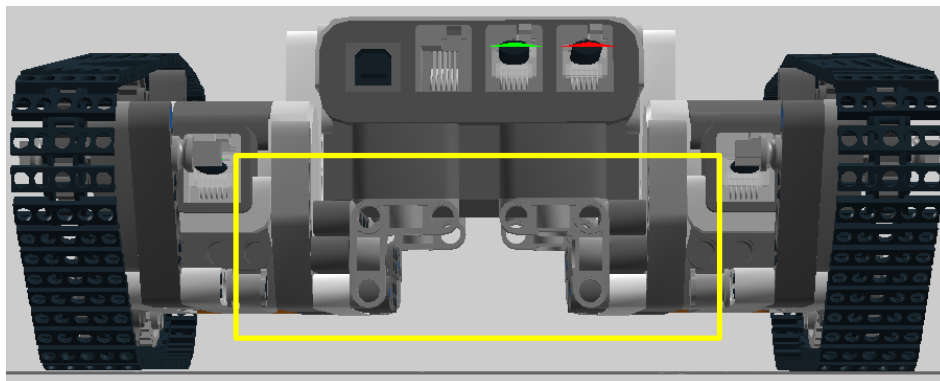


Figura 90. Zona donde se presentó el pandeo de la estructura.

Como se pretende que este robot móvil se desplace en un cierto ambiente, se decide hacer una prueba del desempeño respecto al desplazamiento ahora en pasto, como se muestra en la figura 91.





Figura 91. Prueba con el modelo para observar su desempeño al desplazarse sobre pasto.

Como resultado de esta prueba se observa que las orugas permitieron que se desplazara correctamente a través del pasto con una buena tracción, superando las pendientes del terreno, validando la efectividad del uso de orugas para la construcción del modelo.

También en la prueba anterior, se observa que los engranes, por donde se desplazan los eslabones, no permanecen en el mismo plano, debido a que los cojinetes que mantienen unidos los ejes de los engranes junto con la estructura se aflojan con el movimiento, figura 92. Una consecuencia de esto se observa cuando el robot realiza una trayectoria en línea recta, ya que durante su desplazamiento tiende a desviarse hacia algún lado de la misma.

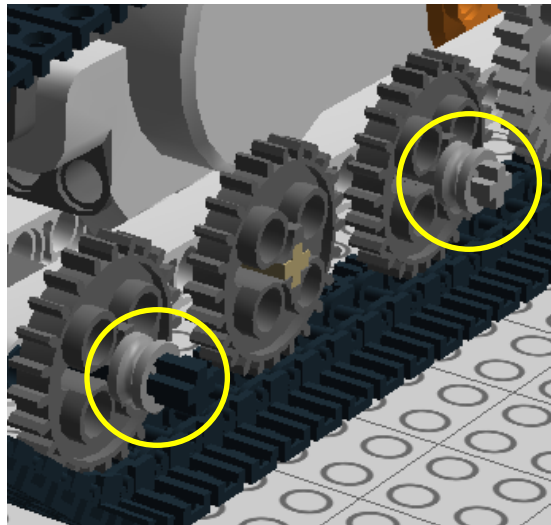


Figura 92. Zonas que impiden a los engranes permanecer en el mismo plano.

Como se observa en la figura 93 los eslabones se unen entre si formando un riel en el interior de la banda, que se encuentra en el mismo plano de acción de los engranes. Cualquier obstáculo que pase por otro plano paralelo y distinto al mencionado

anteriormente provocará que se pierda el contacto entre el engrane y el riel impidiendo que continúe correctamente con su desplazamiento.

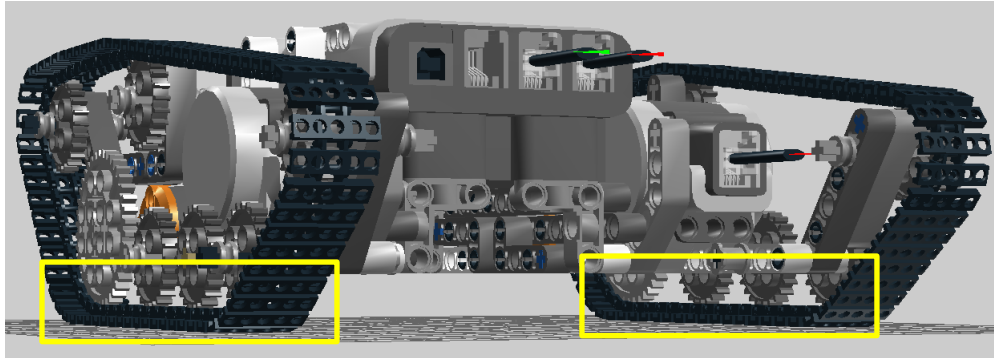


Figura 93. Zonas donde la banda puede salirse de su posición a causa de un obstáculo.

Para proporcionar energía al bloque NXT y en consecuencia a los motores, se hace uso de la batería recargable para esta plataforma creada por la empresa LEGO, la cual al momento de colocar en el compartimiento de las baterías del bloque, incrementa un poco su tamaño y peso.



Figura 94. Batería recargable para el bloque NXT. [119]

Para dar solución a los problemas identificados en la oruga del modelo número 1, se diseña la nueva estructura como se muestra en la figura 95, en la cual las vigas que la conforman cumplen las siguientes funciones: prevenir la entrada de objetos entre el engrane acoplado al eje del motor y el que impulsa los eslabones; se asegura que los engranes por donde se desplaza la banda estén contenidos en el mismo plano resolviendo así el desacoplamiento de la oruga con los engranes y corrigiendo el problema de desplazamiento el línea recta, y por último, proporcionan en la parte inferior de la estructura una restricción de giro a ambos lados del riel de la banda, evitando así que ésta se salga de su posición cuando pase sobre un obstáculo.

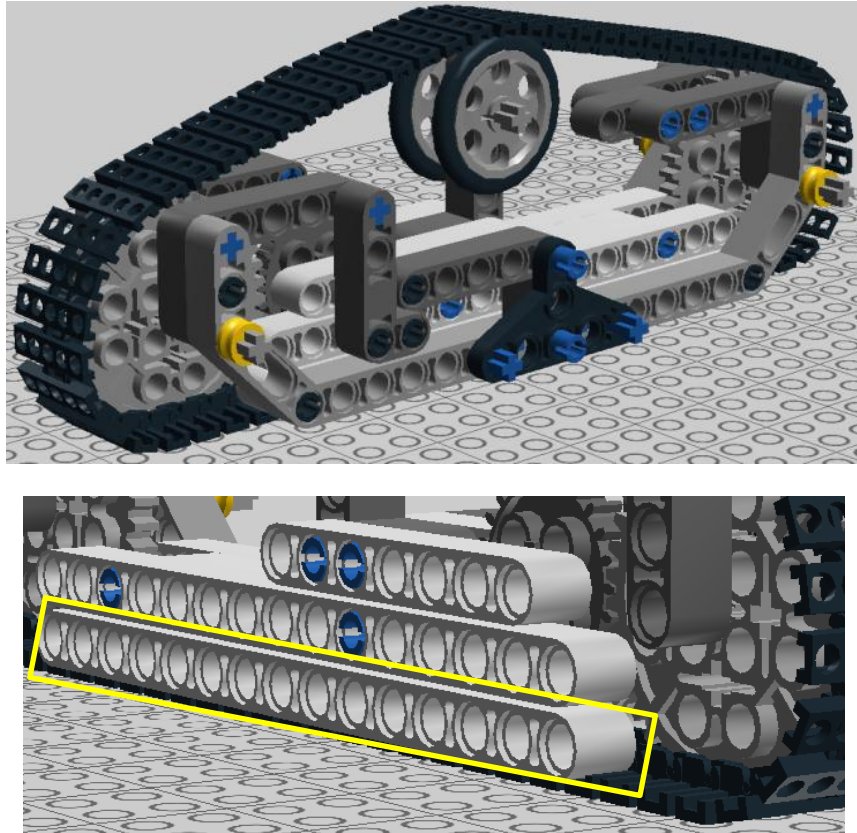


Figura 95. Arriba, nueva estructura para la oruga y abajo, viga en uno de los lados de la parte inferior de la estructura que impide a la banda girar al subir un obstáculo.

Otra ventaja identificada de hacer uso de las vigas como guía para el desplazamiento de los eslabones, es el poder distribuir el peso de la estructura sobre toda la parte del eslabón en contacto con la superficie, con lo cual se genera un mayor contacto con la superficie de desplazamiento y una mejor tracción.

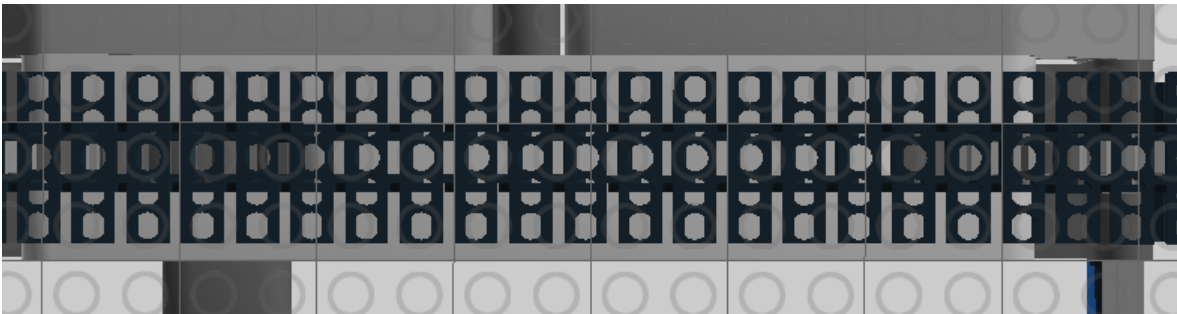


Figura 96. Eslabones en contacto de la superficie.

Una vez realizada la estructura propuesta para las orugas, se diseña una nueva base para el robot la cual contenga al bloque NXT, los motores que permitan el desplazamiento y el motor utilizado para el batedero, considerando que todos los elementos mencionados debía ocupar el menor espacio posible, el resultado obtenido se muestra en la figura 97.

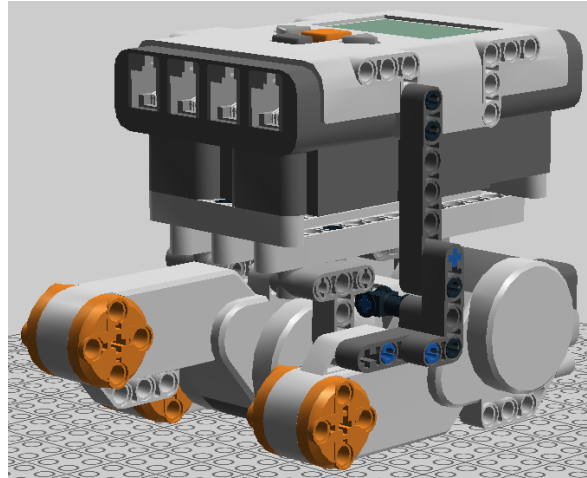


Figura 97. Propuesta para la base del robot.

Esta base se implementó físicamente y se le ensamblaron las estructuras realizadas para las orugas, pero se observa que aún existía una deformación en la parte inferior del cuerpo del robot. Esto se debe a que si se considera a las estructuras de las orugas como dos puntos de apoyo fijos en la superficie, el peso de la base crea momentos con respecto a ambos ocasionando la flexión de la estructura, esto se puede visualizar en la figura 98.

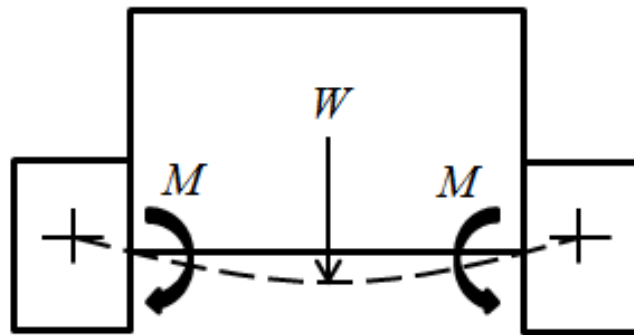


Figura 98. Flexión de la estructura del robot, donde  $W$  es el peso de la base y  $M$  son los momentos generados con respecto a las orugas.

Para solucionar este problema, se coloca una viga que conectará la base del robot con la oruga por la parte exterior, esto provoca que el peso de la base se distribuya hacia esa zona de la oruga y genere un momento en sentido contrario al producido por la componente del peso en la parte interna, disminuyendo así la flexión de la estructura.

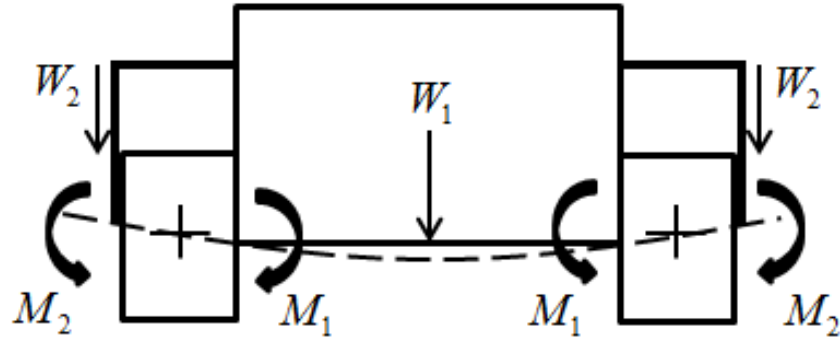


Figura 99. Momentos generados por las vigas laterales que reducen la flexión de la estructura.

Como resultado del proceso de diseño de las estructuras para la base, las orugas, la incorporación del motor para el batefuego y la solución encontrada a la flexión se obtiene el modelo número 2, el cual se presenta en la figura 100. Al igual que con el modelo número 1, son el software de diseño se generó el instructivo de armado para éste nuevo modelo, que se encuentra en el formato digital con el nombre “modelo 2”.

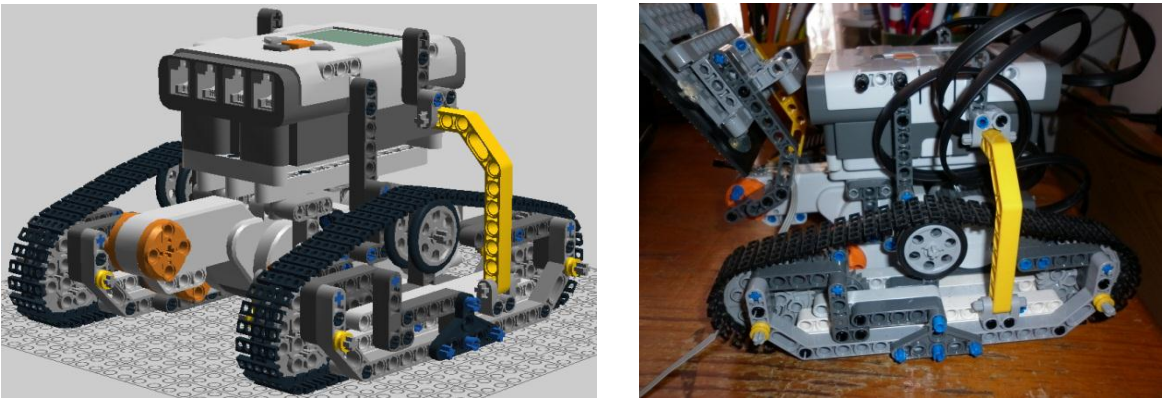


Figura 100. Modelo número 2, a la izquierda modelo virtual y a la derecha modelo físico.

Para el diseño de la estructura del batefuego, se utiliza el programa de CAD considerando el uso de las piezas de LEGO para su construcción, como resultado se obtuvo una placa unida al eje del motor mediante unas vigas, con las cuales el batefuego estará a una cierta distancia del cuerpo del robot permitiéndole apagar el fuego sin poner el riesgo a las demás piezas que lo integran. La imagen de la estructura obtenida se muestra en la figura número 101.

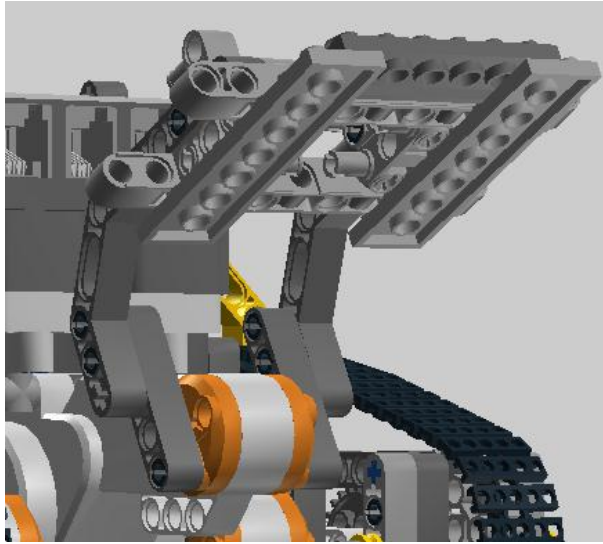


Figura 101. Batefuego diseñado con el programa de CAD.

Como se observa en la imagen anterior, la forma de esta placa cuenta con la presencia de espacios en los cuales si se fuera a sofocar el incendio con esto permitirían la entrada del oxígeno y la llama no se apagaría completamente, por lo que se ha de generar una superficie que impida el ingreso del oxígeno. Se propone para ello añadir a la placa del batefuego una lamina de caucho vulcanizado, cuya función será la de proteger las piezas de LEGO de la interacción directa con el fuego, así como desplazar completamente la presencia del oxígeno para realizar la sofocación.

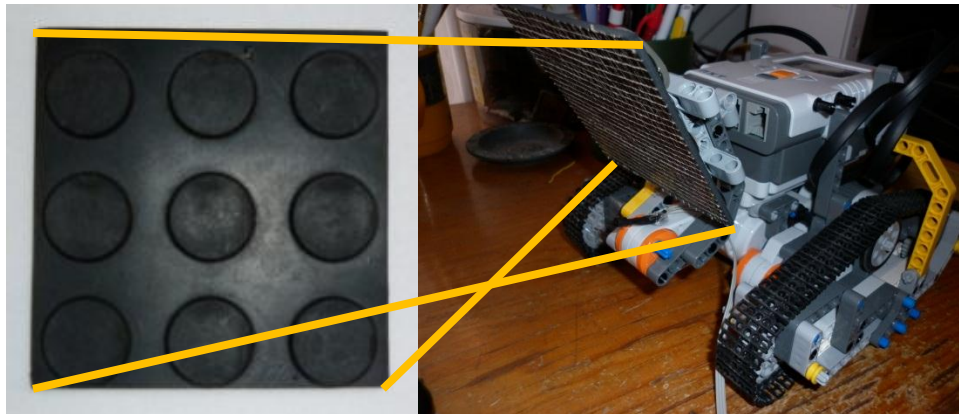


Figura 102. A la izquierda, lamina de caucho vulcanizado y a la derecha, adhesión en la estructura del batefuego.

En esta etapa del diseño ya es necesaria la implementación de los componentes electrónicos propuestos para el subsistema de detección de la combinación número 2, para complementar la estructura mecánica realizada hasta este momento que cuenta con los subsistemas de procesamiento, desplazamiento y extinción. Ahora se describe la electrónica utilizada por el modelo funcional.

## 2.7.2 Electrónica

Una vez que se cuenta con una estructura mecánica que permite el desplazamiento del modelo e incorpora un batedero, es necesario implementar los elementos que hagan posible el funcionamiento del subsistema de detección. Como se menciona al inicio de la implementación, el concepto seleccionado para construir fue la combinación número 2, que propone como soluciones para la detección de fuego el uso de los sensores LM35 y LDR.

Para realizar la captura de datos que proporcionan estos sensores, se emplea una tarjeta de adquisición para LEGO MINDSTORMS, llamada Tarjeta de prototipo NPS1055, fabricada por la compañía HiTechnic.



Figura 103. Tarjeta de prototipo NPS1055 [120].

La NPS1055 permite al bloque NXT obtener los datos provenientes de componentes electrónicos ajenos a la plataforma LEGO MINDSTORMS, esto lo realiza a través de sus puertos analógicos, digitales y pines de energía. La comunicación con el bloque se realiza a través del protocolo I<sup>2</sup>C [120].

Las especificaciones técnicas de la tarjeta de prototipo se muestran en las siguientes tablas.

Tabla 20. Pines analógicos de la tarjeta NPS1055.

Número de canales	Convertor analógico digital	Voltaje de comparación [V]	Valor de salida	Resolución [mV]
5	10 bits	0 - 3.3	0 - 1023	3.22

Tabla 21. Pines digitales de la tarjeta NPS1055.

Número de canales	Configuración	Rango de voltaje para un estado digital bajo [V]	Rango de voltaje para un estado digital alto [V]
6	Entrada o Salida	0 - 0.5	2 - 3.3

Tabla 22. Pines de energía de la tarjeta NPS1055.

Número de conexiones	Voltaje suministrado [V]	Corriente suministrada [mA]
4	9	12
	5	12
	4.3	20
	3.3	20

Para determinar la presencia de fuego en la trayectoria del modelo se utilizará el sensor LM35, propuesto como solución para el subsistema de detección. Este sensor cuenta con una sensibilidad de 10 [mV/°C] y permite detectar temperaturas ambientales en el rango de -55[°C] a 150 [°C]. Debido a que la señal eléctrica del LM35 es variable, como consecuencia de los cambios en la temperatura, es necesario compararla con un valor de referencia electrónico para determinar si el cambio se debe por la presencia de fuego, para lograr lo anterior se utilizará un circuito comparador.

Para el diseño del circuito comparador se usa un amplificador operacional cuya alimentación pueda ser suministrada por la tarjeta NPS1055, por lo cual se decide hacer uso del integrado LM324 que puede trabajar con una fuente de alimentación simple desde 3 [V] hasta 30 [V]. El circuito propuesto es simulado en el software ISIS - Proteus, como se muestra en la figura 104 [121].

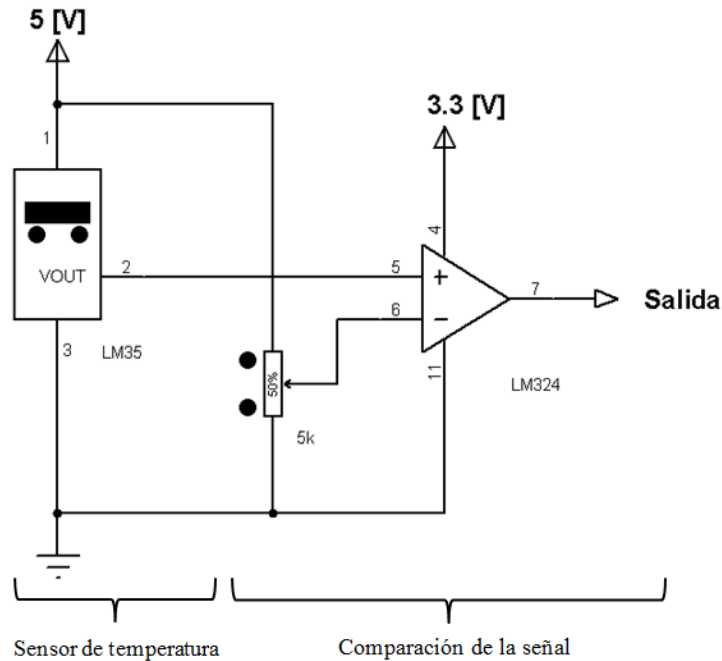


Figura 104. Circuito comparador para el sensor LM35.



En la figura 104 se observa que en la terminal inversora del amplificador operacional ingresa el voltaje proveniente de una resistencia variable, como es un potenciómetro, que servirá para calibrar la referencia a la cual se determine la presencia de fuego. En la terminal no inversora ingresa la señal de salida del sensor de temperatura, la cual será comparada con el valor establecido en la referencia. A la salida del amplificador se pueden presentar dos valores de voltaje, ya sea 0 [V] o 3.3 [V] dependiendo de las siguientes situaciones: cuando el voltaje de salida del LM35 sea mayor que la referencia se obtendrá 3.3 [V], esto implica que se ha detectado la presencia de fuego. En el caso contrario se presentara 0 [V] debido a que la señal del sensor de temperatura es menor a la referencia. La salida del comparador es conectada a un canal digital de la tarjeta NPS1055 para que el bloque NXT poder procesar la información que proporciona el circuito.

Al considerar que el fuego puede estar en una zona por donde la trayectoria del modelo no pase se hace necesario implementar el otro sensor identificado en el subsistema de detección, el LDR. Este sensor permitirá detectar la radiación infrarroja que emite el fuego causando que cambie su resistencia electrónica, sin embargo, esta variable no puede ser medida directamente por la tarjeta de prototipo por lo cual es necesario acondicionar la señal a una forma que pueda ser leída por la tarjeta, entonces se hace uso del divisor de voltaje para poder generar una señal analógica en función del cambio de resistencia y que sea aprovechada por la tarjeta NPS1055.

Se utiliza un software de CAD para la visualización del circuito de acondicionamiento y de como se realizará la lectura de la señal. Para el divisor de voltaje se propone dejar fija una resistencia de 10 [K $\Omega$ ], ya que al considerar un voltaje de alimentación de 3.3 [V] y que la resistencia del LDR sea cero (caso crítico), la corriente a través del dispositivo será de 0.33 [mA] la cual no puede dañarlo, validándose así su uso. La salida de éste circuito se conectará a un canal analógico de la tarjeta de prototipo para poder registrar la señal. En la figura 105 se muestra el circuito propuesto.

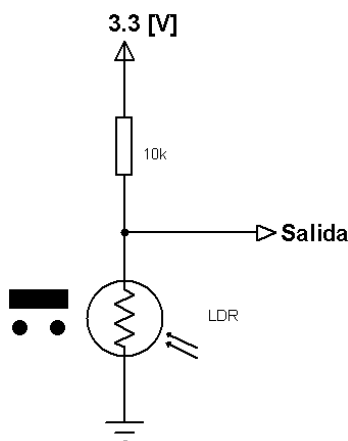


Figura 105. Circuito para el sensor LDR.

Con base en los diseños obtenidos por el CAD se hace la implementación física de estos circuitos para comprobar que funcionan correctamente, ensamblándolos en una tarjeta de pruebas (protoboard). Se observa que al acercar la flama de un encendedor al LM35 a la salida del circuito comparador se obtiene un estado digital alto y también que al hacer pasar el fuego frente al LDR se presenta un cambio en la señal analógica que genera el circuito, por lo tanto, se valida el funcionamiento de ambos circuitos.

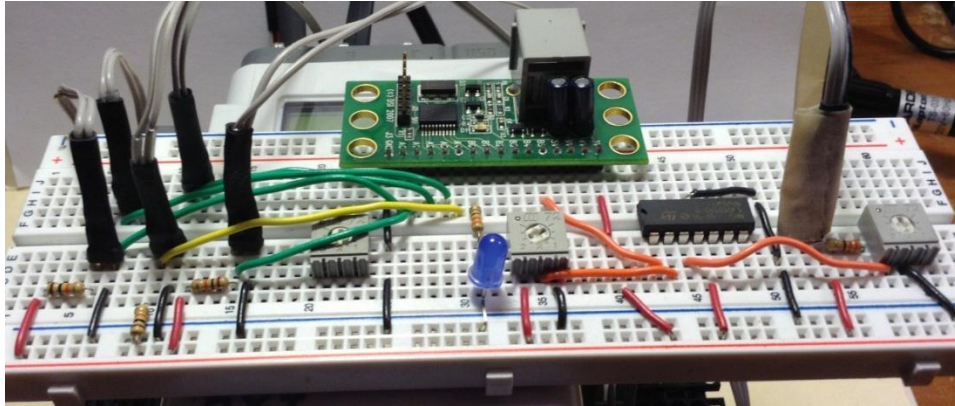


Figura 106. Circuitos implementados en la protoboard.

