UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
SEDE CONCEPCIÓN-CHILE

MONITOREO Y CONTROL DE OXÍGENO EN UNA ESTUFA A LEÑA

TRABAJO DE TÍTULO
PARA OPTAR AL TÍTULO DE TÉCNICO UNIVERSITARIO EN ELECTRÓNICA

ALUMNO: RAÚL ESTEBAN MEDEL CID

PROFESOR GUÍA: RAMÓN SAAVEDRA ROGEL

AGOSTO, 2018

Dedicatoria

El presente trabajo de título va dedicado a todos aquellos que hicieron posible que el mismo se llevara a cabo, ya sea por los conocimientos aportados, por las buenas disposiciones a colaborar con las experiencias prácticas o con el apoyo moral que siempre me brindaron.

Debido a que fueron muchas las personas que me apoyaron de distintas maneras en esta empresa, haré algunas menciones honoríficas:

…..Agradezco, en primer lugar a Dios, quien siempre manifestó su presencia en cada uno de los hitos de este trabajo. A mi familia, que colaboró con su paciencia y apoyo moral a lo largo de todo el desarrollo de aquel. A mis profesores, en especial a mi profesor guía, que siempre tuvieron buena disposición para responder mis dudas. A Pamela Aguayo, quien me acompañó a casi todas las pruebas prácticas del presente proyecto y me apoyó sentimentalmente en todo el proceso del mismo y mucho más en aquellos en que el avanzar se me hacía cuesta arriba.

Finalmente quisiera agradecer nuevamente a Dios, por darme la oportunidad de haber compartido estos años de estudios con mis compañeros de quienes aprendí mucho y a quienes logré estimar a partir de todas las experiencia compartidas.

Resumen

En el presente documento, se presentará un estudio de la combustión en general, aludiendo de manera particular a la combustión en una estufa a leña, de manera de encontrar los elementos principales que intervienen en la misma, para posteriormente mostrar el diseño de un dispositivo que monitorea y regula el paso de oxígeno.

Por todo lo anterior, el trabajo constará con dos capítulos principales, a saber:
El MARCO TEORÍCO y la EXPERIENCIA PRÁCTICA. En el primero se mostrará el estudio teórico de cada uno de los tópicos que ocupan un lugar preponderante en el diseño del sistema que hará más eficiente la combustión en una estufa a leña. En el segundo se exponen de manera empírica las pruebas realizadas con el sistema creado y sus posteriores conclusiones.

El primer apartado tiene como secciones principales: LA COMBUSTIÓN Y LA IMPORTANCIA DEL OXÍGENO EN SU EFICIENCIA, EL SENSOR LAMBDA y EL AMPLIFICADOR DE INSTRUMENTACIÓN.

En el primero se hará ver la importancia sine