Las señales generadas por los circuitos implementados son procesadas por la tarjeta NPS1055 y enviadas al bloque NXT, que en este momento no tiene la capacidad de toma de decisiones sobre lo que debe de hacer con la información recibida. Por lo cual se hace necesario trabajar con el subsistema de procesamiento, para analizar la información y determinar el funcionamiento de los subsistemas de desplazamiento y extinción.

### 2.7.3 Programación

Los circuitos que se utilizan para el subsistema de detección proporcionan información sobre si hay o no fuego y además una posible ubicación del mismo, más no generan las acciones para aprovechar esa información como es detenerse para apagar el fuego o corregir su trayectoria. Lo anterior es una tarea a resolver por el subsistema de procesamiento del modelo, que de acuerdo con el concepto número 2 será realizado por el bloque NXT. El bloque realizará una toma de decisiones con base en la información obtenida, para generar las señales necesarias que permitan el funcionamiento de los subsistemas de desplazamiento y extinción, los cuales ya están descritos en la estructura mecánica del modelo, ver sección 2.7.1.

Para que el bloque NXT pueda aprovechar la información de los circuitos y generar las señales de salida adecuadas para los subsistemas de desplazamiento y extinción, se hace uso de la programación en lenguaje de alto nivel a través del software RobotC, creado por la Robotics Academy de la Carnegie Mellon University de Pittsburg [122].

Para la programación se hace el planteamiento del diagrama de flujo que ha de seguir la lógica del código a programar, el cual se describe en la figura 107.

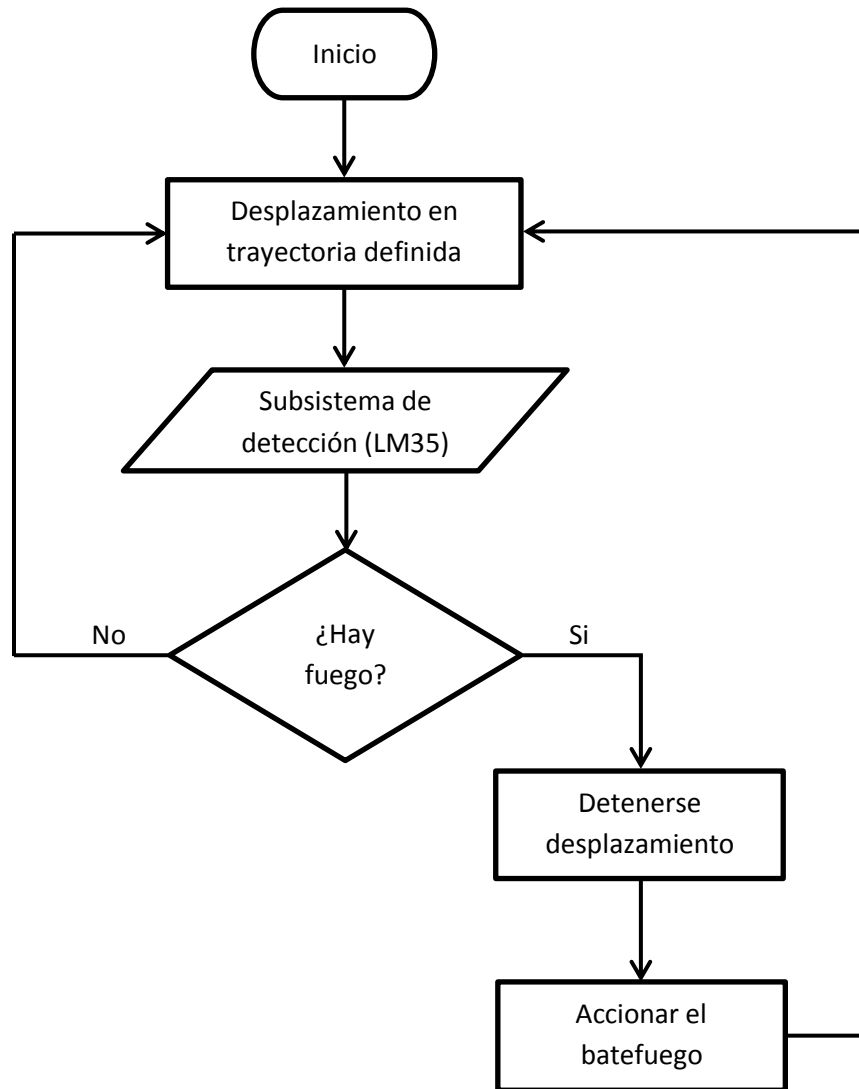


Figura 107. Diagrama de flujo de las acciones a realizar por el modelo con base en la señal del circuito comparador para el LM35.

Como se representa en el diagrama de flujo, la primera acción del modelo debe ser la de activar los motores del subsistema de desplazamiento permitiendo que éste siga una trayectoria definida (línea recta). Posteriormente se leerá la señal proveniente del circuito comparador del LM35, la cual indica si hay o no presencia de fuego, cuando no hay presencia de fuego continúa desplazándose en la trayectoria definida, en caso contrario, el sistema va a detener el desplazamiento para accionar el motor del batefuego y después continuará moviéndose en su trayectoria.

El diagrama de flujo anterior se programa en el software RobotC mediante un ciclo while infinito en donde se pregunta por el estado del puerto digital que esta conectado con la salida del circuito comparador, si éste es igual a un estado digital bajo se indicará la potencia que deben tener los motores del subsistema de desplazamiento, en caso contrario, la potencia será igual a cero con lo cual el modelo se detendrá, posteriormente se hará funcionar el motor del subsistema de extinción para que el batefuego pueda descender y regrese a su posición inicial.

```

03122012.c
53  task sensado()
54  {
55      bool senal; // declaro variable local
56      HTPBsetupIO(HTPB,0x01); //configuro como salida al canal digital B0
57      while(1)
58      {
59          wait1Msec(300);
60          senal=HTPBreadIO(HTPB,0x20); // hago lect digital del canal B5
61          if(senal==true)
62          {
63              HTPBwriteIO(HTPB,0x01);
64              StopTask(movimiento);
65              motor[motorA]=0;
66              motor[motorB]=0;
67              pala();
68              StartTask(movimiento);
69          }
70          else
71          {
72              HTPBwriteIO(HTPB,0x00);
73          }
74      }
75  }
76
77  task main()
78  {
79      nMotorEncoder[motorC]=0; // inicializo encoder de motor C en cero

```

Errors

← ✓ →

File "03122012.c" compiled on May 29 2013 11:31:56

Figura 108. Toma de pantalla del código de programación en RobotC.

En este momento el modelo ya cuenta con los sistemas mecánicos, electrónicos y de programación para poder realizar pruebas para observar si estos interactúan y funcionan correctamente de forma integral, en caso de que uno de ellos no cumpla con su funcionamiento se hará el análisis correspondiente para mejorar el concepto en búsqueda del cumplimiento del objetivo.

## 2.8 Diseño a detalle

Como se hace mención, el modelo que se tiene hasta este punto integra las soluciones para los subsistemas de detección, procesamiento, desplazamiento y extinción con base en el concepto de la combinación número 2, así entonces se hace necesaria la realización de pruebas para determinar que la integración de los subsistemas permite al modelo la detección y combate de un incendio; si durante las mismas se llega a detectar un mal funcionamiento de algún subsistema se analizará y realizará los cambios necesarios para corregir el problema.

Para probar que el modelo detecta la presencia de fuego, se propone realizar una primera prueba donde se haga uso de una lata de alcohol seco, con la finalidad de simular una fuente de fuego controlado y que pueda ser identificado por los sensores del subsistema de detección generando así la activación del subsistema de extinción.

El primer sensor en ser utilizado para esta prueba es el LM35, el cual se coloca en la parte frontal del modelo como se muestra en la figura 109, esto con la finalidad de detectar la presencia de fuego en la trayectoria de avance del dispositivo.

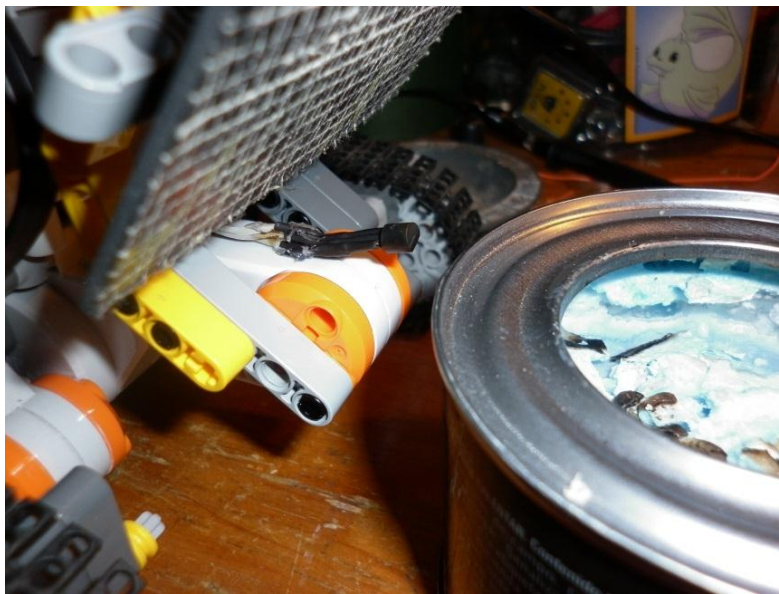


Figura 109. Sensor LM35 colocado en la estructura para determinar la presencia de fuego.

Ya habiendo colocado el sensor en la estructura del modelo se procede a la calibración del circuito comparador. Lo anterior se realiza colocando la lata de alcohol a una distancia que coincide con el descenso del batefuego hasta la parte superior de la misma, en esta posición se observa el estado del comparador. Para informar al sistema que hay detección de fuego en ese punto el comparador debía dar un estado digital alto, lo cual se logra ajustando el

valor de referencia a través del potenciómetro. Se modifica dicho valor hasta que a esa distancia se presenta a la salida el estado digital solicitado. El proceso de calibración descrito se ejemplifica en la figura 110.

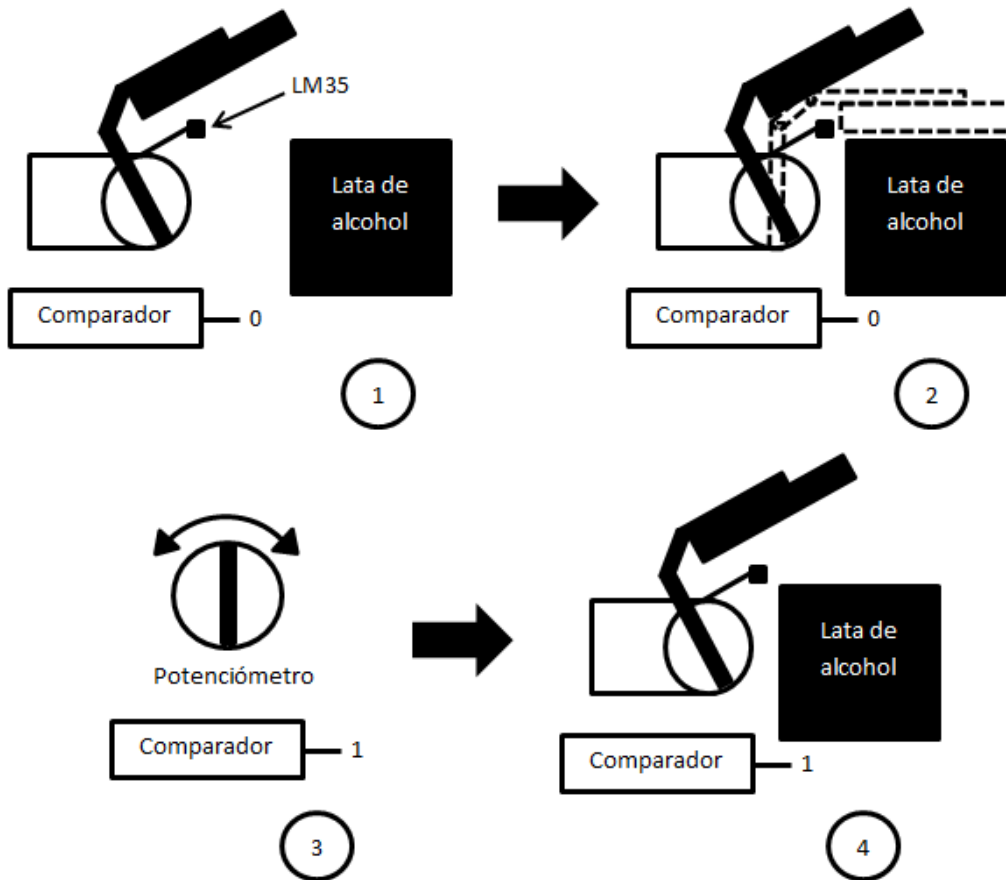


Figura 110. Proceso de calibración para el circuito comparador del LM35.

Una vez calibrado el circuito comparador del subsistema de detección se ingresa esta información a la tarjeta NPS1055 que será enviada al bloque NXT para ser utilizado por el código generado en la sección 2.7.3, con lo cual se prosigue a realizar una prueba para observar si la integración de los subsistemas del modelo permiten cumplir con el diagrama de flujo propuesto y que consiste en las siguientes etapas: se inicia la ignición de la lata de alcohol que es colocada a una cierta distancia del modelo sobre la misma trayectoria que éste seguirá, al ejecutar el programa comenzará su desplazamiento y cuando el sensor de temperatura detecte la presencia de fuego en la lata, detendrá su movimiento y hará bajar el batefuego hasta tapar la parte superior de la misma. Una vez apagado el fuego, la temperatura que registra el sensor disminuirá hasta que se deje de detectar la presencia de fuego para después hacer subir el batefuego a su posición inicial y continuar con su desplazamiento.

En la figura 111, se demuestra en funcionamiento lo descrito en el párrafo anterior.

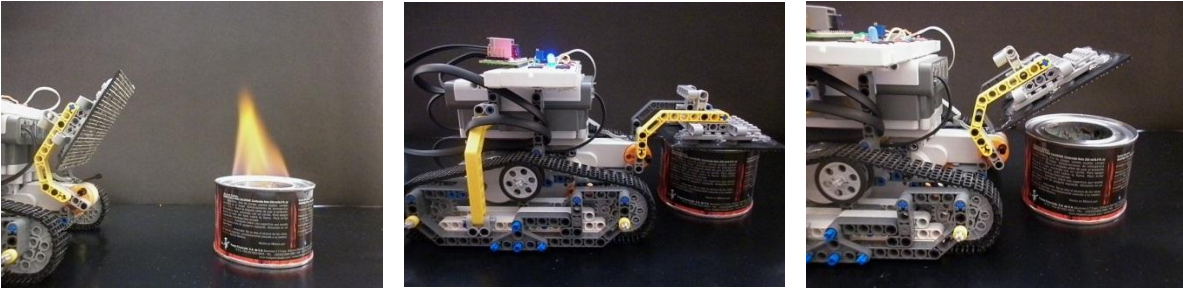


Figura 111. Secuencia de la prueba, de izquierda a derecha: desplazamiento, detección y extinción, extinción completa.

Con base en los resultados obtenidos de la prueba anterior se determina que el funcionamiento de todos los subsistemas es correcto, ya que permitieron al modelo seguir una trayectoria definida, detectar fuego y sofocarlo con el batefuego construido. Con respecto al subsistema de detección, el sensor LM35 cumplió su función de detectar la presencia de fuego durante la trayectoria realizada, sin embargo, se observa que su respuesta ante el cambio de temperatura no es rápida, lo cual ocasiona que la estructura empuje unos cuantos centímetros la lata de alcohol antes que la señal del sensor supere la referencia y se detenga. Lo anterior podría provocar en una situación real la propagación del fuego en otras direcciones en vez de su extinción, lo cual es contrario a lo que se pretende realizar con este dispositivo.

Como se hizo mención en el marco teórico, los incendios forestales que se presentan con mayor frecuencia son de tipo superficial, véase subcapítulo 1.6, por lo que las pruebas con la lata de alcohol difieren de la interacción real debido a que el fuego emitido por ésta se presenta en un plano distinto al de la superficie sobre la que se desplaza el robot. Por lo cual se propone para simular un fuego más cercano a la superficie hacer uso de un cenicero metálico, en cuyo interior se deposita pasto seco como combustible, sin embargo, el tiempo de duración de la llama es muy corto debido al tamaño que tiene el pasto, por lo que para realizar las pruebas se agregaran porciones pequeñas de alcohol seco sobre el cenicero que permitan un mayor tiempo de duración de la llama.

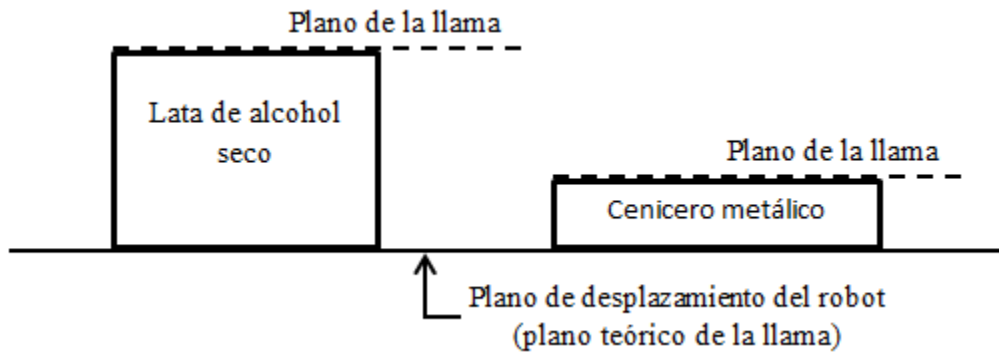


Figura 112. Comparación entre los planos donde se puede presentar la llama.

El cambio de posición del plano de las llamas ocasiona que el batefuego empleado en la primera prueba no cumpla con su función, debido a que su forma le impide descender hasta dicho plano para sofocar las llamas, como se muestra en la figura 113.

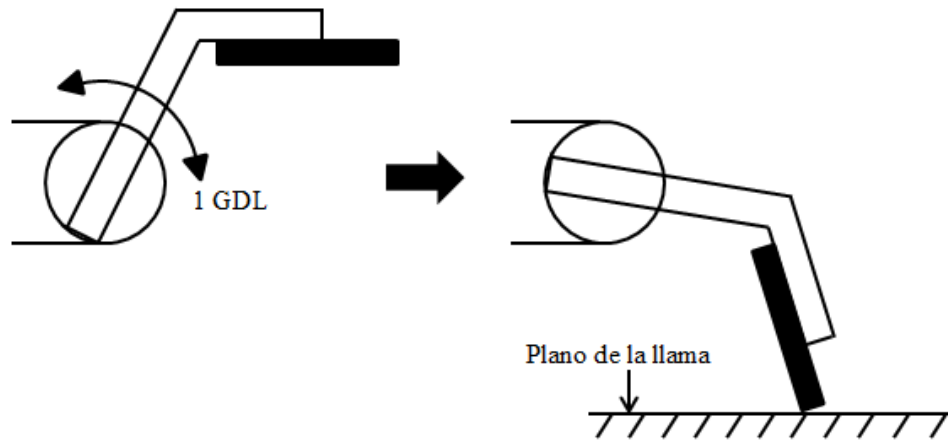


Figura 113. Acción del batefuego de un grado de libertad en el plano de la llama.

Por lo cual se propone una nueva estructura para el batefuego que incluya con un grado de libertad adicional, dándole la capacidad de adaptarse al plano de presencia de la llama, como se muestra en la figura 114. Lo anterior se logra al utilizar un eje que uniera al batefuego y las vigas acopladas al motor.

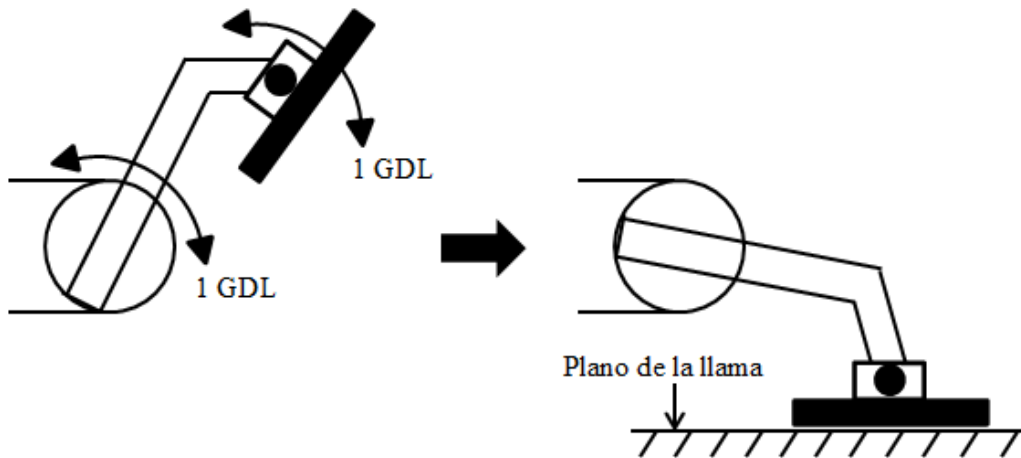


Figura 114. Acción del batefuego de dos grados de libertad en el plano de la llama.

La implementación física del batefuego de dos grados de libertad se muestra en la figura 115.



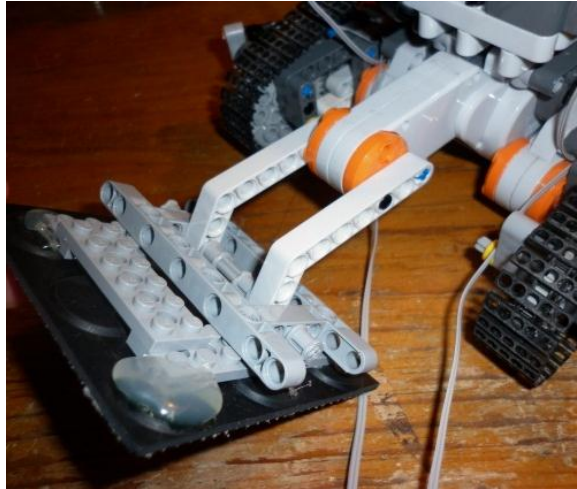


Figura 115. Batefuego propuesto de dos grados de libertad.

Para detectar la presencia del fuego generado en el cenicero es necesario cambiar de ubicación al sensor LM35, debido a que se ha modificado la altura a la cual se encuentra el plano de la llama respecto de la superficie. Se decide colocar el sensor debajo del motor como se muestra en la figura 116.

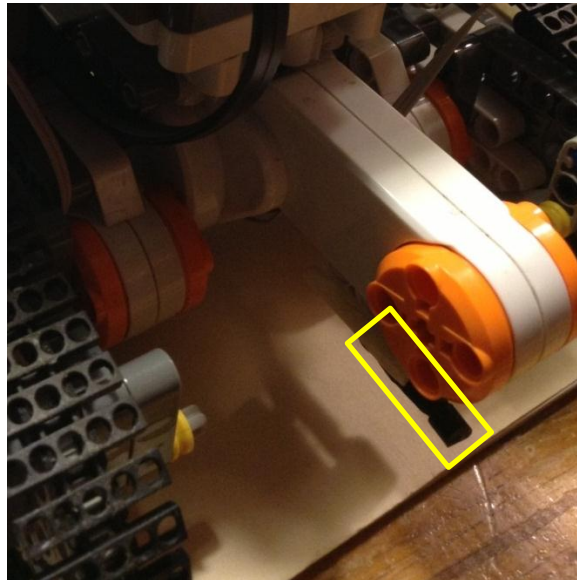


Figura 116. Nueva ubicación del sensor LM35 para la detección del fuego dentro del cenicero.

Para probar que el batefuego cumple su función de extinguir el fuego detectado dentro del cenicero, se volvió a emplear el código programado en el bloque NXT del diagrama de flujo presentado en la sección 2.7.3. En la figura 117 se presenta el resultado de la prueba realizada con el modelo.



Figura 117. Prueba con el nuevo batefuego.

Como resultado de esta prueba se determina que el batefuego cumplió su función de sofocar el fuego dentro del cenicero, pero se observa que algunas ocasiones el par generado por el motor para hacer descender la estructura provocaba que el batefuego gire antes y llegue al plano de las llamas de forma perpendicular, evitando que cumpla con su función. Con base en estas observaciones se valida el empleo de este tipo de batefuego para pruebas posteriores, no sin antes corregir el problema del giro.

También en esta prueba se continua observando que el sensor LM35 presenta un tiempo de retraso para la detección del fuego, ocasionando que parte del actuador del batefuego estuviera en contacto de las llamas.

Retomando el concepto número 2 se propone como otra solución para el subsistema de detección al LDR; este sensor será utilizado para determinar la presencia de fuego en un punto diferente a la trayectoria de avance del modelo, permitiendo así que el robot pueda modificar su dirección hacia dicho punto. Por otra parte una de las necesidades identificadas en el campo de oportunidad es que la operación del dispositivo se pueda dar sin importar el medio que lo rodea, lo que significa que el modelo tiene que operar en el exterior. Lo anterior podría afectar el desempeño del sensor LDR en el subsistema de detección, ya que éste basa su funcionamiento en los cambios de la luz que inciden sobre el y al estar expuesto al ambiente pueden presentarse condiciones sobre las que no tenemos control como son el día, la noche, los cambios en las condiciones meteorológicas, etc., por lo cual la detección del fuego se vería comprometida.

Debido a los problemas potenciales que presenta el uso del LDR, se decidió utilizar la propuesta de solución para el mismo subsistema que corresponde al concepto de la combinación número 3, el cual hace uso del sensor piroeléctrico (PIR). Estos componentes proporcionan una señal eléctrica en función del calor que reciben en forma de radiación infrarroja. Una característica física a destacar de estos sensores es el empleo de una ventana como filtro para limitar la radiación detectable en un rango de 8 a 14 [ $\mu\text{m}$ ] para que sea más sensible a la radiación que emite el cuerpo humano. Por esta razón se decidió hacer uso de este sensor para detectar la presencia del fuego dentro del cenicero [123].

El sensor PIR utilizado se encuentra en una tarjeta de un circuito impreso. Para probar su funcionamiento se implementa el circuito que se presenta en la figura 118, cuya salida permite conectarlo a un puerto analógico de la tarjeta NPS1055.

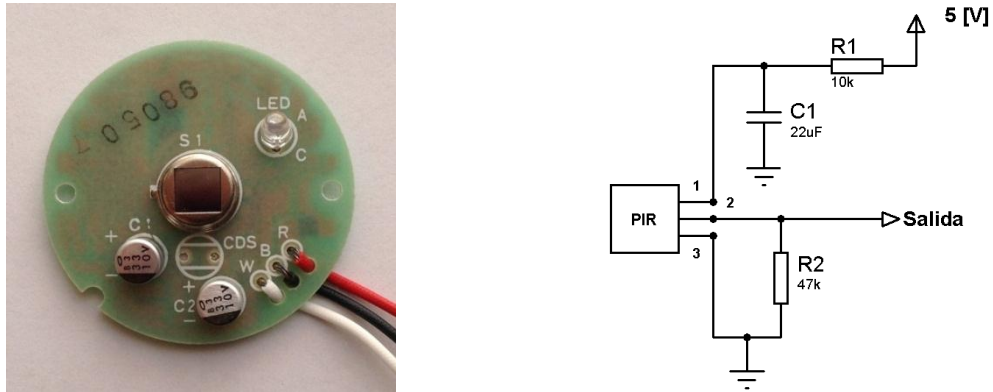


Figura 118. A la izquierda sensor PIR en una tarjeta y a la derecha circuito para probar su funcionamiento.

Para probar que el PIR detectaba la presencia de fuego se vuelve a usar nuevamente la lata de alcohol seco como fuente de fuego para monitorear el valor analógico que registraba la tarjeta NPS1055 de la salida del circuito del PIR. Lo anterior se obtuvo a través del bloque NXT en el cual se diseñó un programa únicamente para mostrar esa información en la pantalla LCD que tiene. Esta prueba fue realizada en el exterior, como se muestra en la figura 119.

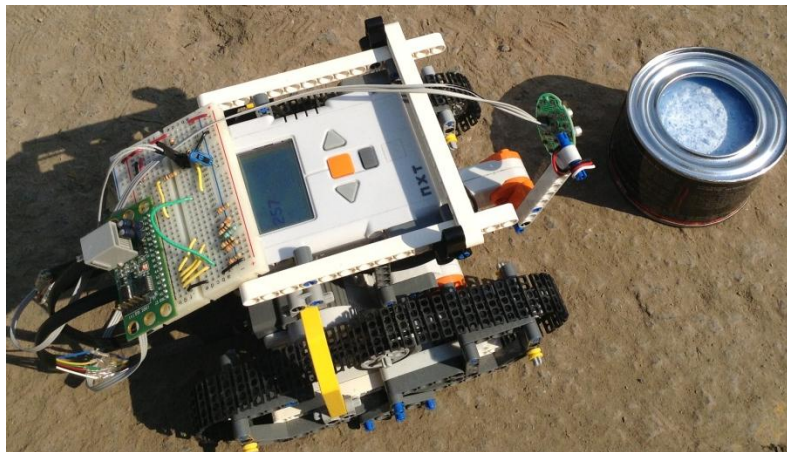


Figura 119. Colocación del sensor piroeléctrico en la estructura.

De la prueba anterior se observa que al no haber presencia de fuego la pantalla del bloque mostraba un valor analógico de 231 y al momento de acercar la lata de alcohol al sensor el valor subió hasta 235, si se considera que la resolución de lectura del puerto analógico de la tarjeta es de 3.22 [mV], significa que el aumento de voltaje a la salida del circuito fue de 0.0128 [V]. También debido a que la prueba fue realizada en el exterior se observa que el sensor era afectado por la radiación infrarroja del sol, obteniendo lecturas analógicas que llegaban hasta el valor de 274.

Para solucionar los problemas que se observaron en la prueba anterior se propone hacer uso de un circuito diferenciador, en el cual ingresen las señales de dos sensores PIR. La resta de las dos señales obedece a que el valor en la terminal no inversora se le restará el valor de la terminal inversora y si la diferencia es distinta de cero la amplificará. La señal del sensor PIR que ingrese a la terminal inversora será la referencia (PIR referencia), ya que registrará la radiación infrarroja del medio que rodea al modelo y en la terminal no inversora se encontrará la señal del PIR que detectará fuego (PIR detección). Cuando este último detecte fuego su señal de salida registrará la radiación del medio más la que produce el fuego y al restarle la señal de referencia se eliminará el efecto que tiene el medio; además que al existir una diferencia siempre distinta de cero, esta será amplificada, por lo cual la lectura que registre la tarjeta NPS1055 será mas legible.

Para implementar el circuito diferenciador, se utiliza el circuito propuesto para un ejemplo de un documento en donde se diseña un diferenciador, el cual se presenta en la figura 120. Se menciona que el voltaje de salida de éste obedece a la siguiente formula [124]:

$$V_o = 10(V_{PIR \text{ detección}} - V_{PIR \text{ referencia}})$$

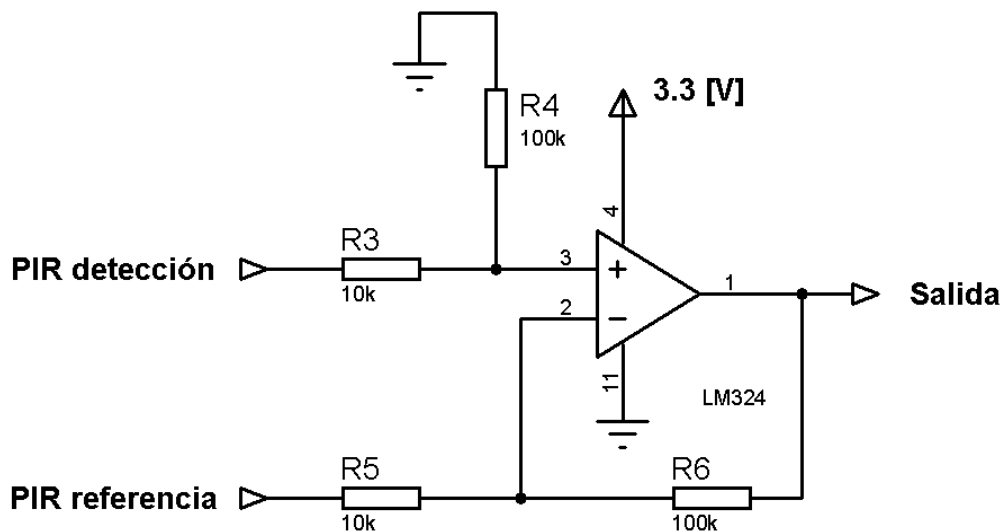


Figura 120. Circuito propuesto para el diferenciador.

En la figura 121 se presenta el circuito completo con los dos sensores PIR y el circuito diferenciador. En el documento del cual se obtiene el circuito se menciona que las resistencias deben cumplir con:  $R3 = R5$  y  $R4 = R6$ , pero debido a las tolerancias que presentan estos componentes es posible que no se pueda lograr estas igualdades, afectando así la ganancia del circuito. Se realizan tres de estos circuitos considerando que el sensor PIR referencia es el mismo utilizado para todos.

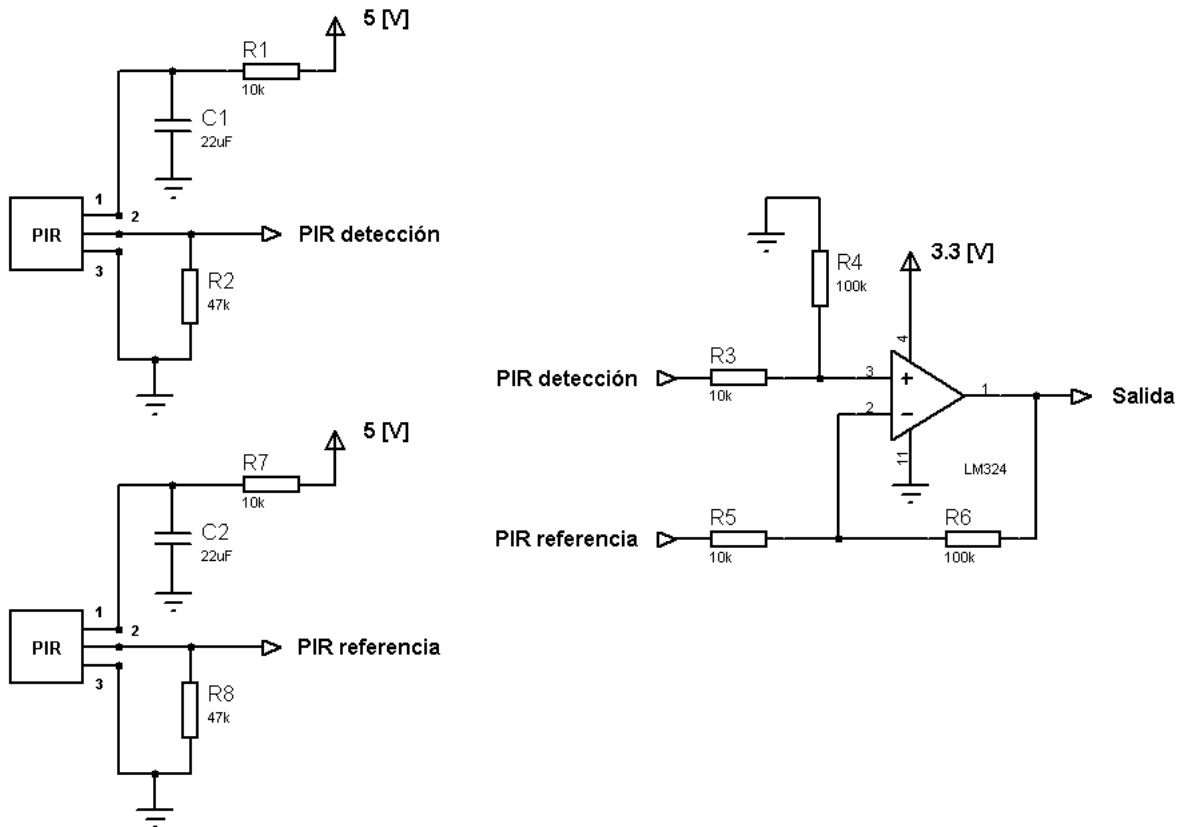


Figura 121. Circuito realizado para los sensores PIR y el circuito diferenciador.

Para realizar una prueba con los circuitos anteriores, la tarjeta con el sensor PIR utilizado como referencia se coloca encima del bloque NXT con la ayuda de unas piezas de LEGO y las tarjetas con los tres sensores utilizados para la detección de fuego son colocados a los lados y al frente del modelo. Ya que los sensores PIR utilizados para la detección de fuego presentan un amplio ángulo de visión es conveniente agregarles un tubo de plástico alrededor para focalizar la detección en una sola dirección, figura 122. Para procesar los valores analógicos que registra la tarjeta NPS1055 provenientes de los tres circuitos, se programa una rutina para leer los valores y compararlos con un valor referencia, el cual se establece con base en los valores obtenidos de la prueba realizada con el sensor en el exterior, cuando el valor leído rebese la referencia sonará una alarma.

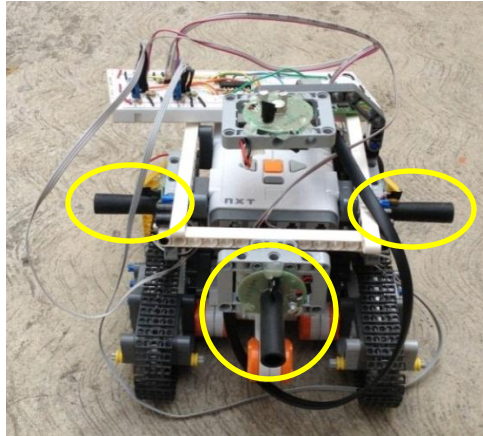


Figura 122. Ubicación de los sensores PIR dentro de la estructura.

Al ejecutar el programa y acercar la lata de alcohol al sensor PIR ubicado al frente del modelo se escucha la alarma del bloque NXT, indicando que el circuito implementado funciona de acuerdo a lo establecido y a pesar de que la prueba se realice en el exterior, permitiendo al modelo operar sin importar las condiciones del medio que lo rodea lo cual era una limitante de los LDR debido a los errores que se generaban en la lectura. Sin embargo, el anterior comportamiento no se presenta al acercar la lata de alcohol a los sensores situados a los lados del modelo, ya que en ambos circuitos los valores analógicos registrados por el bloque son cercanos a cero. Por lo cual es necesario retirar los sensores de las tarjetas donde están contenidas para realizar pruebas para observar su comportamiento ante la luz ambiente.

Una vez retirados los sensores PIR de sus tarjetas, estos se colocan de tal manera que formen una fila apuntando hacia el sol, como se observa en la figura 123, para determinar sus condiciones de detección críticas, entendiéndose estas como aquellas en las que solamente el ambiente es la única fuente de energía que se esta detectando. Con la ayuda de un multímetro se registraron los valores de esta prueba de cada uno de ellos y que se muestran en la tabla 23.

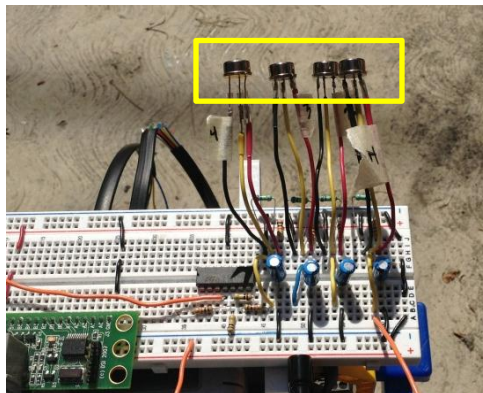


Figura 123. Posición de los sensores PIR durante la prueba para determinar su comportamiento

Tabla 23. Respuesta crítica de los sensores piroeléctricos en el ambiente

Hora del día	Sensor 1 [V]	Sensor 2 [V]	Sensor 3 [V]	Sensor 4 [V]
11:00	0.92	0.76	0.7	0.92
11:15	0.8	0.84	0.75	0.9
11:30	0.97	0.88	0.77	0.9
11:45	0.97	0.92	0.87	0.91
12:00	0.97	0.91	0.87	0.92

De la tabla 23 se determina que el sensor 3 debe ser utilizado como referencia para los circuitos diferenciadores ya que mantiene el potencial más bajo en comparación con los demás a medida que pasa el tiempo, esto asegura que la diferencia realizada por el circuito siempre resulte positiva y pueda ser amplificada. Una explicación de lo sucedido en la prueba anterior es que al colocar los sensores sin conocer su comportamiento, en algunos casos la referencia era mayor a la señal de detección dando como resultado un valor negativo y debido a que el voltaje de polarización inferior está conectado a tierra, a la salida del diferenciador se obtenía un valor cercano a cero.

Una vez que se conoce el comportamiento que registran los sensores PIR, se utilizan algunas piezas de LEGO para poder integrarlos a los laterales y en la parte frontal de la estructura de robot, como se observa en la figura 124. Lo anterior les proporciona a los sensores grados de libertad suficientes para poder regular la distancia a la cual pueden detectar fuego respecto del robot, como se visualiza en la figura 125.



Figura 124. Piezas de Lego utilizadas para sujetar los sensores PIR.

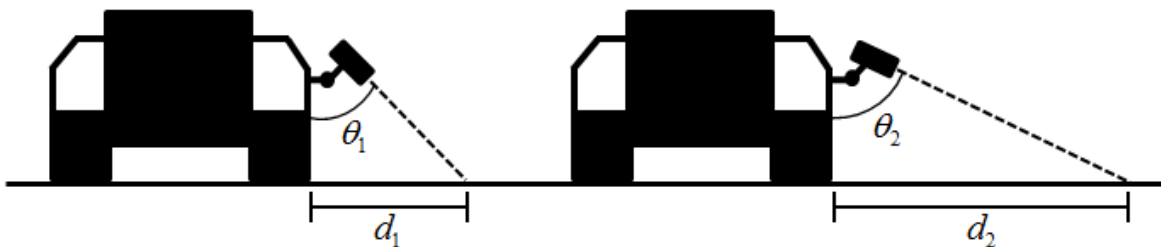


Figura 125. Comparación entre las distancias de detección conforme al ángulo del sensor PIR.

Proponiendo un ángulo posición para los sensores de acuerdo a la figura anterior, se desarrolla un programa en RobotC para realizar la lectura de los valores analógicos que proporcionan los circuitos diferenciadores mientras el robot se desplaza en línea recta. El valor que proporciona cada uno es comparado con su referencia correspondiente para determinar si hay o no presencia de fuego, cuando se detecte este fenómeno el modelo detendrá su movimiento. Al retirarse la fuente de fuego la detección no se presenta por lo cual el modelo continuará desplazándose. Las imágenes de esta prueba se muestran en la figura 126.

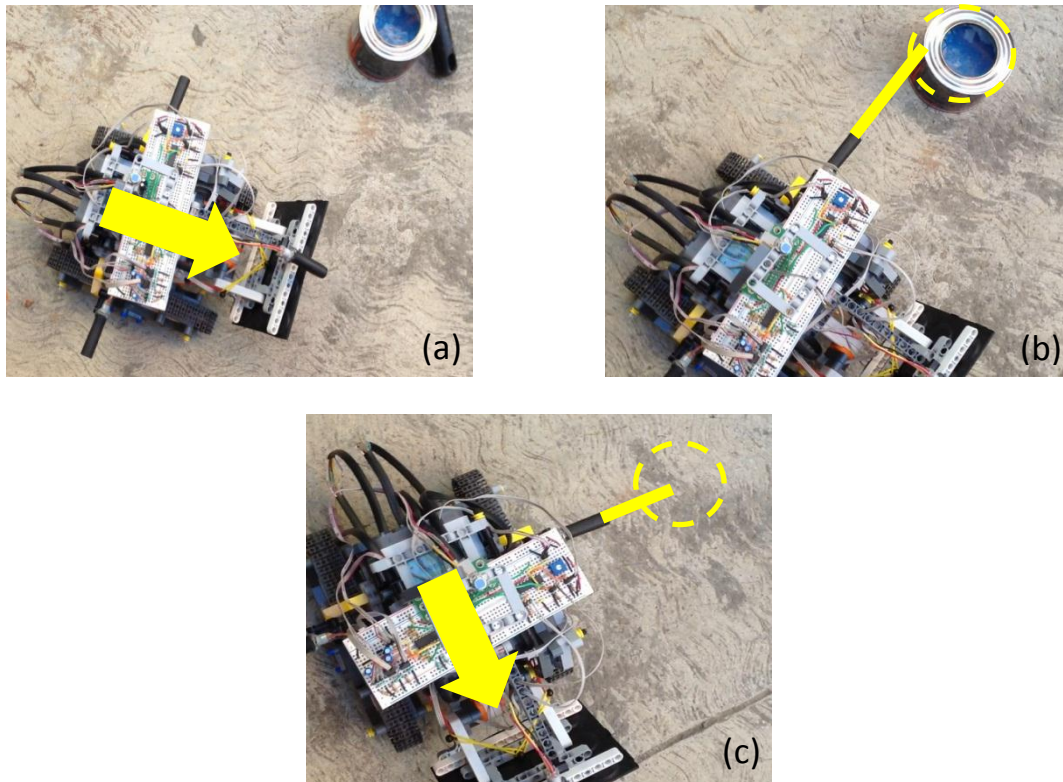


Figura 126. Secuencia: (a) el modelo avanza en línea recta, (b) el sensor PIR detecta el fuego dentro de la lata de alcohol y se detiene, (c) al retirar la lata de alcohol el modelo continúa desplazándose.

De la prueba anterior se observa que el uso de los sensores PIR permite detectar la presencia de fuego aun en condiciones ambientales en la que hay otras fuentes de emisión de infrarrojos, las cuales podrían ocasionar problemas de detección para otros sensores, y a parte esa información es utilizada por el subsistema de procesamiento del dispositivo para permitir el funcionamiento del subsistema de desplazamiento. En esta etapa dentro de la programación del modelo no existe un parámetro que limite su avance o haga que cambie de dirección, por lo cual siempre mantendrá una trayectoria recta hasta que el usuario detenga la ejecución del programa.

Para evitar que el modelo se desplace permanentemente en línea recta sobre el terreno se decide delimitar un área de trabajo, en donde el robot estará buscando fuentes de fuego para



realizar su extinción; para ello se delimita un perímetro de forma cuadrada utilizando una cinta negra.

Para que el dispositivo pueda reconocer los límites de su área de trabajo se decide emplear la solución propuesta para el subsistema de detección del concepto, que es el sensor QRD1114. Este sensor también es utilizado por los robots seguidores de línea de los concursos de robótica, los cuales de acuerdo con su lógica corrigen su trayectoria al detectar un borde. Por lo tanto, se decide seguir ésta misma lógica al utiliza este sensor para cambiar la trayectoria del modelo cuando detecte uno de los bordes del área de trabajo.

El circuito propuesto para el sensor QRD1114 se muestra en la figura 127 y consiste en un comparador cuya salida se conectará a un puerto digital de la tarjeta NPS1055. De tal forma que cuando se genere un cambio de estado, debido a la detección de un borde del área de trabajo, ocasione un cambio en la trayectoria del robot.

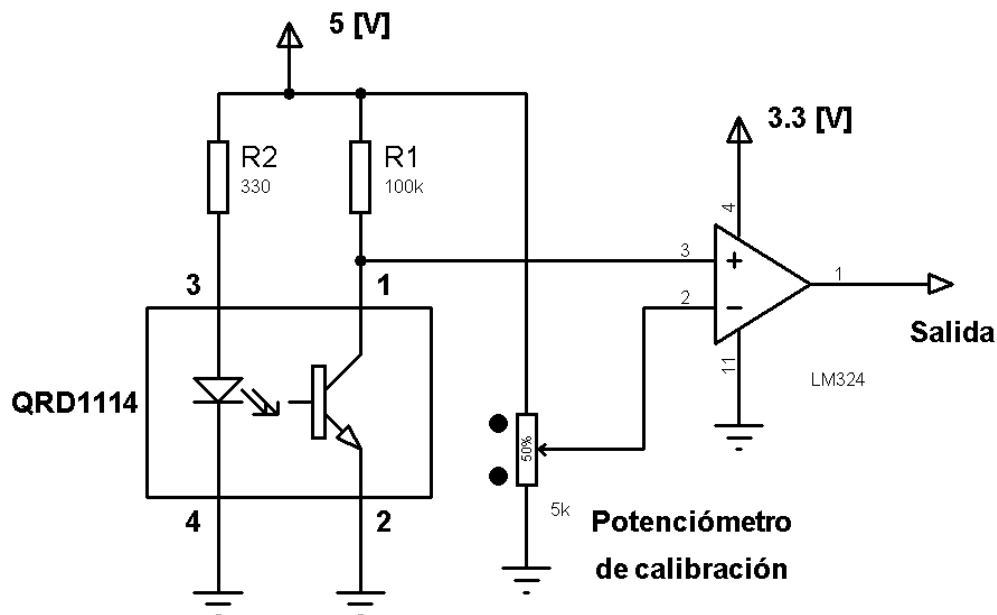


Figura 127. Circuito propuesto para el sensor QRD1114.

El sensor fue colocado debajo del motor del batefuego para considerar la posición final que iba a tener. Después se hizo coincidir el QRD1114 con la línea negra para poder observar la salida del comparador, como se desea que éste entregue 3.3 [V] cuando este sobre la línea se hará variar el potenciómetro de calibración hasta que a la salida se obtenga el voltaje de salida solicitado, el cual equivale a un uno para la tarjeta NPS1055.

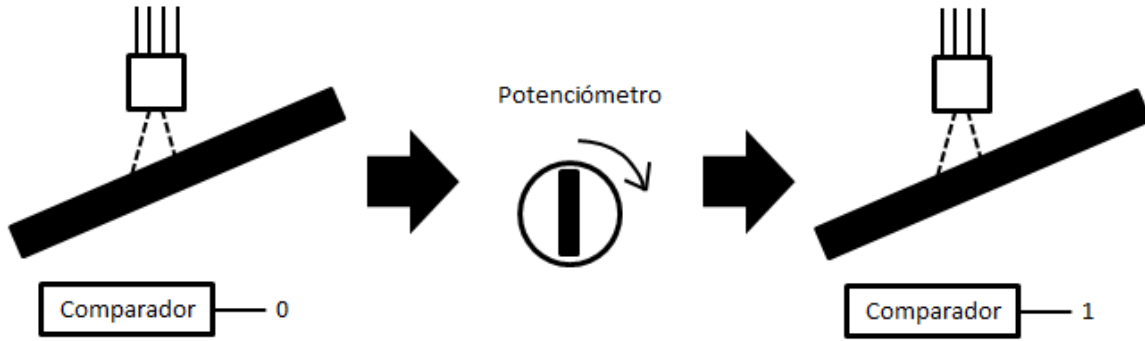


Figura 128. Calibración del circuito comparador para el sensor QRD1114.

Durante la calibración del sensor se observa que la lectura es afectada por la luz ambiental, por lo que se propone incorporar una barrera física que impida el paso de la luz hacia el área de detección del QRD1114, logrando así que las condiciones de luminosidad se mantengan constantes.



Figura 129. Propuesta de una barrera física (rectángulo) para mantener las condiciones de luminosidad del sensor QRD1114 (círculo) constantes.

Realizado lo anterior se procede a programar el bloque NXT, para que haga uso de la señal de salida proporcionada por el circuito de detección de área de trabajo. Para plantear la lógica de acciones que debe seguir el modelo se utiliza el esquema de máquina de estados. En la figura 130 se muestra el diagrama de la máquina de estados que hace uso de la señal del circuito mencionado.

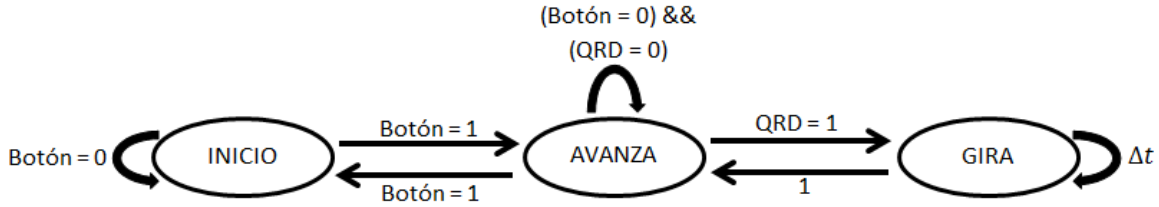


Figura 130. Máquina de estados para la detección de los límites del área de trabajo.

En el esquema de máquina de estados que se presenta en la figura 130 se observa la presencia de dos variables booleanas de transición de estados donde cada al adquirir un valor uno indica que esta generando una señal electrónica digital alta y al ser cero es una señal digital baja. La primera variable llamada “Botón” es proporcionada por el sensor de contacto de LEGO conectado al bloque NXT, cuando se apriete el botón de ese sensor se genera un uno y en caso contrario el sensor genera un cero. La variable etiquetada como “QRD” corresponde a la señal generada por el circuito de detección del límite del área de trabajo, el cual genera a su salida un uno indicando que el modelo ha llegado al perímetro delimitado en la superficie, o un cero cuando esta dentro del área de trabajo. Los estados que componen esta máquina son tres: “INICIO”, “AVANZA” y “GIRA”. En el primer estado “INICIO” el modelo permanecerá inmóvil, en el segundo estado “AVANZA” el modelo se desplazará siguiendo una trayectoria recta y en el último estado “GIRA” el modelo realizará un giro durante un periodo de tiempo  $\Delta t$  para modificar su trayectoria de avance y evitar que salga de su área de trabajo.

La máquina de estados descrita en el párrafo anterior es programada en el bloque NXT con la ayuda del software RobotC. A continuación se presenta la secuencia de acciones que realiza el modelo con base en esta máquina.

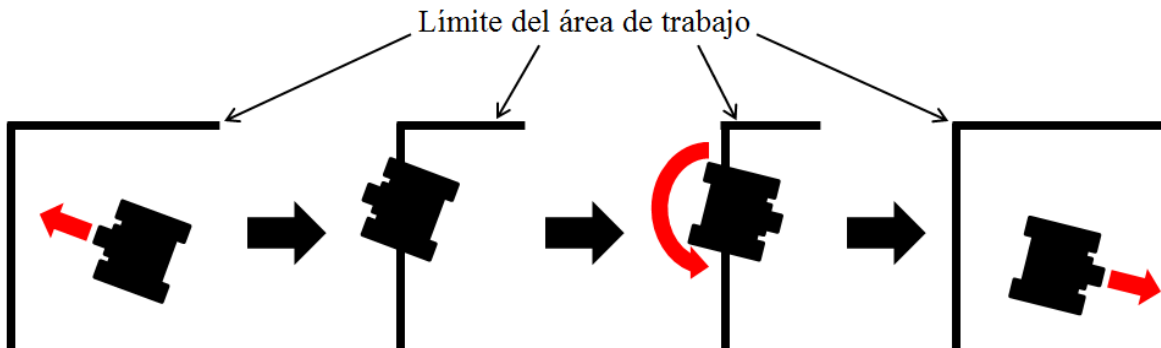


Figura 131. Secuencia seguida por el modelo para la detección de los límites del área de trabajo

Ahora que se tiene una rutina en la que el modelo no sale de un área determinada es necesario integrar en la máquina de estados otra función del subsistema de detección, la cual es la localización de fuego en un punto diferente a la trayectoria de avance del modelo y que será realizada por los sensores PIR. La figura 132 muestra el modelo de la máquina propuesta con la adición antes descrita.

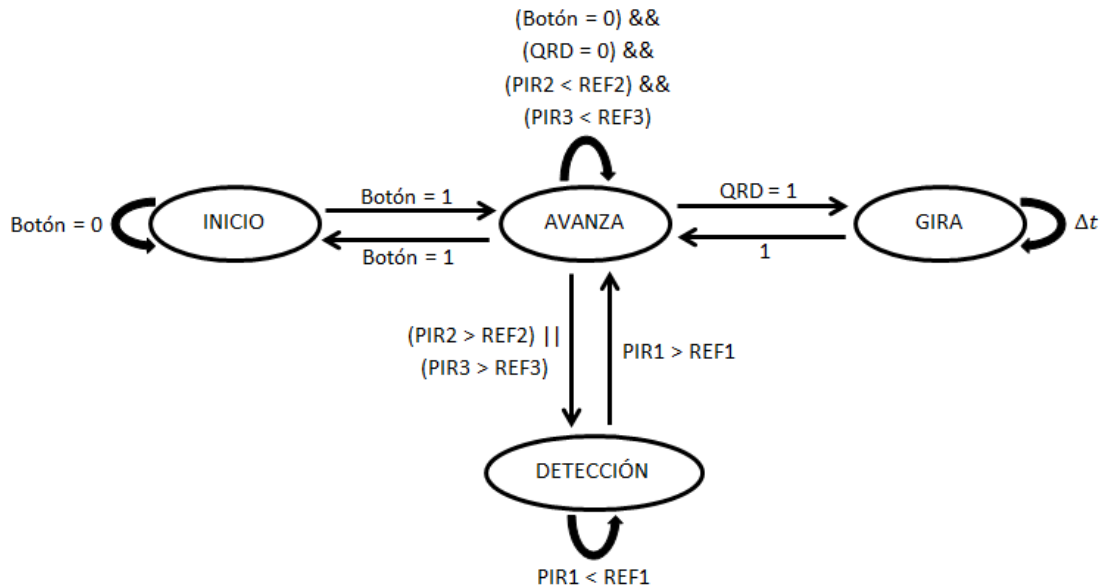


Figura 132. Máquina de estados para la detección del fuego en otro punto de la trayectoria del modelo.

En la figura 132 se observa que a la máquina de estados para la detección del límite del área de trabajo se agregó un cuarto estado llamado “DETECCIÓN”. Como variables de transición a este estado se hace uso de las etiquetas “PIR2” y “PIR3”, estos corresponden a las señales de los sensores PIR colocados en los laterales del modelo, cuando un sensor PIR detecte la presencia de fuego durante la trayectoria del modelo el valor registrado de su señal de salida superada la referencia establecida. Se hace mención también de una etiqueta llamada “PIR1” que corresponde a la señal proporcionada por el sensor colocado el frente del modelo, su función será la misma que se describió para los sensores “PIR2” y “PIR3”. En el estado de detección, el modelo realizará un giro en la dirección del sensor lateral que detecto la presencia de fuego hasta que el frente del modelo este en la dirección del fuego.

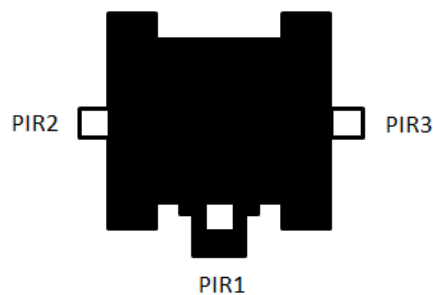


Figura 133. Posición de los sensores PIR para realizar la tarea de detección de fuego.

Con la incorporación de la función de detección en el código de programación realizado en RobotC, el modelo realiza la siguiente secuencia.

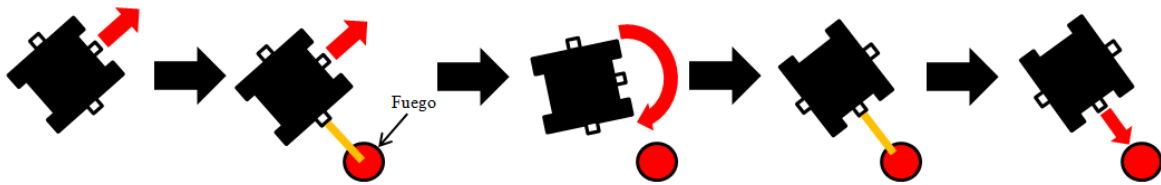


Figura 134. Secuencia seguida por el modelo para la detección de fuego en otro punto distinto a su trayectoria.

En las pruebas realizadas se observa que el modelo cumple con la función de cambiar su trayectoria al momento de detectar la presencia de fuego para dirigirse hacia el, para poder detectar el fuego durante el avance del modelo es necesario volver a retomar la función del primer sensor propuesto para el subsistema de detección, el LM35.

Como se hace mención durante las pruebas con el modelo, el uso del LM35 permite determinar la presencia de fuego durante la trayectoria que seguía el modelo, sin embargo, se identifica un problema: el tiempo de respuesta del sensor es alto, lo que provocaba que al detectar la flama tome un poco más de tiempo para detenerse y entonces el motor utilizado por el batefuego quede en contacto con el fuego generando daños en su estructura. Debido a lo anterior resulta conveniente hacer uso de otro sensor que cumpla con la detección del cambio de temperatura en el medio a causa del fuego y tenga un menor tiempo de respuesta.

Para cumplir con lo anterior, se decidió emplear el sensor propuesto por la combinación número 3 para el subsistema de detección, es decir, el termistor.

Para determinar la presencia de fuego, al igual que el sensor LM35, se propone hacer uso de un circuito comparador. Debido a que el termistor varía su resistencia en función de la temperatura ambiental, se coloca a éste en serie con una resistencia de 10[KΩ] considerando la misma situación expuesta previamente en este capítulo para el LDR. El circuito propuesto se muestra en la figura 135.

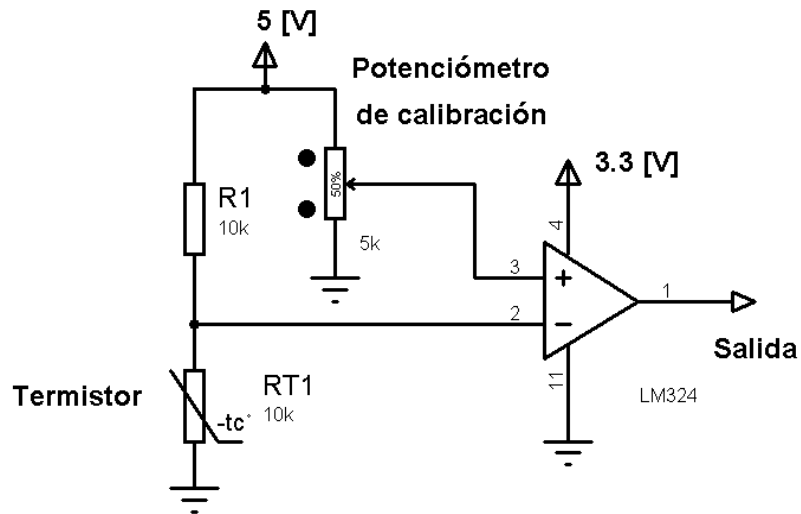


Figura 135. Circuito propuesto para la detección de fuego con el termistor.

Se implementa físicamente el circuito comparador para tres termistores, estos últimos fueron colocados al frente del robot con el uso de una viga de LEGO acoplada al motor del batefuego, como se muestra en la figura 136, esto permite que los sensores estén a una altura lo mas cercana al plano de desplazamiento para detectar el fuego superficial.

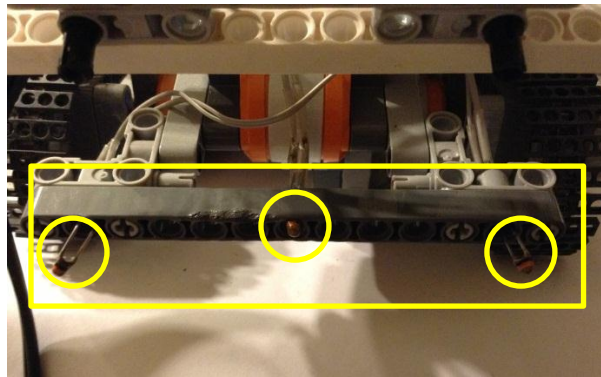


Figura 136. Posición de los termistores en la estructura del modelo.

Una vez colocados los termistores en su posición se procede a la construcción del batefuego, considerando que debe tener el grado de libertad adicional para poder descender hasta el plano donde este la llama y adaptarse al mismo. Se propone un área mayor para el batefuego que permita sofocar una mayor extensión de fuego.

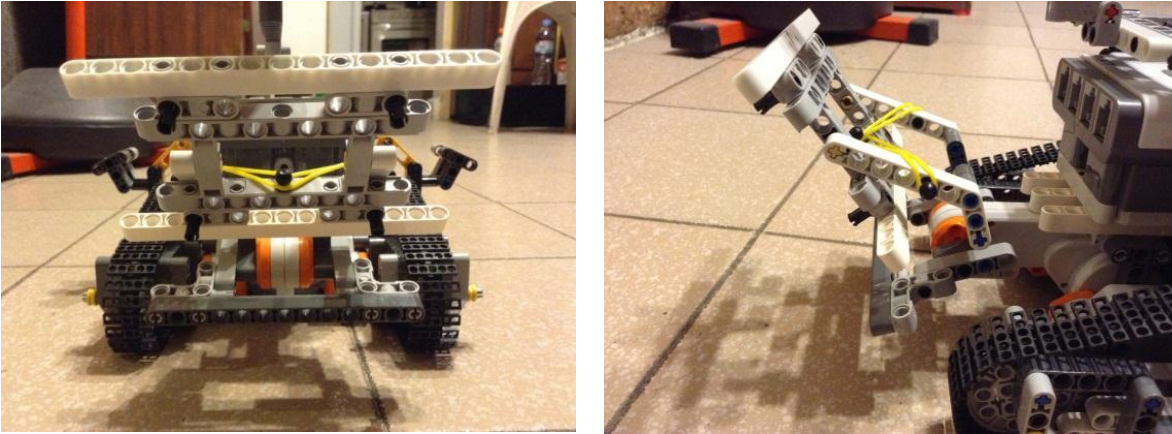


Figura 137. Nueva estructura para el batefuego.

Para poder sujetar el caucho vulcanizado a la estructura del batefuego se colocan en la estructura cuatro conectores de fricción, como se muestra en la figura 138. Una vez cortado el caucho a la medida del área propuesta se hacen cuatro barrenos coincidentes con la posición que ocupan los conectores de fricción.

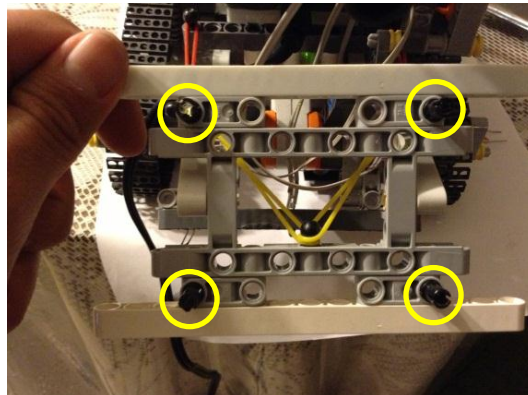


Figura 138. Posición de los conectores para colocar el caucho a la estructura.

Para solucionar el problema que presenta el batefuego de dos grados de libertad, en donde la estructura que contenía al caucho giraba antes causando que esta parte llegaría perpendicularmente a la superficie, se utilizan las ligas de LEGO para sujetar y limitar el grado de libertad del batefuego y sujetarlo con las vigas acopladas al actuador, como se muestra en la figura 139. Debido a su elasticidad, las ligas permiten que la base pueda girar para adaptarse a la superficie y tener la fuerza para generar un par que evite el giro que presenta el primer batefuego.

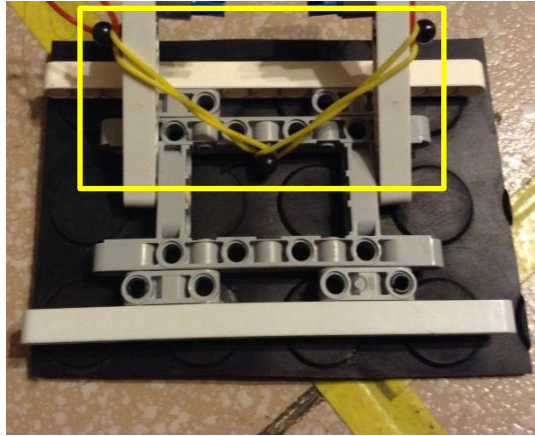


Figura 139. Ligas utilizadas para evitar el giro del batefuego al momento de descender a la superficie.

Para poder realizar los movimientos necesarios para el batefuego se recurre en la programación del bloque NXT al empleo de la información proporcionada por el encoder del actuador. Entre los inconvenientes de hacer uso del encoder se observa que es necesario ajustar el batefuego a una posición inicial antes de hacer la adquisición de su información. Para dar una solución al anterior problema se decide incorporar en la estructura del modelo un sensor de contacto, a fin de utilizarlo como inicio y final de carrera para el movimiento del batefuego, de tal forma que este punto se vuelva la referencia del encoder para su posterior descenso.

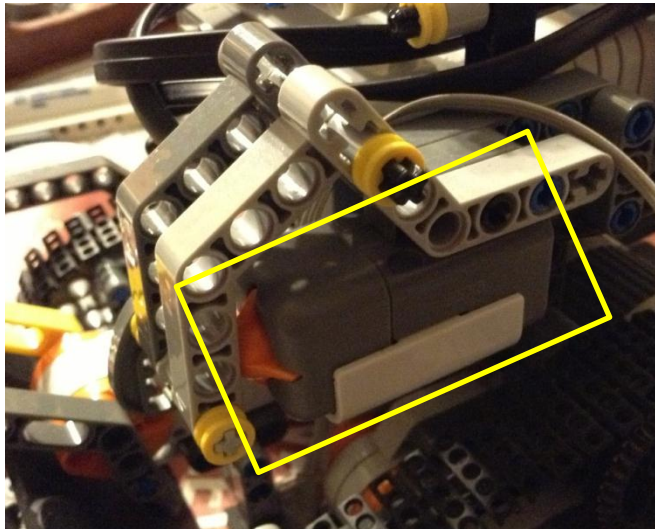


Figura 140. Sensor de contacto para el fin de carrera del batefuego.



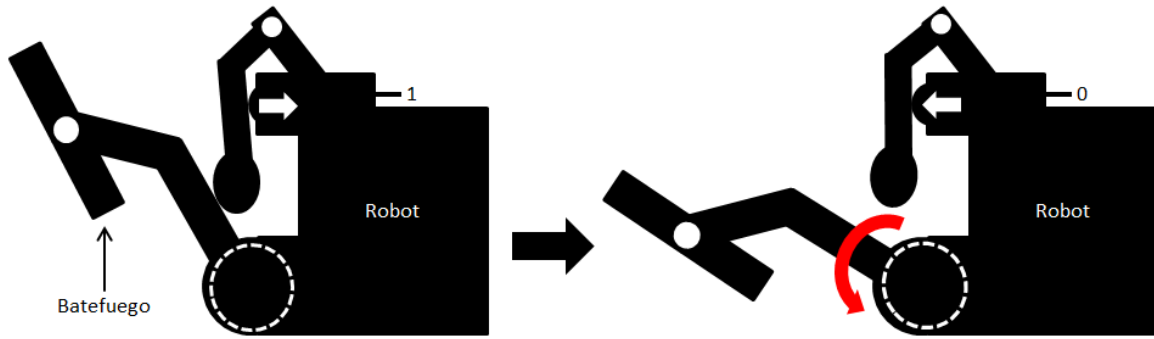


Figura 141. Secuencia de funcionamiento del sensor de contacto para el movimiento del batefuego.

Para probar el funcionamiento del batefuego, se programa en RobotC una rutina en la cual se monitorea la salida del circuito comparador del termistor y al presentarse un estado digital alto (presencia de fuego) baja el batefuego y posteriormente regrese a su posición inicial. En este caso se hace uso de un cerillo como fuente generadora de fuego para validar el funcionamiento.

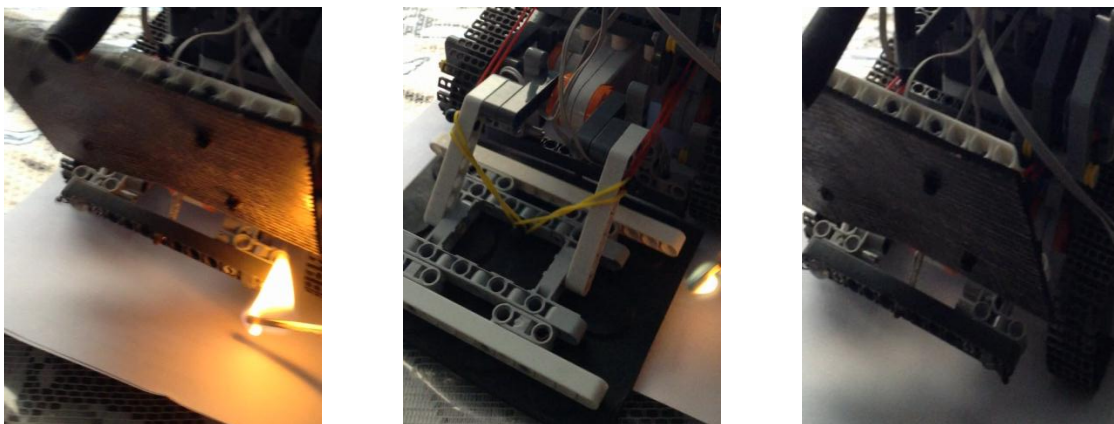


Figura 142. Prueba para observar el funcionamiento de los termistores y el batefuego.

De la prueba anterior se observa que el termistor detecta la presencia del fuego con un menor tiempo de respuesta en comparación con el sensor LM35, con lo cual permite el oportuno funcionamiento del actuador del batefuego haciendo que la estructura descienda hasta el plano del fuego superficial. Con respecto a la estructura del batefuego se observa que las ligas utilizadas impiden que el caucho vulcanizado gire sino hasta el momento en que se encuentre en contacto con la superficie para poder sofocarlo adecuadamente. Por último, el sensor de contacto le permite al batefuego poder volver a su posición inicial y darle así un punto de referencia al encoder del motor para su posterior descenso.

Ahora que se cuenta con el batefuego y los sensores utilizados para la detección del fuego en la trayectoria que siga el modelo, se incorporan las funciones de éstos dentro del esquema de máquina de estados quedando con esta modificación como se observa en la figura 143.

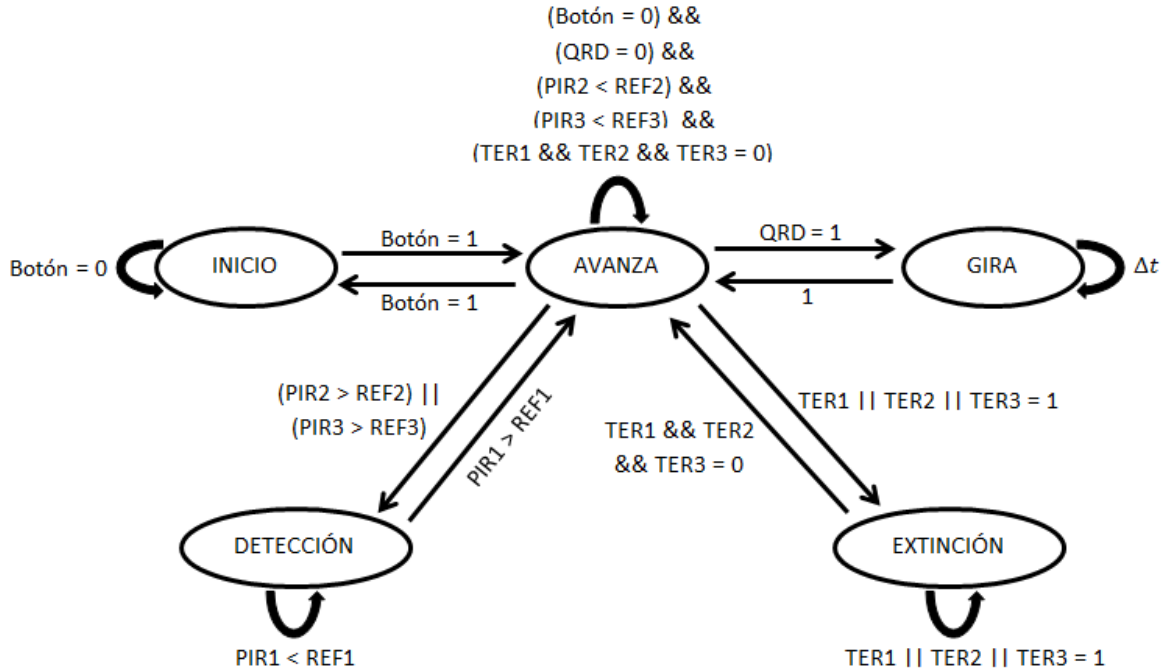


Figura 143. Máquina de estados para la detección del fuego en la trayectoria del modelo.

En esta máquina de estados aparecen las variables de transición llamadas “TER1”, “TER2” y “TER3”, los cuales corresponden a las salidas de los tres circuitos comparadores utilizados para los termistores. Debido a que solo es importante detectar la presencia de fuego sin hacer caso cual de los tres sensores lo registro, se realiza una operación OR con las variables permitiendo que al estar uno o varios en un estado digital alto den como resultado un uno que permita la transición. La anterior operación se utiliza para que la máquina se mantenga en el estado de “EXTINCIÓN”. En dicho estado el modelo detendrá su avance y hará bajar el batefuego para sofocar el fuego detectado, para después continuar con su trayectoria.

Después de agregar el estado de “EXTINCIÓN” en el código de programación del bloque NXT, se realiza una prueba para apagar un fuego intencional, como se observa en la figura 144.

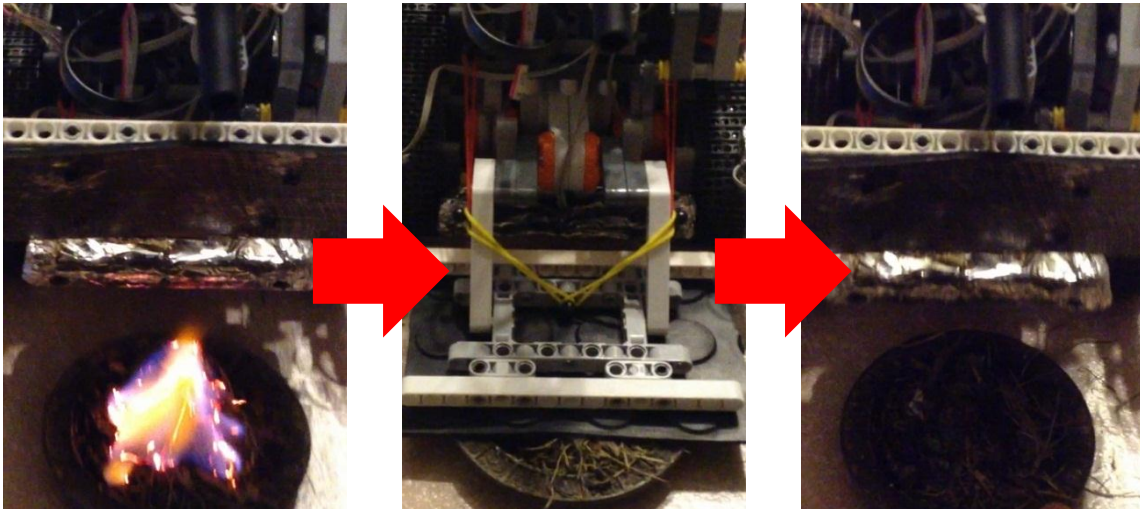


Figura 144. Secuencia seguida por el modelo para la detección de fuego en la trayectoria del modelo.

Como se observa en la figura 144, el modelo logra detectar la presencia del fuego dentro del cenicero y con ello indicarle al bloque NXT el hacer uso del batefuego para sofocarlo con lo cual se cumple la función del estado de “EXTINCIÓN”. Es importante mencionar que la máquina de estados implementada se considera completa debido a que permite reunir toda la información proporcionada por los sensores del subsistema de detección y que será procesada por el bloque NXT. En esta etapa el bloque cuenta con la lógica a seguir para cumplir con la detección y extinción del fuego dentro de un área determinada, mediante la información que proporcione a los subsistemas de desplazamiento y de extinción para su funcionamiento.

Durante las pruebas para observar el funcionamiento de la máquina de estados se detecta una situación en la cual el fuego se propaga por el suelo a causa del pasto que queda de pruebas anteriores, llegando por debajo de la estructura del modelo y dañando el motor del batefuego. Lo anterior permite observar que el modelo carece de una protección en la parte inferior que evite la entrada del fuego por debajo de la estructura y causa daños en otras partes del mismo.

Una propuesta para obtener esta protección es hacer uso del mismo caucho utilizado en el batefuego, debido a que en las pruebas para sofocar las llamas presenta una buena resistencia al calor generado, por lo cual se corta un rectángulo de este material como se muestra en la figura 145.



Figura 145. Rectángulo de caucho utilizado para la protección inferior del modelo.

Para poder colocarlo el rectángulo de caucho en la parte inferior frontal del modelo, se utilizan algunas vigas de LEGO unidas a la estructura de la oruga. Estas vigas tienen la característica de contar con una inclinación, en la cual se adhiere el caucho.

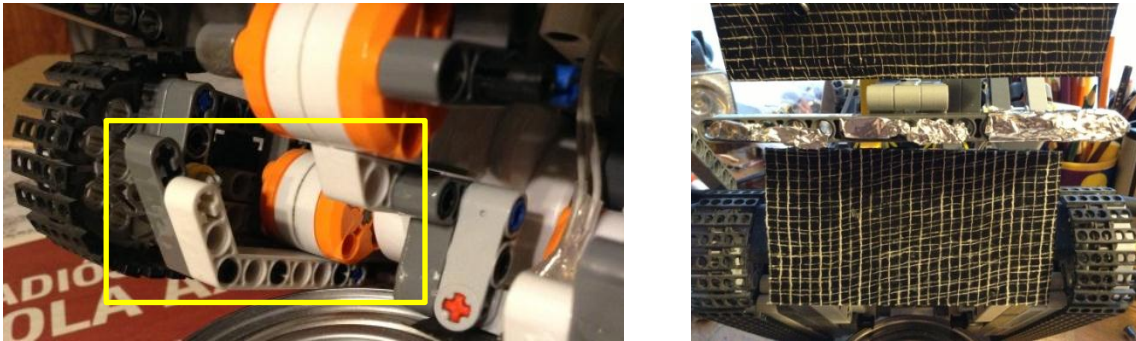


Figura 146. A la izquierda piezas de LEGO utilizadas para colocar el caucho y a la derecha vista del caucho adherido a la estructura.

Después de colocar el caucho en su posición, se observa que la viga que contiene a los termistores interfiere con éste, evitando que el batefuego descienda hasta el plano del fuego superficial para sofocarlo. Para solucionar este problema se opta por utilizar unas vigas que unan el ya mencionado elemento con la estructura del batefuego a una distancia más alejada de la parte frontal del modelo, como se observa en la figura 147.

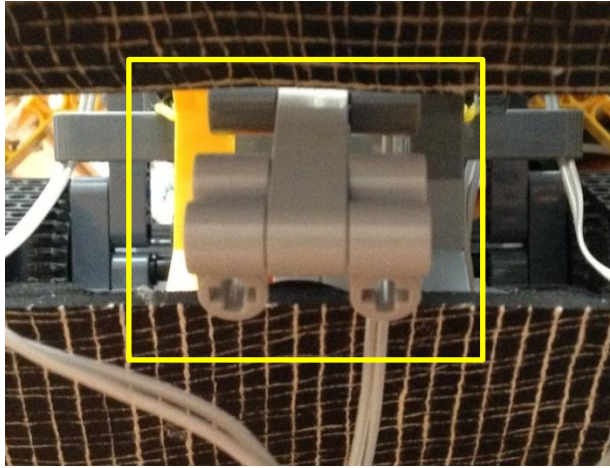


Figura 147. Piezas de LEGO que evitan que la viga con los termistores choque con el caucho de protección.

Debido a la anterior modificación, el peso de la estructura del batedfuego se incrementa al grado de que el actuador que se utilizaba para sus funciones sea incapaz ya de sostenerlo. Una propuesta de solución que permita proporcionar la fuerza para soportar el peso de la estructura y también proporcione los movimientos necesarios para sofocar el fuego es hacer uso de las ligas de LEGO sujetadas a la base del robot, como se muestra en la figura 148, ya que distribuyen la carga del peso del batedfuego hacia la estructura del dispositivo.

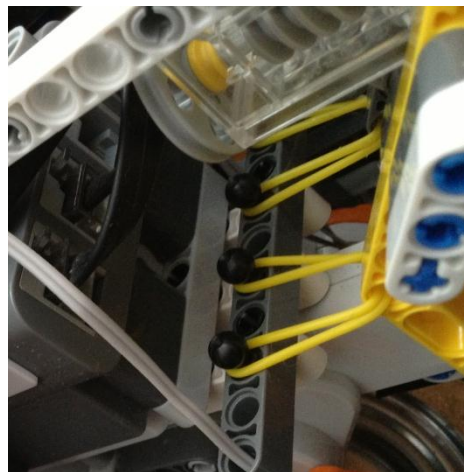


Figura 148. Ligas utilizadas para sostener la estructura del batedfuego.

También para mejorar la detección de fuego en la parte frontal del modelo se agregaron dos termistores en la viga, como se muestra en la figura 149.

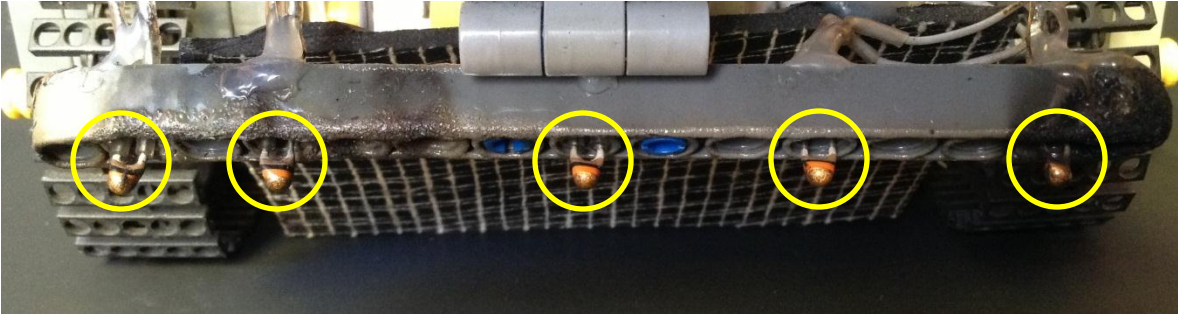


Figura 149. Posición de los termistores sobre la viga

Finalmente se muestran las figuras del modelo virtual obtenido con todas las modificaciones ya mencionadas y todas las consideraciones realizadas para cumplir con los subsistemas.

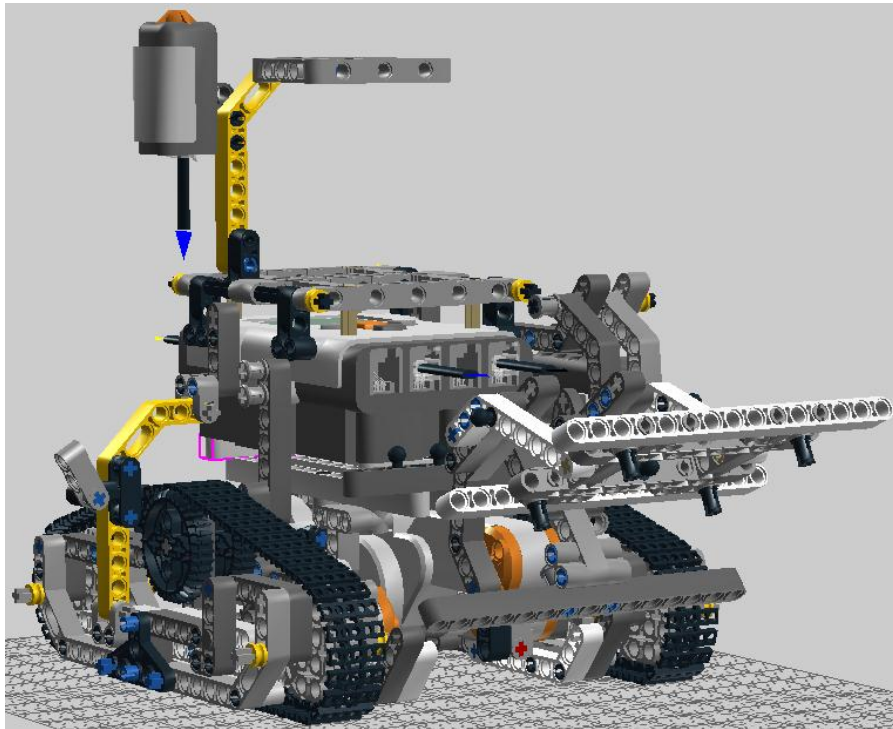


Figura 150. Modelo final realizado en el software Lego Digital Designer.

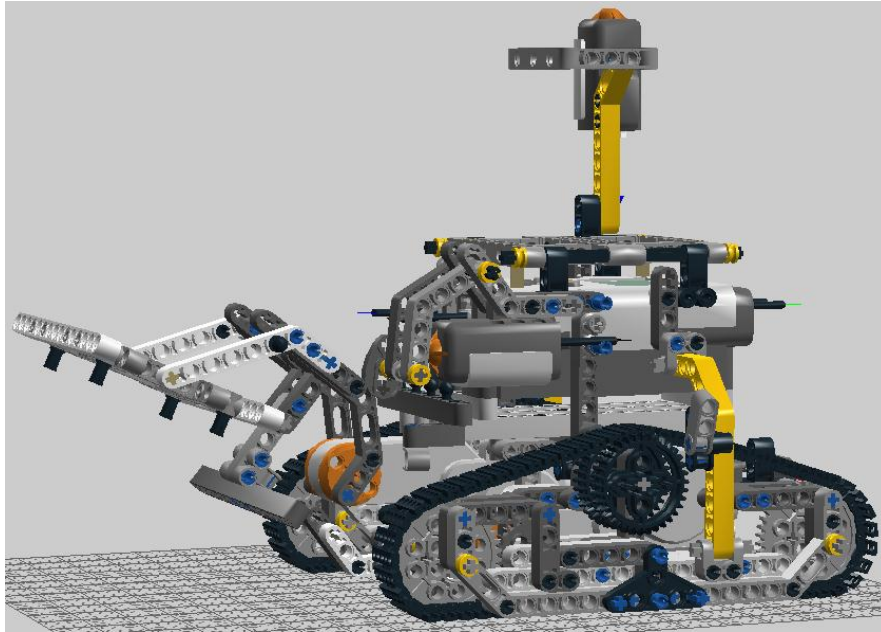


Figura 151. Vista lateral del modelo virtual.

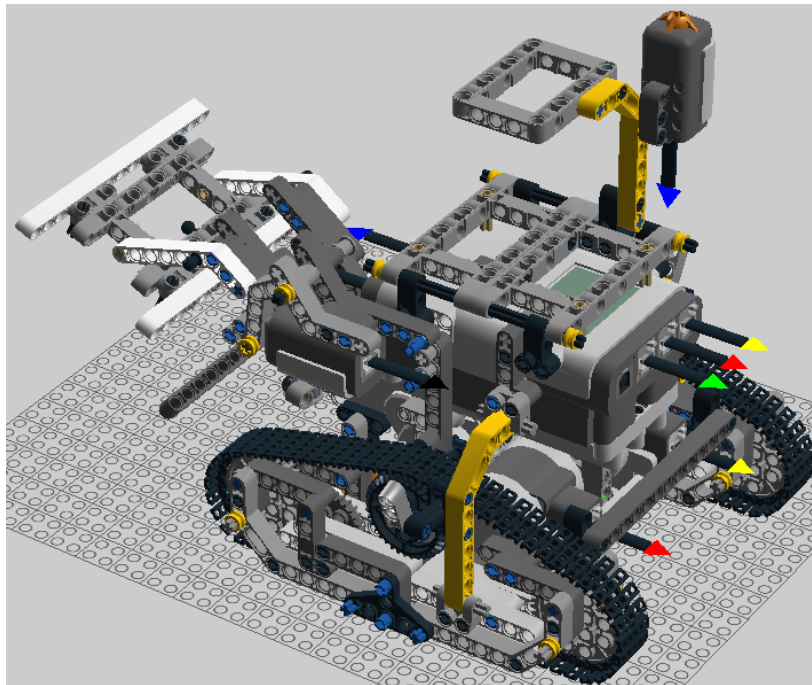


Figura 152. Vista superior del modelo virtual.

También se muestran las figuras del modelo físico realizado con base en el manual de construcción que se genera con el programa y que se encuentra en el disco con el nombre “modelo final”.

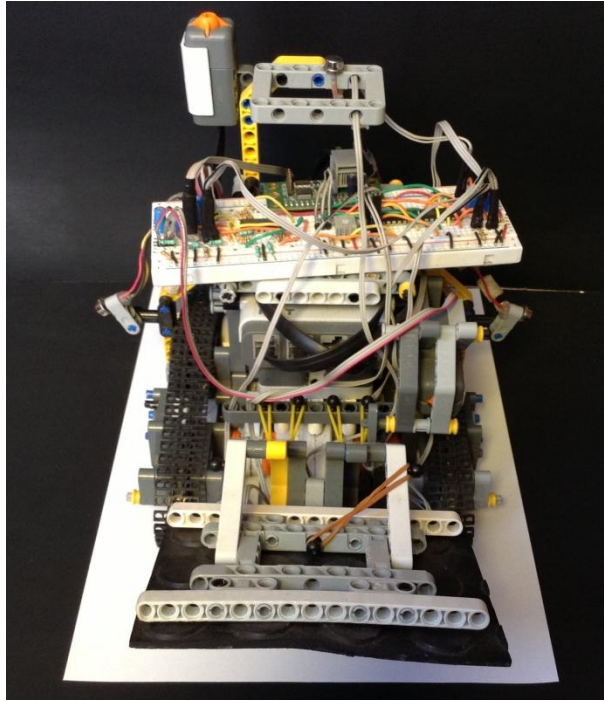


Figura 153. Vista frontal del modelo físico.

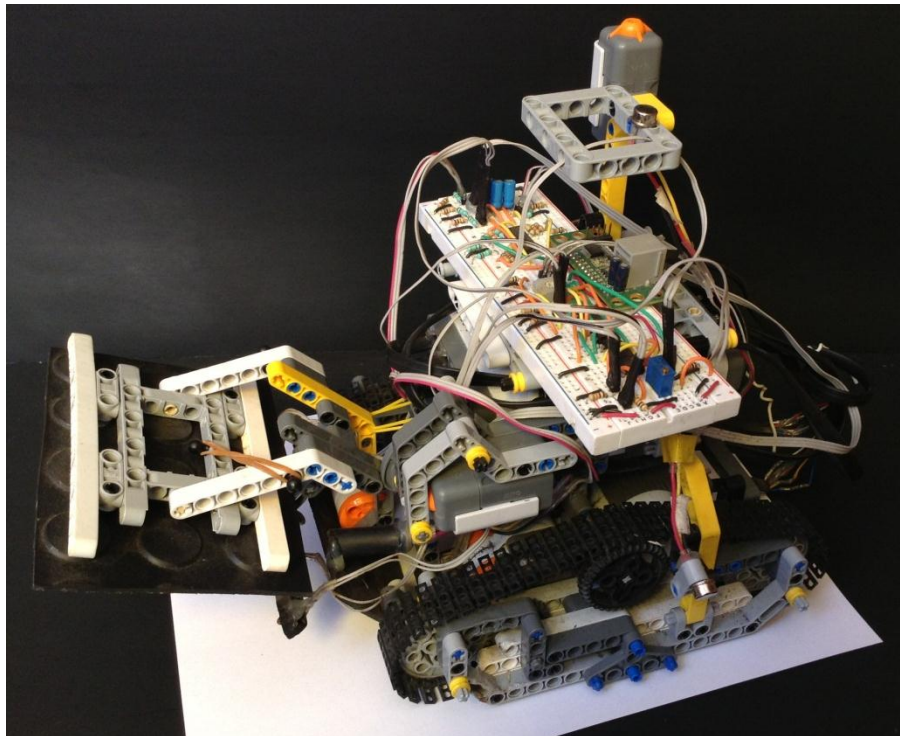


Figura 154. Vista lateral del modelo físico.



### 3. Pruebas finales y resultados

Como resultado del proceso de diseño presentado en el capítulo 2 se obtiene un modelo funcional, que cuenta con los elementos necesarios para detectar y extinguir fuego dentro de un área de trabajo. Ahora es necesario realizar pruebas con el para poder probar si su funcionamiento es correcto y satisface hasta cierto grado el campo de oportunidad identificado, es decir, la prevención de incendios forestales.

Antes de probar el funcionamiento del modelo, lo primero a realizar es ajustar la referencia de los sensores PIR dentro de la programación del bloque NXT para que permitan determinar la presencia de fuego. Para conocer el valor de la referencia se utilizará el depurador en tiempo real con el que cuenta el software RobotC, como se muestra en la figura 155, con la finalidad de poder observar los valores analógicos que proporcionan los tres sensores PIR.

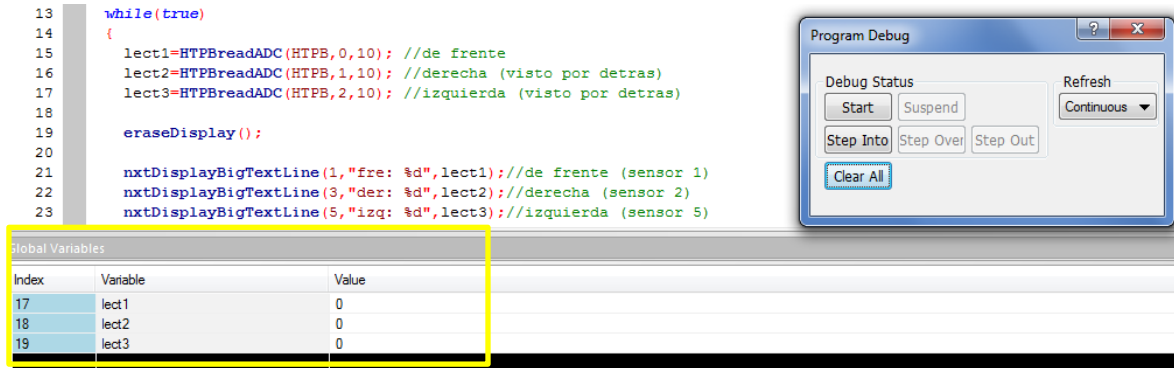


Figura 155. Captura de pantalla del depurador para observar los valores analógicos de los sensores PIR.

En el código que se muestra en la figura 155 se emplean tres variables denotadas como lect1, lect2 y lect3, las cuales registran el valor analógico de un sensor PIR acorde a lo que se muestra en la figura 156.

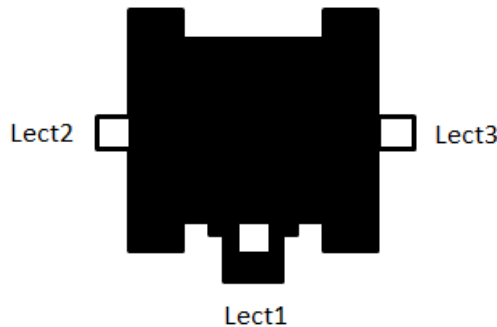


Figura 156. Variables utilizadas en el programa junto a su correspondiente sensor PIR.

Al momento de ejecutar el programa, se observa en la pantalla los valores analógicos que registra el software del bloque NXT, como se visualiza en la figura 157.

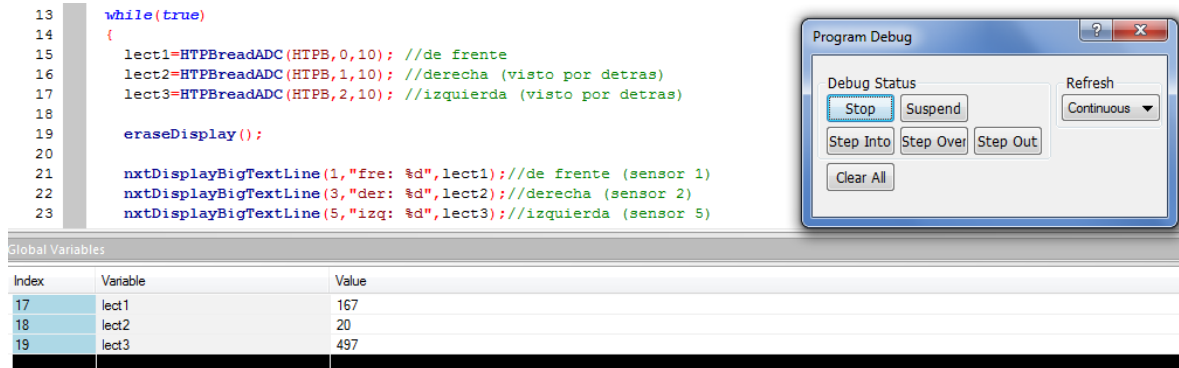


Figura 157. Ejecución del programa y registro de los valores analógicos.

Se realizaron diversas pruebas con este código, tanto en interiores como en exteriores, para poder observar los valores que registra cada sensor PIR ante la radiación ambiental únicamente y con base en ello decidir el valor más apropiado para ser utilizado como referencia durante las pruebas con el modelo, como se observa en la tabla 24. Es importante mencionar que los valores presentados no fueron los únicos en ser utilizados, ya que las condiciones ambientales del lugar hacían necesario cambiar nuevamente el valor de referencia.

Tabla 24. Valores analógicos registrados por los sensores PIR

Variable	Rango de valores analógicos	Valor utilizado como referencia
lect1	150 - 190	195
lect2	7 - 50	70
lect3	470 - 550	560

Una vez determinados los valores de referencia para los sensores PIR se procede a calibrar los circuitos comparadores utilizados por los termistores con la ayuda del potenciómetro de calibración. Lo anterior con la finalidad de que los circuitos no presenten un estado digital alto sin haber presencia de fuego.

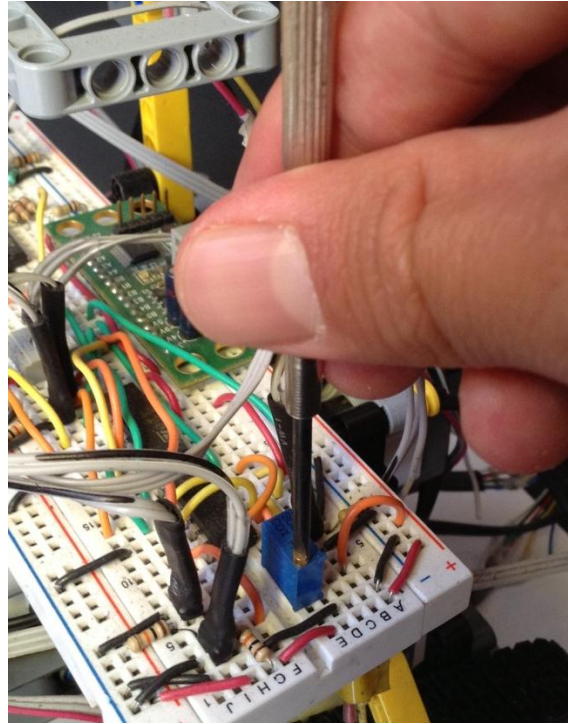


Figura 158. Ajuste de la referencia para los circuitos comparadores utilizando el potenciómetro.

Al terminar de calibrar los sensores utilizados para la detección de fuego se realiza una prueba con el modelo siguiendo la lógica establecida por la maquina de estados que se programa en el bloque NXT.

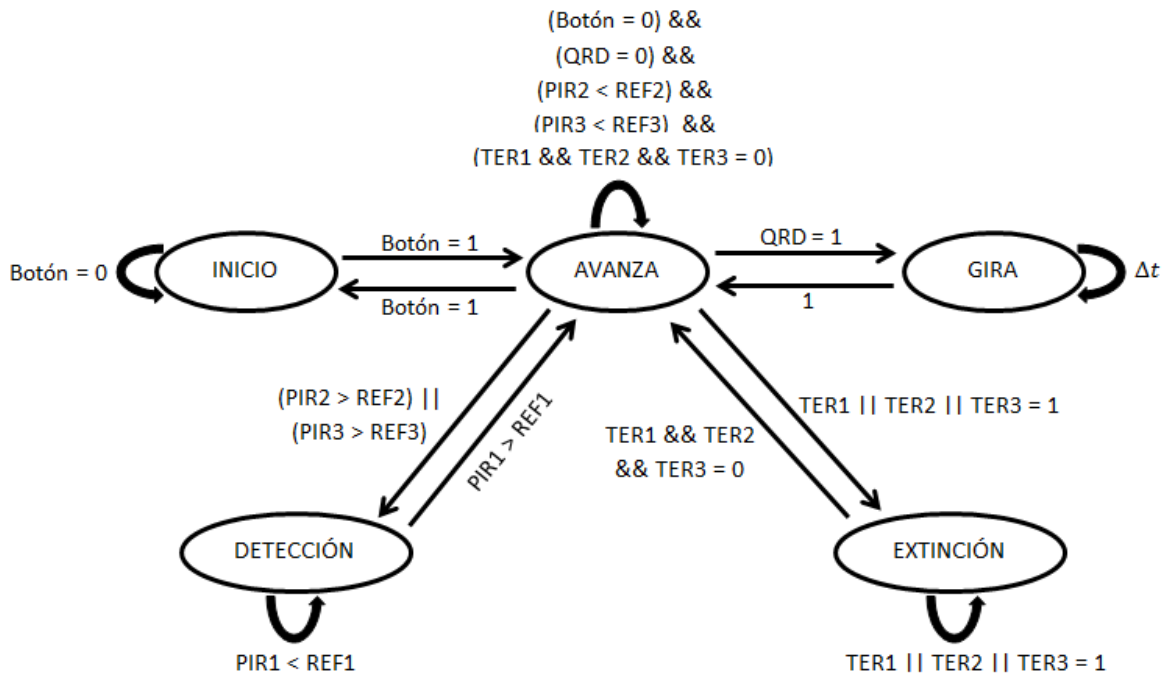


Figura 159. Máquina de estados implementada para el modelo.

A continuación se muestra la secuencia realizada por el modelo funcional para detectar y apagar el fuego generado dentro de un cenicero metálico. Al ejecutar el programa, el robot se encuentra en el estado de “INICIO”, por lo cual no se moverá hasta presionar el botón de contacto, como se muestra en la figura 160.

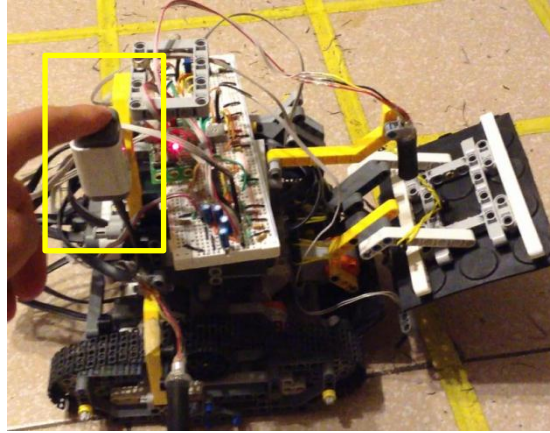


Figura 160. El modelo se mantiene en el estado “INICIO” hasta presionar el botón de contacto.

Después de presionar el botón de contacto el modelo pasa al estado de “AVANZA”, siguiendo una trayectoria en línea recta.

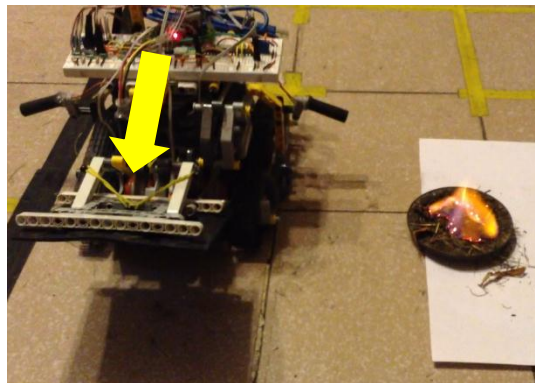


Figura 161. Desplazamiento del modelo en el estado “AVANZA”.

En esta prueba se coloca el cenicero a un lado de la trayectoria que sigue el modelo, cuando el sensor PIR detecta la presencia de fuego, su señal analógica se incrementa rebasando la referencia que se estableció durante la calibración. La distancia a la cual el sensor detecta la presencia de fuego esta entre los 15 y 20 [cm].

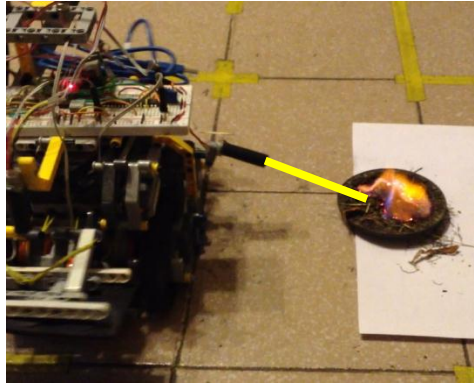


Figura 162. Detección del fuego por el sensor PIR en la parte lateral del modelo.

Al presentarse la situación descrita en el párrafo anterior, el modelo pasa al estado “DETECCIÓN”, en el cual realiza un giro en la dirección del sensor PIR que detecto la presencia de fuego, esto lo realizará hasta que la señal del sensor situado al frente rebase su referencia, con ello la dirección de avance del modelo coincidirá con la posición en la que se encuentra el fuego detectado.



Figura 163. Izquierda, giro del modelo en la dirección del sensor PIR que detecta presencia de fuego. Derecha, coincidencia de la trayectoria de avance del modelo con la posición donde se encuentra la fuente de calor.

Una vez que el modelo ajusta su trayectoria en dirección de la flama, el dispositivo regresa al estado “AVANZA”, continuando así su desplazamiento ahora en dirección del fuego detectado.

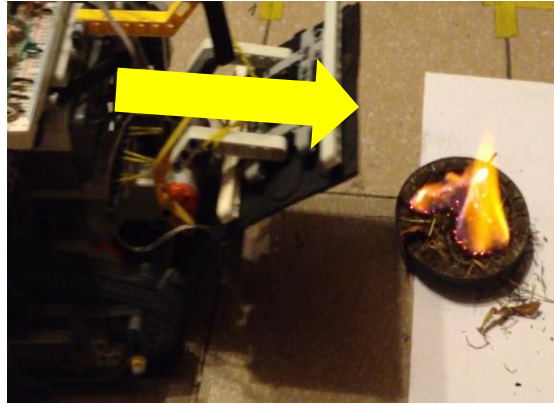


Figura 164. Avance del modelo hacia el fuego detectado.

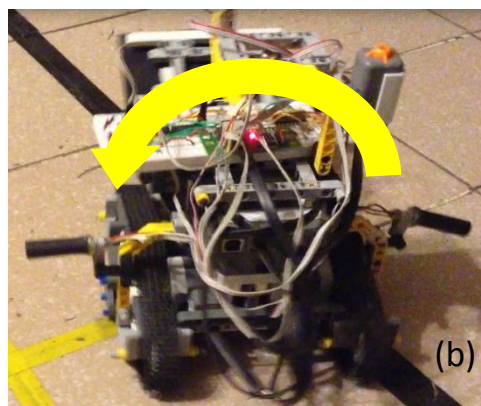
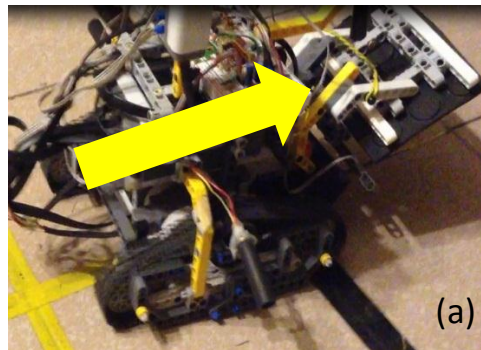
Cuando el modelo avance hacia el fuego y los termistores estén en contacto con la llama, se pasará al estado “EXTINCIÓN”, en el cual el dispositivo se detendrá y bajará el batefuego a la altura del plano de las llamas, posteriormente continuará con su desplazamiento.





Figura 165. (a) El modelo detecta el fuego con los termistores por lo cual detiene su movimiento, (b) hace bajar el batefuego, (c) sube el batefuego para continuar con su desplazamiento.

Si durante la trayectoria del modelo este llega a los límites del área de trabajo, el sensor QRD1114 detectará la línea oscura en el suelo, por lo cual se pasará al estado “GIRA”, en donde el dispositivo realiza un giro un  $\Delta t$  aleatorio para así modificar su trayectoria y evitar su salida de dicha área.



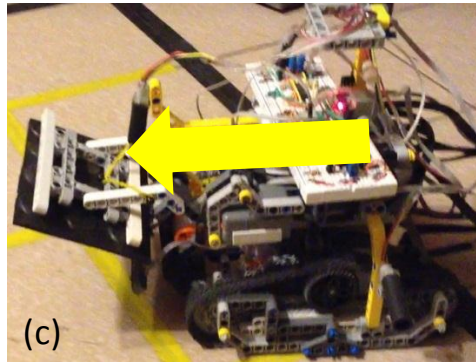


Figura 166. (a) Avance del modelo hasta los límites de su área de trabajo, (b) giro al detectar la línea negra, (c) avance en otra dirección.

Para finalizar la prueba, si se aprieta el sensor de contacto durante el avance del modelo se puede detener su movimiento, para así poder interrumpir la ejecución del programa en el bloque NXT.

Como se observa en la secuencia anteriormente descrita el modelo cumple con la detección y extinción del fuego dentro de su área de trabajo, cumpliendo su principio de funcionamiento con la lógica establecida en la máquina de estados dentro del bloque NXT. Otro resultado fue la identificación de parámetros de los sensores y el batefuego que permiten la propuesta de algunas modificaciones.

Se observa que el circuito comparador utilizado por los termistores para detectar la presencia de fuego presenta un menor tiempo de respuesta para proporcionar un estado digital alto a su salida, sin embargo, se llega a mantener por un tiempo prolongado el mismo estado a pesar de que ya no haya presencia de fuego, por lo cual el modelo permanece más tiempo en el estado “EXTINCIÓN”, lo que evita seguir sofocando el fuego detectado si este llegara a propagarse o no poderse desplazar hacia otros puntos en busca de fuego. Para solucionar lo anterior se observa con un multímetro que cuando los termistores están en contacto con la llama, el potencial aportado en el divisor de voltaje disminuye drásticamente hasta cerca de los cero volts y al momento de retirarse del fuego el voltaje vuelve a aumentar rápidamente hasta un valor limite donde comienza a estabilizarse (histéresis), por lo cual se calibro el circuito comparador a 1.2 [V] para que una vez detectado el fuego el tiempo de recuperación del termistor sea menor, permitiéndole reducir el tiempo necesario para las labores de extinción.

Con respecto al batefuego, se observa en la prueba realizada que cumple con su objetivo de descender hasta el plano de las llamas para sofocarlas, pero solamente en el área donde realice la acción. Lo anterior puede representar un problema en el caso que el fuego se propague hacia los lados donde se encuentra el modelo, ya que en esos puntos el modelo no podría detectar la llama en su avance. Como propuesta de solución se agrega dentro de la



programación del estado “EXTINCIÓN”, algunos giros laterales para que así aumente el área de acción para sofocar las llamas, reduciendo la posibilidad que estas se propaguen.

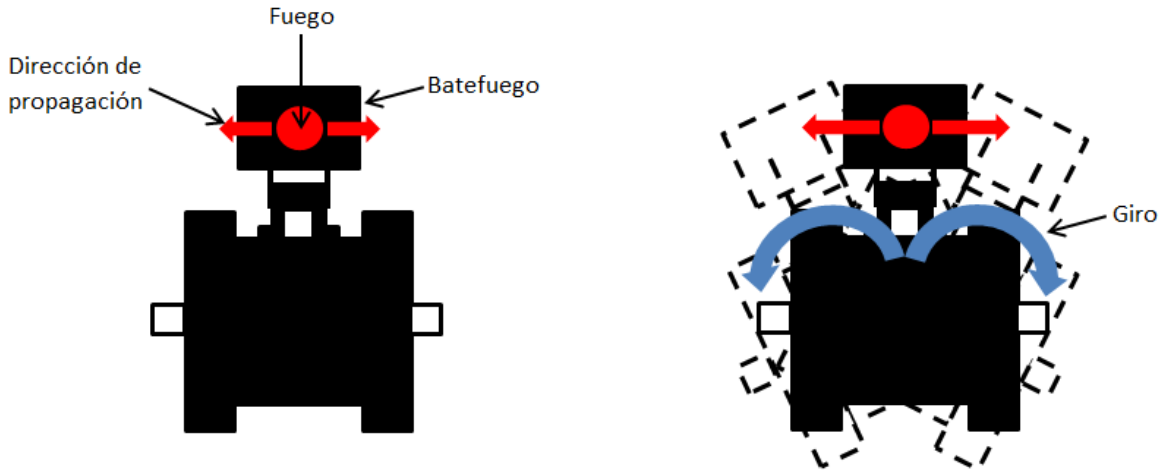


Figura 167. A la Izquierda, posible propagación del fuego hacia los lados del batefuego, y a la derecha, propuesta de giro para aumentar el área de extinción.

Por último, se decide quitar los tubos de plástico a los sensores PIR que se encuentran en los laterales del modelo, a excepción del que se encuentra en la parte frontal, debido a que al reducir el ángulo de visión del sensor se condiciona a que el fuego este forzosamente al frente del dispositivo para ser detectado, con lo cual se consume tiempo que podría ser aprovechado por el modelo para corregir su trayectoria oportunamente y dirigirse a dicho punto. Una vez que sea detectado el fuego es necesario que el sensor PIR frontal mantenga esta reducción en su campo de visión, ya que asegura que el modelo no detenga su giro al detectar el fuego antes, además debido a la altura que alcanzan las llamas se decidió colocar el PIR sobre el caucho vulcanizado para dar protección en la parte frontal como se observa en la figura 169.

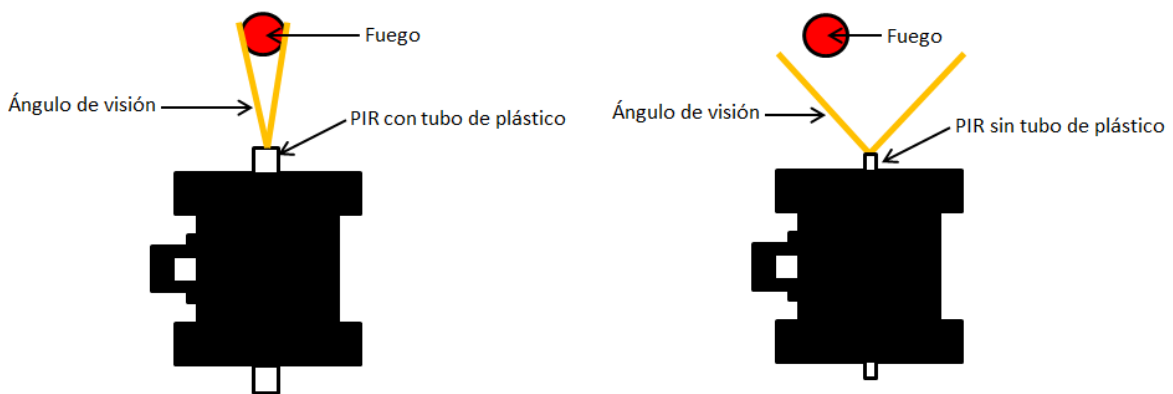


Figura 168. Comparación del ángulo de visión del sensor PIR, a la izquierda con el tubo de plástico y a la derecha sin el uso del mismo.

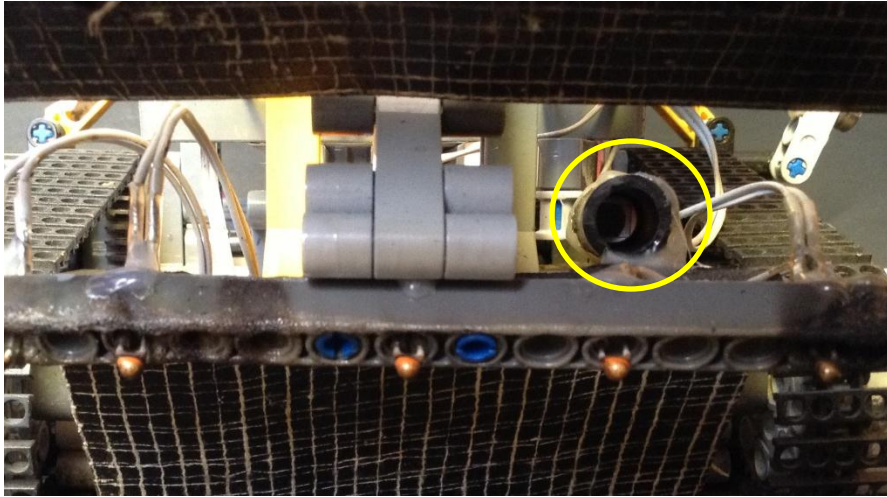


Figura 169. Posición del sensor PIR en la parte frontal.

Realizadas las modificaciones anteriores en el modelo, se procede a realizar dos pruebas finales con el mismo, una en un ambiente interior (luminosidad constante, escasa presencia de corrientes de viento, no hay presencia de fuentes generadoras de infrarrojos, etc.) y otra en el exterior (variaciones en la luz ambiental, cambios en las condiciones meteorológicas, presencia de otras fuentes generadoras de infrarrojos, etc.)

Las dos pruebas se realizarán sobre una misma área de trabajo, constituida por una tabla cuadrada de madera de 1.4 [m] de lado, en la cual se utiliza cinta negra para delimitar el área de trabajo, que igualmente tendrá forma cuadrada, con longitudes de 85 [cm] por lado.



Figura 170. Tabla de madera utilizada para las pruebas finales con el modelo.

### 3.1 Prueba final en el interior

Para esta prueba se utilizan dos ceniceros metálicos como fuentes de fuego colocados dentro del área de trabajo del modelo con la finalidad de representar la aparición de incendios en diversos puntos y también para probar el desempeño de los sensores utilizados para la detección de fuego en la trayectoria del modelo (termistores) o en un punto distinto a su trayectoria (PIR). A continuación se muestran las imágenes de la prueba realizada con el modelo.

En la figura 171 se muestra la posición de las fuentes de fuego antes de comenzar la prueba, con la finalidad que la primera detección la realicen los termistores y después de la extinción del fuego en ese punto el sensor PIR detecte el fuego a un lado de la trayectoria que siga el modelo.

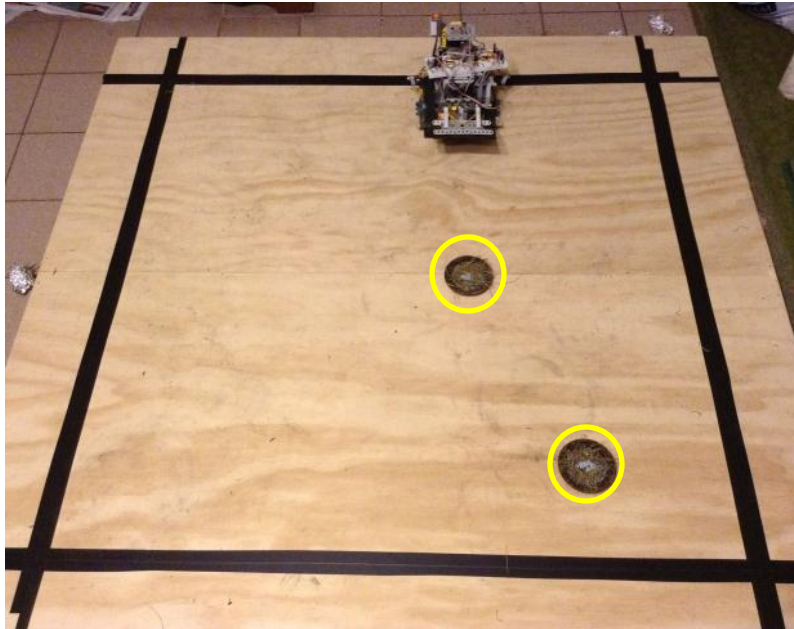


Figura 171. Posición de los ceniceros metálicos antes de la prueba.

Se enciende el modelo y cuando este llegue a la flama los termistores detectan la presencia de fuego, por lo cual desciende el batefuego, además la estructura realiza un pequeño giro para que el batefuego deicienda en otra área, para evitar la propagación del fuego hacia los lados.

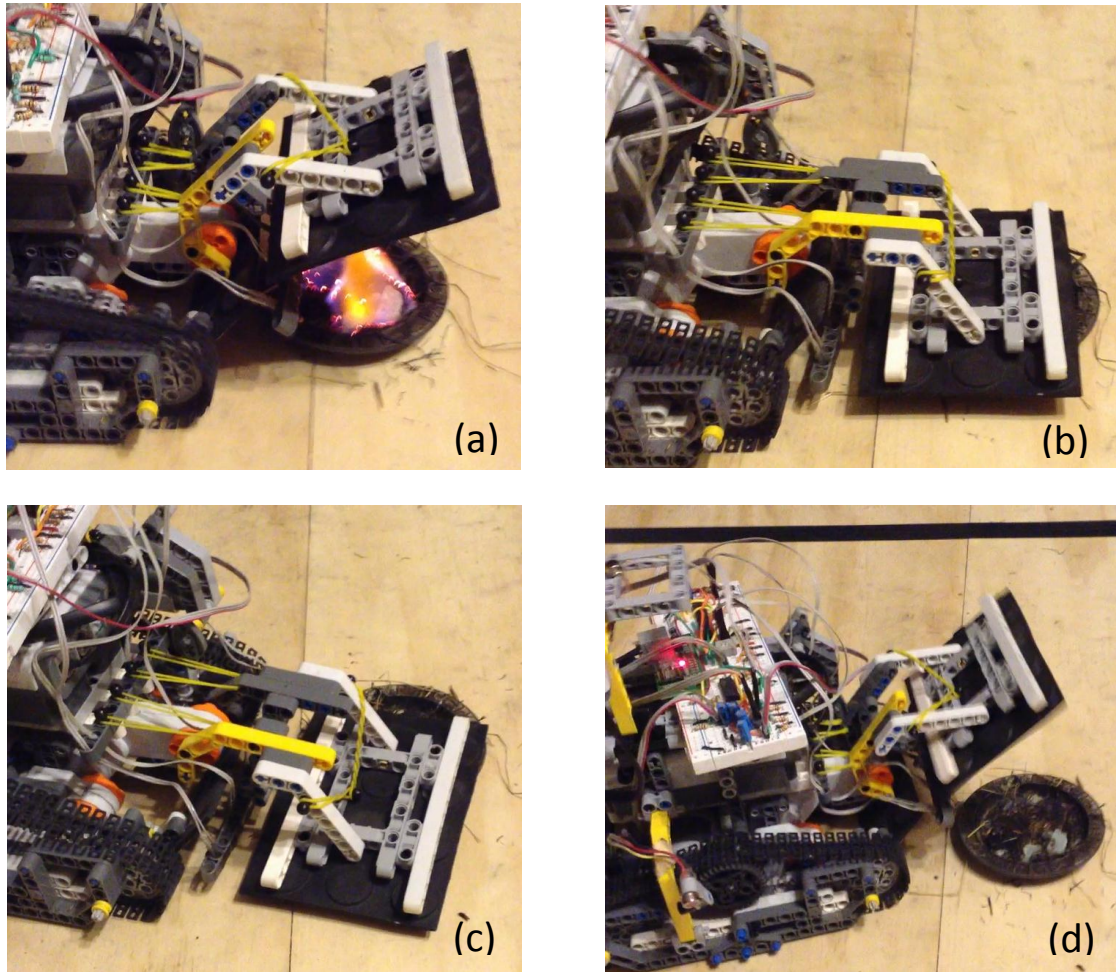


Figura 172. Secuencia de extinción del fuego: (a) detección de los termistores, (b) descenso del batefuego, (c) giro hacia un lado para posteriormente hacer bajar el batefuego, (d) fuego sofocado.

Una vez sofocado el fuego dentro del cenicero, se procede a retirar el mismo de la trayectoria del modelo, con la finalidad que la radiación infrarroja que emite por aún estar caliente sea detectada por los sensores PIR laterales y realice el giro correspondiente.

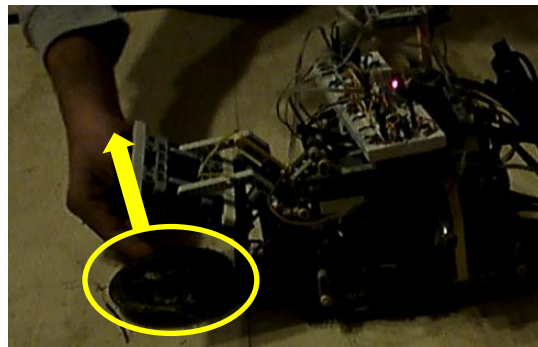


Figura 173. Se retira el cenicero de la trayectoria del modelo.

Ahora que el modelo continúa su desplazamiento, el sensor PIR lateral detectará la presencia de fuego en el segundo cenicero. Se observa que la detección es antes de que el fuego este de frente al sensor, por lo cual consideración de retirar el tubo de plástico fue la correcta. Una vez detectado el modelo gira hasta que el sensor PIR en la parte frontal detecte el fuego.

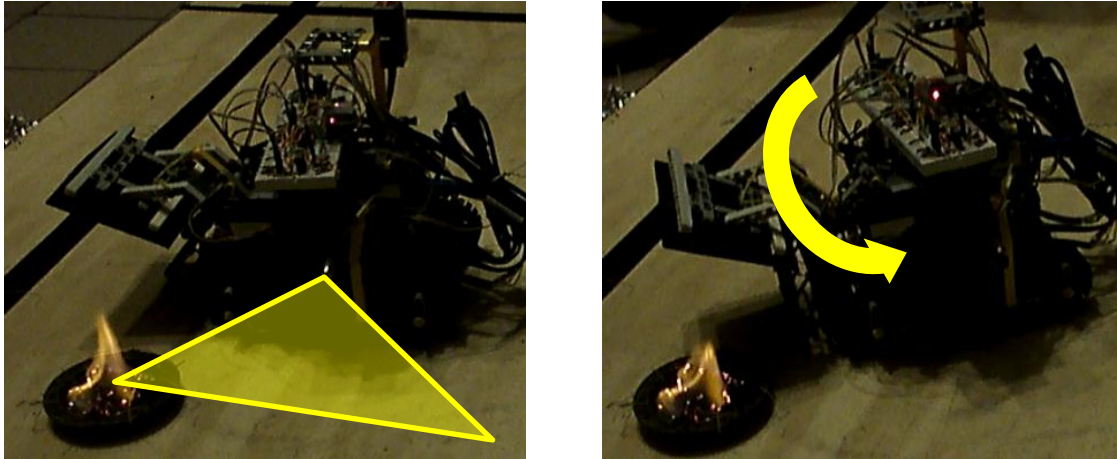


Figura 174. A la izquierda, detección del fuego por el sensor PIR antes que el fuego este frente a el y a la derecha, giro realizado por el modelo para posicionarse en dirección al fuego.

Cuando el sensor PIR de la parte frontal detecta el fuego, detiene el giro de la estructura para avanzar en línea recta hacia el fuego, para que así los termistores perciban su presencia y se baje el batefuego al plano de la llama.

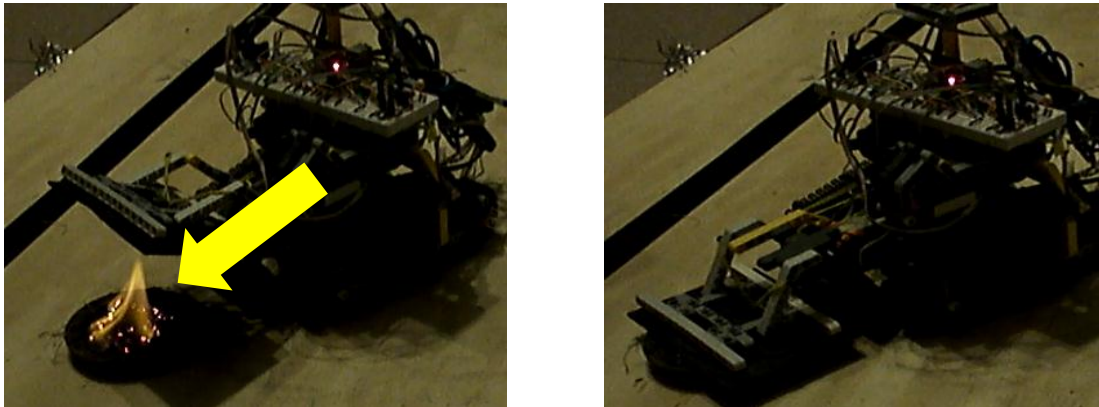


Figura 175. De izquierda a derecha: Avance del modelo una vez que el sensor PIR en al parte frontal detecta el fuego y sofocación del fuego en el recipiente con el batefuego.

Realizada la acción de extinción el modelo continua su desplazamiento pero en esta ocasión se dirige hacia la línea que delimita su área de trabajo, cuando llega a este punto el circuito comparador para sensor QRD1114 indica al modelo que debe realizar su giro para evitar salirse.

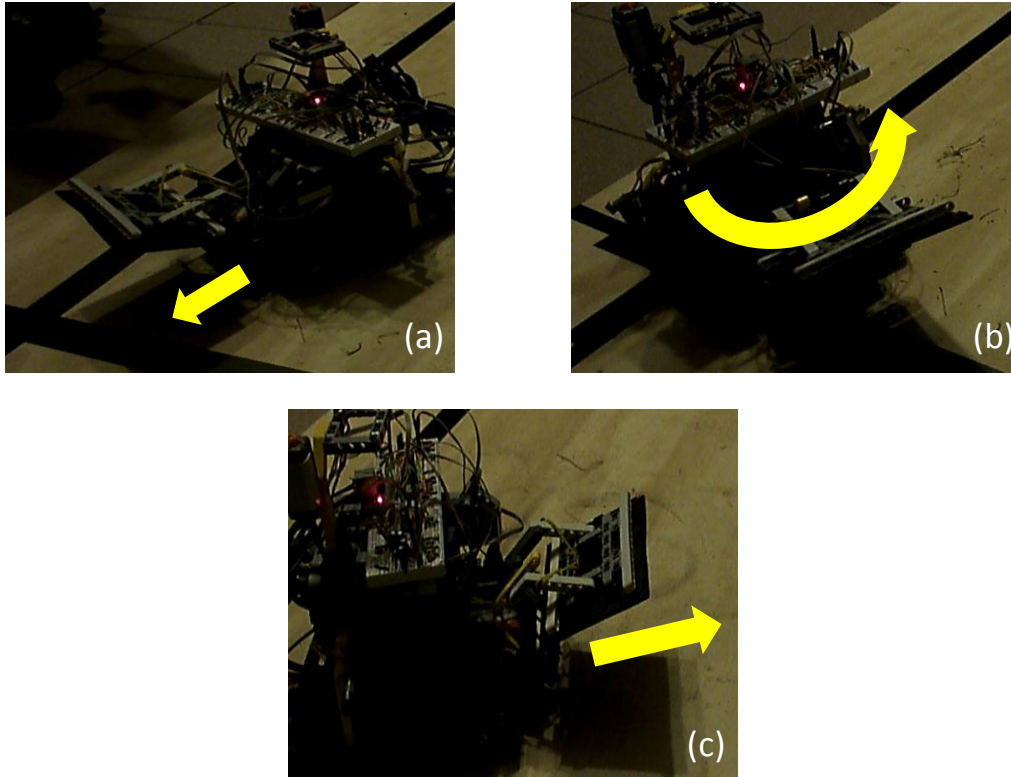


Figura 176. Secuencia de cambio de dirección debido a la detección de la línea de límite de área de trabajo: (a) Avance del modelo hasta los límites de su área de trabajo, (b) giro al detectar la línea negra, (c) avance en otra dirección.

Después se agrega un nuevo punto de fuente de fuego para comprobar que se sigue efectuando la detección de forma cíclica. Al ver que el modelo se dirigió a sofocarlo se comprueba entonces que esta haciendo la detección en todo momento.

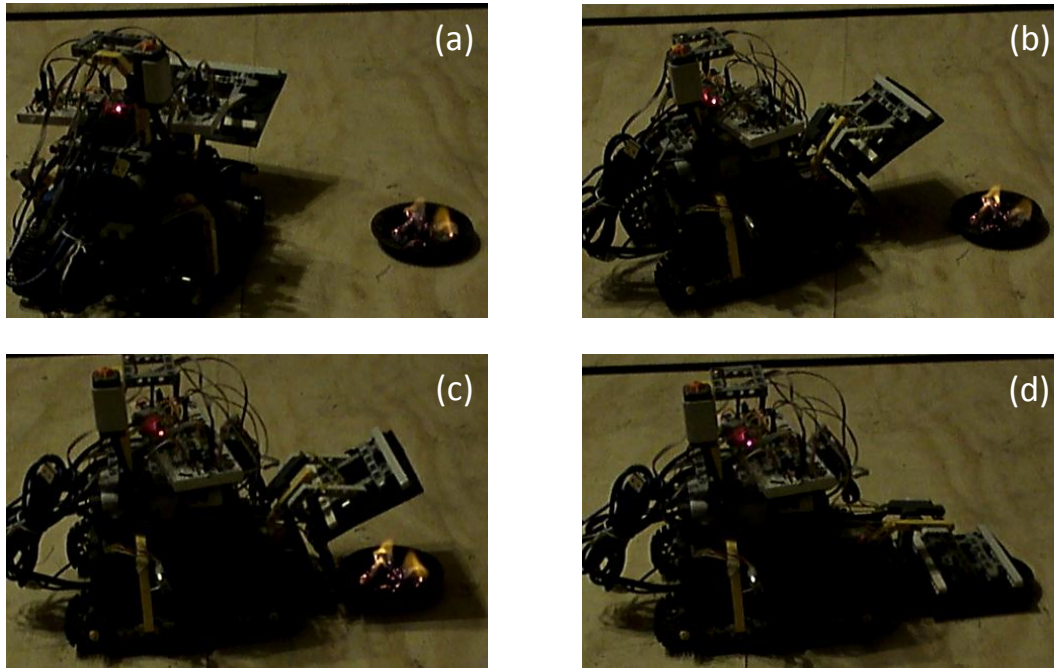


Figura 177. Secuencia de detección y extinción de fuego en otro punto: (a) detección de fuego por el sensor PIR, (b) giro del modelo en la dirección del fuego, (c) avance del modelo en la dirección del fuego, (d) el modelo se detiene y hace bajar el batefuego.

Finalmente, para detener el movimiento del modelo se vuelve a apretar el botón de contacto para que este regrese a su estado “INICIO”.

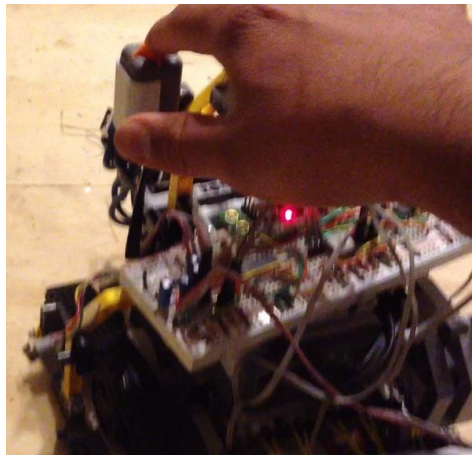


Figura 178. Paro del movimiento del modelo con el sensor de contacto.

Como resultados de la prueba realizada en el interior se determina que los sensores utilizados para el subsistema de detección funcionan de forma correcta permitiendo determinar la presencia de fuego, ya sea en la trayectoria del modelo o en algún otro punto. El sistema de procesamiento cumple con la adquisición de la información de los circuitos para que posteriormente y con base en la lógica de la máquina de estados propuesta, le

permitan al modelo desplazarse dentro de su área de trabajo y realizar la acción mecánica para extinguir el fuego.

Habiendo terminado la prueba final en el interior con los resultados esperados sobre el funcionamiento del modelo, se procede a realizar la prueba en el exterior.

### 3.2 Prueba final en el exterior

La prueba en el exterior tiene la finalidad de determinar si el modelo puede operar correctamente aún en presencia de variables que puedan alterar su funcionamiento, lo cual es deseable ya que comienzan a simularse las condiciones a los que están expuestos los brigadistas en un combate de incendio forestal.

Antes de iniciar la prueba con el modelo, se vuelve a revisar los valores analógicos que proporcionan los sensores PIR con la ayuda del depurador de RobotC. Al colocar el modelo en varios lugares sobre la tabla se observa que los valores registrados por los sensores cambiaban constantemente, por lo cual resulta complicado establecer un valor de referencia para cada sensor.

Se realizaron diversas pruebas en el exterior con el modelo bajo distintas exposiciones de luz ambiental, generadas por el sol. A continuación se describen algunos parámetros identificados a través de estas pruebas.

La forma de colocar las fuentes de fuego y el inicio del robot dentro del área de trabajo durante la prueba se muestra en la figura 179.



Figura 179. Posición de los ceniceros dentro del área de trabajo para la prueba en el exterior.

A continuación se muestra la secuencia realizada por el modelo durante la prueba en el exterior. *Nota:* la flama no es visible debido a las condiciones ambientales.



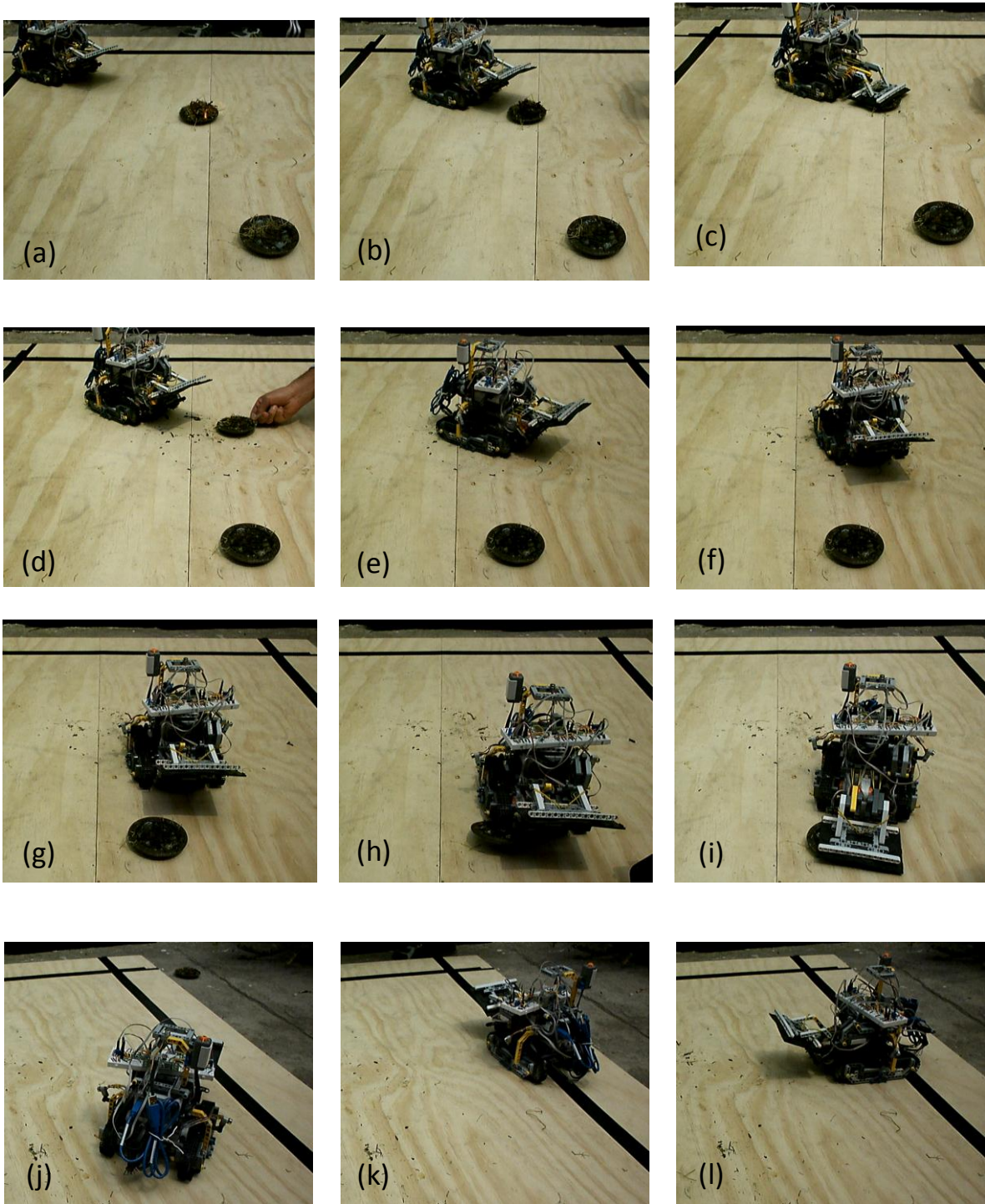


Figura 180. Secuencia realizada por el robot durante la prueba en el exterior: (a) posición inicial del modelo y las fuentes de fuego, (b) avance del modelo, (c) detección del fuego con los termistores y descenso del batefuego, (d) retiro del cenicero metálico, (e) avance del modelo, (f) detección de la segunda fuente de fuego con el sensor PIR y giro del modelo, (g) avance del modelo en la dirección de la segunda fuente de fuego, (h) detección del fuego con los termistores, (i) descenso del batefuego, (j) Avance del modelo hacia los límites de su área de trabajo, (k) giro del modelo al detectar la línea negra y (l) avance del modelo en otra dirección.

Como se hizo mención al inicio de este subcapítulo se realizaron varias pruebas en las cuales se identificaron los siguientes problemas que presenta el modelo al operar en el exterior.

- El primer problema corresponde a lo observado en el depurador de RobotC, en donde se observa que los valores analógicos que registra el bloque NXT de los sensores PIR cambian constantemente, haciendo difícil elegir un valor de referencia para cada sensor, ya que al ocultarse o salir el sol cualquier sensor podía superar dicho valor y en consecuencia el modelo gira continuamente en busca de fuego que no existe.
- Un segundo problema detectado corresponde a los termistores, ya que durante algunas pruebas hubo presencia de viento, con lo cual la inclinación que adquiriría la llama alcanzaba a los sensores, ocasionando que bajara el batefuego antes de llegar a la fuente del fuego.
- La presencia de viento también ocasiona que el fuego generado no tenga la misma intensidad en comparación a las pruebas realizadas en el interior, debido a esto los sensores PIR en algunas ocasiones no logran detectar la presencia de fuego.

A pesar de los problemas identificados durante las pruebas en el exterior también se determina que el modelo funcional obtenido cumple su principio de funcionamiento a pesar de los cambios en las condiciones del medio ambiente, ya que como se observa en la secuencia presentada en la figura 180, logra realizar la detección de una fuente de calor ya sea en su trayectoria como también en un punto distinto a ella, y posteriormente realizar su sofocación.

## 4. Conclusiones

Con base en los resultados obtenidos de las pruebas finales con el modelo funcional se determina que éste cumple con su objetivo, desplazarse dentro de un área de trabajo siguiendo una trayectoria definida en búsqueda de fuentes de calor y al momento de detectarlas corregir su trayectoria para dirigirse a extinguirlo.

Las pruebas realizadas con el modelo lograron una detección y extinción de fuego exitosas, por lo que se puede utilizar el mismo principio de funcionamiento para desarrollar un robot de mayor tamaño y robustez.

La acción mecánica utilizada por el batefuego es correcta como método de extinción debido a las dimensiones que tiene el fuego en su etapa inicial, evitando así el empleo de consumibles en comparación a los robots utilizados en el combate de incendios existentes en el mercado.

En este trabajo se utilizaron las ideas de varias metodologías de diseño para identificar los pasos que permitieran un desarrollo más adecuado en la dirección de la construcción del modelo, y a pesar de no utilizar una única metodología los resultados obtenidos fueron satisfactorios a consideración del diseñador.

El LEGO MINDSTORMS permite la construcción de estructuras, en las cuales se pueden evaluar algunas funciones mecánicas y electrónicas que tendría un dispositivo a mayor escala. También presenta la ventaja de poder realizar las iteraciones necesarias en la estructura hasta obtener un modelo final, sin necesidad de realizar la manufactura de nuevas piezas.

Las condiciones meteorológicas son un factor importante que influye en el desempeño del modelo, ya que ocasiona que los parámetros utilizados para la identificación de fuentes de calor cambien constantemente evitando que cumpla correctamente con sus funciones, esto deberá ser considerado en futuras reiteraciones del diseño. También el delimitar un área de trabajo para el robot permite mejorar el tiempo de respuesta para la detección de un fuego iniciado, evitando así que posteriormente llegue a propagarse de forma incontrolable.

Debido a los daños que puede causar el fuego en la estructura del robot es necesario considerar los sistemas de protección adecuados que a su vez implicarán una menor cantidad de mantenimiento del mismo para su operación continua.

Un modelo con una estructura más robusta podría apoyar en las labores de extinción de un incendio forestal junto con los brigadistas, reduciendo el tiempo de control del incendio y disminuyendo la participación de las personas en estas tareas para así proteger su integridad física.

## 5. Trabajo futuro

Como se hizo mención el principio de funcionamiento del modelo diseñado es el adecuado para realizar la detección y sofocación de fuego, que a su vez puede ser utilizado para la prevención de incendios, sin embargo, la tecnología que se emplea y las dimensiones del mismo no podrían combatir un incendio forestal en un entorno real, por lo cual es necesario crear una estructura más grande y resistente a las condiciones de trabajo que se presentan en dichas zonas a través del escalamiento de los sistemas descritos por este trabajo.

Debido a la extensión de las zonas forestales se hace necesario construir varios robots que trabajen en equipo, y estén vigilando cada uno un área de trabajo definida, la cual podría ser delimitada mediante el uso de un GPS, como sustituto a las líneas contrastantes usadas para las pruebas de este trabajo.

Si el siniestro que este combatiendo un robot dentro de su zona llega a propagarse a una mayor área y el dispositivo sea incapaz de poder extinguirlo rápidamente, podría solicitar el apoyo a los robots cercanos a la zona para que se dirijan a ese lugar y en conjunto realizar las labores para controlarlo y sofocarlo, usando la teoría de robótica colaborativa

Para mejorar el sistema de detección de fuego, con base en la radiación infrarroja que éste emite se sugiere hacer uso de módulos de termómetros infrarrojos, como el TPA81, en conjunto con los PIR para proporcionar al robot más información sobre la ubicación de una fuente de fuego debido a la temperaturas que se genera la información puede ser enviada al subsistema de procesamiento mediante una comunicación I<sup>2</sup>C.

La tecnología de desplazamiento utilizada por el modelo (orugas) le permiten evadir obstáculos de pequeñas dimensiones, sin embargo, en un entorno real las dimensiones de estos pueden ser mayores como es el caso de rocas, arboles, etc. por lo cual se hace necesario implementar un sistema adicional para poder detectarlos.

En las pruebas realizadas en el exterior se observa que el modelo diseñado presenta dificultades para realizar la detección del fuego a causa de los cambios en las condiciones meteorológicas, por lo cual se propone agregar un nuevo subsistema al dispositivo que permita medir parámetros como son la dirección del viento, humedad relativa, radiación proveniente del sol, etc. y así el subsistema de procesamiento se calibre automáticamente las referencias de los sensores utilizados para localizar la presencia de fuego.

Se recomienda adicionar un subsistema de paro de emergencia el cual evalúe las condiciones de operación críticas del modelo como por ejemplo la obstrucción del desplazamiento, ruido en los sensores, la temperatura exterior mientras realiza las labores de sofocación del fuego, las cuales generen una señal que activen dicho paro y así evitar la mayor cantidad de daños posibles en el modelo por su operación continúa.

## Referencias

- [1] D. A. Rodríguez. *Incendios forestales*. México: Universidad Autónoma de Chapingo, 1996.
- [2] J. M. Nieves. (2013). *Los homínidos sabían hacer fuego mucho antes de que surgiera el 'homo sapiens'*. [Online]. Fecha de consulta: 25 de febrero de 2013. Disponible en <http://servicios.laverdad.es/nuestratierra/nt21112008/suscr/nec13.htm>
- [3] UNAM, Dirección de Protección Civil. (2006) *Manual prevención y combate de incendios*. [online]. Fecha de consulta: 27 de agosto de 2012. Disponible en: <http://www.uca.unam.mx/PaginaUCA/ProteccionCivil/Files/PREVENCIÓN%20Y%20COMBATE%20DE%20INCENDIOS.doc>
- [4] Geant Dimon'd. (2011, mayo 11). *Experimento de combustión*. [online]. Fecha de consulta: 25 de febrero de 2013. Disponible en: <http://rutaldelpensamiento.blogspot.mx/2011/05/reacciones-de-la-una-producida-por-un.html>
- [5] Planificación ambiental y desarrollo. (2010, mayo 12). *Los incendios forestales*. [online]. Fecha de consulta: 27 de agosto de 2012. Disponible en: [http://www.escet.urjc.es/~pad/WEB2005/DOCENCIA/FAGS/15B\\_%20INCENDIOS%20FORESTALES.pdf](http://www.escet.urjc.es/~pad/WEB2005/DOCENCIA/FAGS/15B_%20INCENDIOS%20FORESTALES.pdf)
- [6] Esparza, Félix. (2002, febrero). *El fuego o combustión*. [online]. Fecha de consulta: 12 de febrero de 2013. Disponible en: [http://www.bomberosdenavarra.com/documentos/ficheros\\_documentos/fuego.pdf](http://www.bomberosdenavarra.com/documentos/ficheros_documentos/fuego.pdf)
- [7] Robacio, Agustina. (2012, mayo 18). *Clases de fuego y extinción*. [online]. Fecha de consulta: 5 de febrero de 2013. Disponible en: <http://el-trabajo-del-bombero.blogspot.mx/2012/05/clases-de-fuego-y-extincion.html>
- [8] Copa, Juan. (2012, julio 15). *Incendio*. [online]. Fecha de consulta: 13 de febrero de 2013. Disponible en: [http://riesgoincendio.blogspot.mx/2012\\_07\\_01\\_archive.html](http://riesgoincendio.blogspot.mx/2012_07_01_archive.html)
- [9] Wikipedia, La enciclopedia libre. (2013, junio 4). *Incendio*. [online]. Fecha de consulta: 12 de febrero de 2013. Disponible en: <http://es.wikipedia.org/wiki/Incendio>
- [10] Colombia. Ministerio del medio ambiente. (2003, mayo 8). *Comportamiento del fuego*. [online]. Fecha de consulta: 27 de agosto de 2012. Disponible en: <http://desastres.usac.edu.gt/documentos/pdf/spa/doc9988/doc9988-2.pdf>
- [11] J. J. Boulandier, F. Esparza, J. Garayoa, C. Orta y P. Anitua. (2003, diciembre 10). *Manual de extinción de incendios*. [online]. Fecha de consulta: 25 de febrero de 2013.

2013. Disponible en:  
<http://desastres.unanleon.edu.ni/pdf/2003/septiembre/envio1/pdf/spa/doc14756/doc14756-7c1.pdf>
- [12] L.G. Zárata López. “*Estudio de las características físicas y geométricas de la llama en los incendios forestales*”. Tesis doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2004. Disponible en: <http://www.tdx.cat/handle/10803/6436>
- [13] J.C. Mora, L.M. García, M. C. Huerta. (2008, julio). *Ciencias de la tierra para la sociedad: incendios forestales*. [online]. Fecha de consulta: 13 de febrero de 2013. Disponible en:  
<http://www.proteccioncivil.chiapas.gob.mx/site/micrositios/ciencia/cienciaytierra/incendios.pdf>
- [14] Comisión Nacional Forestal. (2010) *Incendios forestales. Guía práctica para comunicadores*. 3ra edición. [online]. Fecha de consulta: 13 de agosto de 2012. Disponible en:  
<http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/7/249Reporte%20semanal%20de%20incendios%20forestales.pdf>
- [15] Ecovive.com. (2011, junio 19). *Causas de los incendios forestales*. [online]. Fecha de consulta: 25 de febrero de 2013. Disponible en: <http://www.ecovive.com/causas-de-los-incendios-forestales>
- [16] Escuela de artes aplicadas Lino E. Spilimbergo. (2013). *Restos de meteorito indicarían posible vínculo con los incendios producidos en Buenos Aires*. [online]. Fecha de consulta: 25 de febrero de 2013. Disponible en:  
<http://escuelaspilimbergo.edu.ar/2008/fotografia/alumnos-fotografia/tp-fontcuberta/restos-del-meteorito-indicarian-posible-vinculo-con-los-incendios-producidos-en-buenos-aires/>
- [17] A. Signorelli. (2010, noviembre 26). *Incendios próximos a líneas eléctricas*. [online]. Fecha de consulta: 25 de febrero de 2013. Disponible en:  
<http://consorciodelta.blogspot.mx/>
- [18] A. L. Arjona Márquez. (2009, julio 20). *Sobre incendios y maniobras militares*. [online]. Fecha de consulta: 25 de febrero de 2013. Disponible en:  
<http://especialistasforestalesclm.blogspot.mx/2009/07/sobre-incendios-y-maniobras-militares.html>
- [19] 123RF. (2013). *Tubos de mortero de fuegos artificiales instalado en el campo*. [online]. Fecha de consulta: 25 de febrero de 2013. Disponible en:  
[http://es.123rf.com/photo\\_15548557\\_tubos-de-mortero-de-fuegos-artificiales-instalado-en-campo.html](http://es.123rf.com/photo_15548557_tubos-de-mortero-de-fuegos-artificiales-instalado-en-campo.html)

- [20] 123RF. (2013). *Hoguera, fogata en el bosque de verano*. [online]. Fecha de consulta: 25 de febrero de 2013. Disponible en: [http://es.123rf.com/photo\\_11738421\\_hoguera-fogata-en-el-bosque-de-verano.html](http://es.123rf.com/photo_11738421_hoguera-fogata-en-el-bosque-de-verano.html)
- [21] ecoclimático. (2008, julio 1). *Cómo prevenir los incendios*. [online]. Fecha de consulta: 25 de febrero de 2013. Disponible en: <http://www.ecoclimatico.com/archives/tu-puedes-prevenir-los-incendios-402>
- [22] A. Mejía. (2012). *Salvar al planeta es tu obligación*. [online]. Fecha de consulta: 25 de febrero de 2013. Disponible en: <http://www.taringa.net/posts/ecologia/12621936/Salvar-al-planeta-es-tu-obligacion.html>
- [23] Debate abierto. (2011, enero 8). *Persiguen cazadores furtivos en Villaguay y Diamante*. [online]. Fecha de consulta: 25 de febrero de 2013. Disponible en: <http://debateabierto.com.ar/da/2011/01/08/persiguen-cazadores-furtivos-en-villaguay-y-diamante/>
- [24]: J. Rodríguez. (2012, julio 18). *La verdad sobre la tendencia de la tierra en Paraguay*. [online]. Fecha de consulta: 25 de febrero de 2013. Disponible en: <http://americadespierta.blogcip.cu/tag/paraguay/page/2/>
- [25]: Notimex. (2013, enero 1). *Proponen reformas para revertir degradación de suelos*. [online]. Fecha de consulta: 25 de febrero de 2013. Disponible en: [http://www.elporvenir.com.mx/notas.asp?nota\\_id=638311](http://www.elporvenir.com.mx/notas.asp?nota_id=638311)
- [26] Colombia. Ministerio del medio ambiente. (2003, mayo 8). *Técnicas de combate de incendios terrestres*. [online]. Fecha de consulta: 27 de agosto de 2012. Disponible en: <http://desastres.usac.edu.gt/documentos/pdf/spa/doc9988/doc9988-3a.pdf>
- [27]: El matutino. (2012, febrero 6). *Alerta roja: Incendio forestal arrasa fundo la Cenizas*. [online]. Fecha de consulta: 25 de febrero de 2012. Disponible en: <http://www.elmartutino.cl/noticia/sociedad/alerta-roja-incendio-forestal-arrasa-fundo-la-cenizas>
- [28]: Madero noticias. (2013). *Compañías de bomberos de San Pedro y María Elena se capacitan en talles de prevención de incendios forestales*. [online]. Fecha de consulta: 25 de febrero de 2013. Disponible en: <http://news.maderonoticias.cl/?p=34718>
- [29]: Noticias más verde. (2012, junio 1). *Chile: Mueren 6 brigadistas combatiendo los incendios en la Araucanía*. Fecha de consulta: 25 de febrero de 2013. Disponible en: <http://noticias.masverdedigital.com/2012/chile-mueren-6-brigadistas-combatiendo-los-incendios-en-la-araucania/>

- [30] I. De Loza. (2011, abril 29). *Narran brigadistas su experiencia en combate a incendios forestales*. [online]. Fecha de consulta: 25 de febrero de 2013. Disponible en: <http://www.informador.com.mx/jalisco/2011/288838/6/atacar-fuego-con-fuego-la-estrategia.htm>
- [31] Belén le informa. (2012, septiembre 21). *Preparación para el combate de incendios forestales*. [online]. Fecha de consulta: 25 de febrero de 2013. Disponible en: <http://www.belen-narino.gov.co/noticias.shtml?apc=Cnxx-1-&x=2132846>
- [32] Sala de prensa. (2012, enero 21). *La cartera ambiental combate el incendio forestal en Tierra del Fuego*. [online]. Fecha de consulta: 25 de febrero de 2013. Disponible en: <http://www.prensa.argentina.ar/2012/01/21/27499-la-cartera-ambiental-combate-el-incendio-forestal-en-tierra-del-fuego.php>
- [33] Noticias más verde. (2012, junio 1). *Chile: Mueren 6 brigadistas combatiendo los incendios en la Araucanía*. [online]. Fecha de consulta: 25 de febrero de 2013. Disponible en: <http://noticias.masverdedigital.com/2012/chile-mueren-6-brigadistas-combatiendo-los-incendios-en-la-araucania/>
- [34] V. Fernández Huertas, J. I. Rodríguez de la Fuente y F. Aguirre Briones. (2002). *Manual de un primer ataque a un incendio forestal*. [online]. Fecha de consulta: 27 de agosto de 2012. Disponible en: [http://www.jcyl.es/web/jcyl/binarios/545/570/Manual%20Primer%20Ataque%20Completo.pdf?blobheader=application%2Fpdf%3Bcharset%3DUTF-8&blobheadername1=Cache-Control&blobheadername2=Expires&blobheadername3=Site&blobheadervalue1=no-store%2Cno-cache%2Cmust-revalidate&blobheadervalue2=0&blobheadervalue3=JCYL\\_MedioAmbiente&blobno-cache=true](http://www.jcyl.es/web/jcyl/binarios/545/570/Manual%20Primer%20Ataque%20Completo.pdf?blobheader=application%2Fpdf%3Bcharset%3DUTF-8&blobheadername1=Cache-Control&blobheadername2=Expires&blobheadername3=Site&blobheadervalue1=no-store%2Cno-cache%2Cmust-revalidate&blobheadervalue2=0&blobheadervalue3=JCYL_MedioAmbiente&blobno-cache=true)
- [35] Foro batelumes. (2007, octubre 15). *Extintor de mochila*. [online]. Fecha de consulta: 26 de febrero de 2013. Disponible en: <http://batelumes.mundoforo.com/image-vt189.html>
- [36] M. González Garnelo y V. Fernández Huertas. (2003). *Manual de cuadrillas de prevención y extinción de incendios forestales*. [online]. Fecha de consulta: 13 de septiembre de 2012. Disponible en: [http://www.jcyl.es/web/jcyl/binarios/923/47/Manual%20Cuadrilla2.pdf?blobheader=application%2Fpdf%3Bcharset%3DUTF-8&blobheadername1=Cache-Control&blobheadername2=Expires&blobheadername3=Site&blobheadervalue1=no-store%2Cno-cache%2Cmust-revalidate&blobheadervalue2=0&blobheadervalue3=JCYL\\_MedioAmbiente&blobno-cache=true](http://www.jcyl.es/web/jcyl/binarios/923/47/Manual%20Cuadrilla2.pdf?blobheader=application%2Fpdf%3Bcharset%3DUTF-8&blobheadername1=Cache-Control&blobheadername2=Expires&blobheadername3=Site&blobheadervalue1=no-store%2Cno-cache%2Cmust-revalidate&blobheadervalue2=0&blobheadervalue3=JCYL_MedioAmbiente&blobno-cache=true)



- [37] Northern. (2013). *Truper axe – 3.5-Lb. Pulaski w/ Hickory Handle*. [online]. Fecha de consulta: 26 de febrero de 2013. Disponible en: [http://www.northerntool.com/shop/tools/product\\_200325127\\_200325127](http://www.northerntool.com/shop/tools/product_200325127_200325127)
- [38] Total rescue. (2012). *Herramienta forestal McLeod*. [online] Fecha de consulta: 26 de febrero de 2013. Disponible en: [http://totalrescue.com/index.php?route=product/product&product\\_id=231](http://totalrescue.com/index.php?route=product/product&product_id=231)
- [39] Francisco Navarro Pérez S.L. (2013). *Pala punta en pico 355 x 285 mango de hierro*. [online]. Fecha de consulta: 26 de febrero de 2013. Disponible en: [http://www.materialesnavarro.es/index.php?op=load&par1=catalogo&cat=900&grp=&fam=3515&par2=detalle\\_articulo&art=35150553&desc=PALA+PUNTA+EN+PICO+355X285+MANGO+HIERRO](http://www.materialesnavarro.es/index.php?op=load&par1=catalogo&cat=900&grp=&fam=3515&par2=detalle_articulo&art=35150553&desc=PALA+PUNTA+EN+PICO+355X285+MANGO+HIERRO)
- [40] Alta visibilidad y rescate. (2013). *Batefuegos caucho mango fijo*. [online]. Fecha de consulta: 26 de febrero de 2013. Disponible en: <http://www.avr4.com/productos.php?prod=563>
- [41] Maquinaria HM. (2013). *Motosierra gasolina 18"*. [online]. Fecha de consulta: 26 de febrero de 2013. Disponible en: [http://www.maquinariahm.com/alquiler/index.php?option=com\\_content&task=view&id=136&Itemid=39](http://www.maquinariahm.com/alquiler/index.php?option=com_content&task=view&id=136&Itemid=39)
- [42] OLX. (2013). *Centa maquinas*. [online]. Fecha de consulta: 26 de febrero de 2013. Disponible en: <http://arenysdemunt.olx.es/centa-maquinas-iid-75520934>
- [43] Mujer activa. (2011, enero 21). *Qué significa soñar con hachas*. [online]. Fecha de consulta: 26 de febrero de 2013. Disponible en: <http://www.soyesoterica.com/significado-de-los-suenos/que-significa-sonar-con-hachas.html>
- [44] Grup Sabater. (2013). *Podón grande 330 mm*. [online]. Fecha de consulta: 26 de febrero de 2013. Disponible en: <http://tienda.sabatergrup.com/detalle.asp?ida=26405004&idf=EI0113&idc=>
- [45] Taringa. (2013). *El machete*. [online]. Fecha de consulta: 26 de febrero de 2013. Disponible en: <http://www.taringa.net/posts/info/16254312/El-machete.html>
- [46] Cortado. (2013). *Tajamata suiza*. [online]. Fecha de consulta: 26 de febrero de 2013. Disponible en: <http://www.cortado.es/es/herramientas-para-tala-y-trabajos-forestales/528-tajamata-suiza.html>
- [47] Dominion. (2010, octubre 13). *Albatros exportará más de 30 vehículos de emergencias a honduras a finales de 2011*. [online]. Fecha de consulta: 26 de febrero

- de 2013. Disponible en: <http://dominion-gratis.blogspot.mx/2010/10/dominion-y-albatros.html>
- [48] starMedia. (2011). *Incendios forestales en Texas 2011*. [online]. Fecha de consulta: 26 de febrero de 2013. Disponible en: <http://noticias.starmedia.com/fotos/incendios-forestales-en-texas/helicopteros-en-el-lugar.html>
- [49] Mercado libre. (2013). *Maquinaria pesada tractor de cadenas Caterpillar – D961960*. [online]. Fecha de consulta: 26 de febrero de 2013. Disponible en: [http://vehiculo.mercadolibre.com.ve/MLV-42438996-maquinaria-pesada-tractor-de-cadenas-caterpillar-d96-1960-\\_JM](http://vehiculo.mercadolibre.com.ve/MLV-42438996-maquinaria-pesada-tractor-de-cadenas-caterpillar-d96-1960-_JM)
- [50] A. Avilés Ledesma. “*Robot cuadrúpedo de 12 GDL enfocado a tareas de servicio*”. Tesis maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de ingeniería, 2011.
- [51] (2013). *Robots industriales*. [online]. Fecha de consulta: 19 de febrero de 2013. Disponible en: <http://jhgyfjf-robotica.blogspot.mx/>
- [52] Biologyland. (2011, octubre 24). *El humanoide ASIMO*. [online]. Fecha de consulta: 19 de febrero de 2013. Disponible en: <http://biologyland.blogspot.mx/2011/10/el-humanoide-asimo.html>
- [53] Wikipedia, la enciclopedia libre (2013. Mayo 28). *Mars Exploration Rover*. [online]. Fecha de consulta: 31 de mayo de 2013. Disponible en: [http://en.wikipedia.org/wiki/File:NASA\\_Mars\\_Rover.jpg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:NASA_Mars_Rover.jpg)
- [54] Ingeniería fantástica. (2012, enero 3). *LUF 60, robot contra incendios*. [online]. Fecha de consulta: 19 de febrero de 2013. Disponible en: <http://www.ingenieriafantastica.net/2012/01/luf-60-robot-contra-incendios.html>
- [55] Roboserv. (2013). *LUF 60*. [online]. Fecha de consulta: 19 de febrero de 2013. Disponible en: <http://www.roboserv.net/luf-60/>
- [56] Flickr. (2012, octubre 8). *Thermite, el robot para la extinción de incendios*. [online]. Fecha de consulta: 19 de febrero de 2013. Disponible en: <http://www.flickr.com/photos/diariodemorelia/8067356606/>
- [57] N. Wattenmaker. (2012, octubre 4). *Thermite firefighting robot rolls out like a mini fire truck*. [online]. Fecha de consulta: 19 de febrero de 2013. Disponible en: [http://www.dvce.com/sites/dvce/files/styles/media\\_gallery\\_image/public/images/Thermite-Howe-and-Howe-03.jpg](http://www.dvce.com/sites/dvce/files/styles/media_gallery_image/public/images/Thermite-Howe-and-Howe-03.jpg)

- [58] M. Dumiak. (2008, marzo 3). *The firefighting robot*. [online]. Fecha de consulta: 19 de febrero de 2013. Disponible en: <http://www.popsoci.com/scitech/article/2008-03/firefighting-robot>
- [59] Ecoinventos. (2007, agosto 22). *OLE, robot contra incendios*. [online]. Fecha de consulta: 19 de febrero de 2013. Disponible en: <http://ecoinventos.com/2007/ole-robot-contra-incendios>
- [60] plazzTT. (2007, marzo 16). *Fire fighting robot demo*. [Archivo de video]. Fecha de consulta: 19 de febrero de 2013. Disponible en: <http://www.youtube.com/watch?v=MlckXIDtLY0>
- [61] rasmasyean. (2008, febrero 20). *Fire-fighting robot finds flame in fourth room it searches*. [Archivo de video]. Fecha de consulta: 19 de febrero de 2013. Disponible en: <http://www.youtube.com/watch?v=dyeEZ6xnr7U>
- [62] G. Bolmsjö. (2010, mayo 16). *Fire fighting robot using LEGO NXT group 4*. [Archivo de video]. Fecha de consulta: 19 de febrero de 2013. Disponible en: <http://www.youtube.com/watch?v=oDuSG7wTZ8Y>
- [63] J. Bubenik. (2010, febrero 7). *Fire-robot*. [Archivo de video]. Fecha de consulta: 19 de febrero de 2013. Disponible en: <http://www.youtube.com/watch?v=1eLtIPc9Hbg>
- [64] J. G. Flores Garnica, D. A. Rodríguez Trejo. *Incendios forestales. Definiendo el problema, ecología y manejo, participación social, fortalecimiento de capacidades, educación y divulgación*. México: CONAFOR MUNDI – PRENSA, 2006.
- [65] Comisión Nacional Forestal. (2013). *Reporte semanal de resultados de incendios forestales 2011*. [online]. Fecha de consulta: 19 de febrero de 2013. Disponible en: <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/10/1479Reporte%20semanal%202011.pdf>
- [66] K. T. Ulrich y S. D. Eppinger. *Diseño y desarrollo de productos*. 4ª edición. México: McGRAW – HILL, 2009.
- [67] Wikipedia, La enciclopedia libre. (2013, junio 3). *Batería eléctrica*. [online]. Fecha de consulta: 4 de junio de 2013. Disponible en: [http://es.wikipedia.org/wiki/Bater%C3%ADa\\_%28electricidad%29](http://es.wikipedia.org/wiki/Bater%C3%ADa_%28electricidad%29)
- [68] Wikipedia, La enciclopedia libre. (2013, abril 23). *Pila alcalina*. [online]. Fecha de consulta: 4 de junio de 2013. Disponible en: [http://es.wikipedia.org/wiki/Pila\\_alcalina#Corriente\\_el.C3.A9ctrica](http://es.wikipedia.org/wiki/Pila_alcalina#Corriente_el.C3.A9ctrica)

- [69] L. Suñer. (2013, febrero 27). *Partes de un robot: la batería*. [online]. Fecha de consulta: 25 de marzo de 2013. Disponible en: <http://roboticasunyer.blogspot.mx/2013/02/partes-de-un-robot-la-bateria.html>
- [70] Wikipedia, La enciclopedia libre. (2013, marzo 8). *Corriente alterna*. [online]. Fecha de consulta: 25 de marzo de 2013. Disponible en: [http://es.wikipedia.org/wiki/Corriente\\_alterna](http://es.wikipedia.org/wiki/Corriente_alterna)
- [71] ASAJI. (2013). *Transformador de línea modelo 1118*. [online]. Fecha de consulta: 25 de marzo de 2013. Disponible en: [http://www.asajiaudio.com/esp/productos/accesorios/acc\\_1118\\_imp.htm?art\\_id=65&file=print\\_article.tp](http://www.asajiaudio.com/esp/productos/accesorios/acc_1118_imp.htm?art_id=65&file=print_article.tp)
- [72] Taringa. (2013). *Reguladores de tensión (electrónicos)*. [online]. Fecha de consulta: 26 de marzo de 2013. Disponible en: <http://www.taringa.net/posts/hazlo-tu-mismo/14467350/Reguladores-de-tension-electronicos.html>
- [73] Wikipedia, La enciclopedia libre. (2013, marzo 1). *Regulador de tensión*. [online]. Fecha de consulta: 26 de marzo de 2013. Disponible en: [http://es.wikipedia.org/wiki/Regulador\\_de\\_tension](http://es.wikipedia.org/wiki/Regulador_de_tension)
- [74] Reflexiona shop. (2013). *Regulador de voltaje 5V*. [online]. Fecha de consulta: 26 de marzo de 2013. Disponible en: <http://www.reflexiona.biz/shop/componentes-varios/577--regulador-de-voltaje-5v.html>
- [75] Wikipedia, La enciclopedia libre. (2013, marzo 10). *Panel solar*. [online]. Fecha de consulta: 26 de marzo de 2013. Disponible en: [https://es.wikipedia.org/wiki/Panel\\_solar](https://es.wikipedia.org/wiki/Panel_solar)
- [76] Wikipedia, La enciclopedia libre. (2012, junio 28). *Fixed Tilt Solar panel at Canterbury Municipal Building Canterbury New Hampshire*. [online]. Fecha de consulta: 26 de marzo de 2013. Disponible en: [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fixed\\_Tilt\\_Solar\\_panel\\_at\\_Canterbury\\_Municipal\\_Building\\_Canterbury\\_New\\_Hampshire.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fixed_Tilt_Solar_panel_at_Canterbury_Municipal_Building_Canterbury_New_Hampshire.jpg)
- [77] E. Kee. (2010, octubre 17). *NXT robot gets solar power option*. [online]. Fecha de consulta: 26 de marzo de 2013. Disponible en: <http://www.ubergizmo.com/2010/10/nxt-robot-gets-solar-power-option/>
- [78] Wikipedia, La enciclopedia libre. (2013, marzo 9). *Pila de combustible*. [online]. Fecha de consulta: 27 de marzo de 2013. Disponible en: [https://es.wikipedia.org/wiki/Celda\\_de\\_combustible](https://es.wikipedia.org/wiki/Celda_de_combustible)

- [79] Wikipedia, La enciclopedia libre. (2005, enero 12). *Fuel cell NASA*. [online]. Fecha de consulta: 27 de marzo de 2013. Disponible en: [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fuel\\_cell\\_NASA\\_p48600ac.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fuel_cell_NASA_p48600ac.jpg)
- [80] Wikipedia, La enciclopedia libre. (2013, marzo 25). *Termistor*. [online]. Fecha de consulta: 30 de marzo de 2013. Disponible en: <http://es.wikipedia.org/wiki/Termistor>
- [81] Universidad Nacional del Táchira. (2013). *Sensores*. [online]. Fecha de consulta: 30 de marzo de 2013. Disponible en: <http://www.unet.edu.ve/~ielectro/sensores.pdf>
- [82] 5 Hz Electrónica. (2013). *Termistor de 10K*. [online]. Fecha de consulta: 30 de marzo de 2013. Disponible en: <http://www.5hz-electronica.com/termistor10k.aspx>
- [83] Wikipedia, La enciclopedia libre. (2013, marzo 25). *LM35*. [online]. Fecha de consulta: 30 de marzo de 2013. Disponible en: <http://es.wikipedia.org/wiki/LM35>
- [84] RapidSignal electronics. (2013). *LM35 temperature sensor*. [online]. Fecha de consulta: 30 de marzo de 2013. Disponible en: <http://www.rapidsignalph.com/shop/lm35-temperature-sensor/>
- [85] Wikipedia, La enciclopedia libre. (2013, marzo 12). *Fotorresistencia*. [online]. Fecha de consulta: 30 de marzo de 2013. Disponible en: <http://es.wikipedia.org/wiki/LDR>
- [86] B. Piñero. (2012, junio 10). *Fotorresistencias VT935G 10K – 50K Ohms*. [online]. Fecha de consulta: 30 de marzo de 2013. Disponible en: <http://www.ceiarteunref.edu.ar/badarte/node/125>
- [87] Wikipedia, La enciclopedia libre. (2013, abril 28). *Piroelectricidad*. [online]. Fecha de consulta: 20 de mayo de 2013. Disponible en: <http://es.wikipedia.org/wiki/Piroelectricidad>
- [88] J. M. Carrión Cortés. (2013). *Práctica #7 sensor piroeléctrico*. [online]. Fecha de consulta: 20 de mayo de 2013. Disponible en: <http://proton.ucting.udg.mx/~mariocc/piro.html>
- [89] Futurlec. (2013). *PIR sensors*. [online]. Fecha de consulta: 30 de marzo de 2013. Disponible en: [http://www.futurlec.com/PIR\\_Sensors.shtml](http://www.futurlec.com/PIR_Sensors.shtml)
- [90] Wikipedia, La enciclopedia libre. (2013, marzo 23). *Sensores infrarrojos*. [online]. Fecha de consulta: 30 de marzo de 2013. Disponible en: [http://es.wikipedia.org/wiki/Sensores\\_infrarrojos](http://es.wikipedia.org/wiki/Sensores_infrarrojos)
- [91] Tecno store, c.a. (2013). *Sensor reflective QRD1114*. [online]. Fecha de consulta: 30 de marzo de 2013. Disponible en: <http://www.tiendaelectronica.com.ve/sensores-y-transductores/1168-sensor-reflectivo-qrd1114.html>

- [92] Wikipedia, La enciclopedia libre. (2013, marzo 15). *Arduino*. [online]. Fecha de consulta: 30 de marzo de 2013. Disponible en: <http://es.wikipedia.org/wiki/Arduino>
- [93] Sparkfun electronics. (2013). *Arduino Uno*. [online]. Fecha de consulta 30 de marzo de 2013. Disponible en: <https://www.sparkfun.com/products/9950>
- [94] Wikipedia, La enciclopedia libre. (2013, marzo 10). *Microcontrolador PIC*. [online]. Fecha de consulta: 30 de marzo de 2013. Disponible en: [http://es.wikipedia.org/wiki/Microcontrolador\\_PIC](http://es.wikipedia.org/wiki/Microcontrolador_PIC)
- [95] *PIC16C5X Data Sheet*, Microchip Technology Inc., Chandler, Arizona, 1997 – 2013. [online]. Fecha de consulta: 31 de mayo de 2013. Disponible en: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/30453E.pdf>
- [96] *PIC16F87X Data Sheet*, Microchip Technology Inc., Chandler, Arizona, 1997 – 2013. [online]. Fecha de consulta: 31 de mayo de 2013. Disponible en: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/30292D.pdf>
- [97] *PIC18F2455/2550/4455/4550 Data Sheet*, Microchip Technology Inc., Chandler, Arizona, 1997 – 2013. [online]. Fecha de consulta: 31 de mayo de 2013. Disponible en: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/39632e.pdf>
- [98] C. Bodington Esteva. (2013). *Microcontroladores PIC*. [online]. Fecha de consulta: 20 de mayo de 2013. Disponible en: <http://www.ebah.com.br/content/ABAAafeoYAD/linguagem-basic-microcontroladores-pic>
- [99] cursomicros.com. (2013). *Programación de microcontroladores PIC*. [online]. Fecha de consulta: 20 de mayo de 2013. Disponible en: <http://www.cursomicros.com/pic/programacion-de-microcontroladores-pic.html>
- [100] M. Meshulam. (2010, enero 19). *My new toy*. [online]. Fecha de consulta: 20 de mayo de 2013. Disponible en: <http://blog.meshlabs.net/2010/01/my-new-toy/>
- [101] Wikipedia, La enciclopedia libre. (2013, marzo 22). *Lego mindstorms*. [online]. Fecha de consulta: 31 de marzo de 2013. Disponible en: [http://es.wikipedia.org/wiki/Lego\\_Mindstorms#Bloque\\_NXT](http://es.wikipedia.org/wiki/Lego_Mindstorms#Bloque_NXT)
- [102] J. C. Fernández. (2010, diciembre 5). *Lego mindstorms (II)*. [online]. Fecha de consulta: 31 de marzo de 2013. Disponible en: <http://juancarlosfernandezrey.wordpress.com/2010/12/05/lego-mindstorms-ii-2/>
- [103] C. Linares G. (2013). *Ladrillo NXT*. [online]. Fecha de consulta: 31 de marzo de 2013. Disponible en: <http://www.aprenderhaciendo.co.cr/images/9841.jpg>

- [104] Wikipedia, La enciclopedia libre. (2013, abril 11). *Rueda*. [online]. Fecha de consulta: 19 de abril de 2013. Disponible en: <http://es.wikipedia.org/wiki/Rueda>
- [105] S. Martínez y R. Sisto. (2009, noviembre 22). *Control y comportamiento de robots omnidireccionales. Estado del arte. Versión 2.3*. [online]. Fecha de consulta 12 de septiembre de 2012. Disponible en: <http://www.fing.edu.uy/inco/grupos/mina/pGrado/easyrobots/doc/SOA.pdf>
- [106] INTPLUS. (2013). *Rueda omnidireccional 5 cm S360162*. [online]. Fecha de consulta: 31 de marzo de 2013. Disponible en: <http://www.superrobotica.com/s360162.htm>
- [107] VEXpro. (2013). *Mecanum wheels*. [online]. Fecha de consulta: 31 de marzo de 2013. Disponible en: <http://www.vexrobotics.com.mx/vexpro/mecanum-ruedas-1.html>
- [108] aoki2001. (2010, agosto 5). [Archivo de video]. Fecha de consulta: 1 de abril de 2013. Disponible en: <http://www.youtube.com/watch?v=CAE0i5VDWL8>
- [109] Wikipedia, La enciclopedia libre. (2011, septiembre 23). *Tractor oruga*. [online]. Fecha de consulta: 1 de abril de 2013. Disponible en: [https://es.wikipedia.org/wiki/Tractor\\_oruga](https://es.wikipedia.org/wiki/Tractor_oruga)
- [110] AutoScout24. (2013). *Orugas*. [online]. Fecha de consulta: 1 de abril de 2013. Disponible en: <http://www.autoscout24.es/vehiculos-industriales/orugas/>
- [111] Wikipedia, La enciclopedia libre. (2009, agosto 21). *Tractor oruga*. [online]. Fecha de consulta: 1 de abril de 2013. Disponible en: [http://wiki.webdearde.com/index.php?title=Robot\\_aut%C3%B3nomo\\_NR3,\\_brazo\\_robot%C3%B3tico\\_m%C3%B3vil/orugas](http://wiki.webdearde.com/index.php?title=Robot_aut%C3%B3nomo_NR3,_brazo_robot%C3%B3tico_m%C3%B3vil/orugas)
- [112] N. Sotomayor. (2012). *Robótica móvil*. [online]. Fecha de consulta: 12 de septiembre de 2012. Disponible en: <http://ciecfie.epn.edu.ec/Material/4toNivel/Robotica/Robotica%20Movil.pdf>
- [113] C. Vivas Venegas. (2012). *Sistemas de locomoción de robots móviles*. [online]. Fecha de consulta: 12 de septiembre de 2012. Disponible en: [http://www.esi2.us.es/~vivas/ayr2iaei/LOC\\_MOV.pdf](http://www.esi2.us.es/~vivas/ayr2iaei/LOC_MOV.pdf)
- [114] INTPLUS. (2013). *Robot quadrapod con servos S300160*. [online]. Fecha de consulta: 1 de abril de 2013. Disponible en: <http://www.superrobotica.com/S300160.htm>
- [115] L. Contreras Ortega. “*Estudio e implementación de algunos comportamientos básicos de un animal en un robot de tipo genérico*”. Tesis de licenciatura,

- Universidad de las Américas, Escuela de ingeniería, 2003. [Online]. Disponible en: [http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/lis/contreras\\_o\\_l/portada.html](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lis/contreras_o_l/portada.html)
- [116] electriBricks. (2010, mayo 5). *Construcción de orugas con LEGO*. [online]. Fecha de consulta: 8 de abril de 2013. Disponible en: <http://blog.electricbricks.com/es/2010/05/lego-construccion-orugas/>
- [117] Rebrickable. (2013). *LEGO part 3873 – Technic*. [online]. Fecha de consulta: 27 de mayo de 2013. Disponible en: <http://rebrickable.com/parts/3873>
- [118] K. Olaskoaga. (2008, abril 4). *Transmisiones entre ejes paralelos: cadena*. [online]. Fecha 27 de mayo de 2013. Disponible en: <http://www.donosgune.net/2000/gazteler/mecanica/cadena.htm>
- [119] Preciolandia. (2013). *Batería recargable para Lego Mindstorms NXT 2.0 (9693)*. [online]. Fecha de consulta: 14 de abril de 2013. Disponible en: <http://www.preciolandia.com/co/bateria-recargable-para-lego-mindstorms-6om7cx-a.html>
- [120] HiTechnic. (2013). *NXT Solderless Prototype Board (obsolete) (NPS1055)*. [online]. Fecha de consulta: 15 de abril de 2013. Disponible en: <http://www.hitechnic.com/cgi-bin/commerce.cgi?preadd=action&key=NPS1055>
- [121] *LM124- LM224-LM324 Data Sheet*, ST Microelectronics, Suiza , 2001. [online]. Fecha de consulta: 15 de abril de 2013. Disponible en: <http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/stmicroelectronics/2156.pdf>
- [122] G. Zazo. (2013). *RobotC. Guía del programador para RCX y NXT. Nivel básico*. [online]. Fecha de consulta: 30 de abril de 2013. Disponible en: [http://www.tectarque.260mb.com/imagenes/robotc\\_guia.pdf](http://www.tectarque.260mb.com/imagenes/robotc_guia.pdf)
- [123] Crya. (2013). *Como funciona un detector de calor infrarrojo*. [online]. Fecha de consulta: 7 de mayo de 2013. Disponible en: <http://www.crya.com.mx/docus/spir325.pdf>
- [124] J.I. Escudero, M. Parada, F. Simón. (2006, noviembre 7). *Tema 2. Amplificadores de instrumentación*. [online]. Fecha de consulta: 16 de enero de 2013. Disponible en: [http://www.dte.us.es/ing\\_inf/ins\\_elec/temario/Tema%202.%20Amplificadores%20de%20Instrumentacion.pdf](http://www.dte.us.es/ing_inf/ins_elec/temario/Tema%202.%20Amplificadores%20de%20Instrumentacion.pdf)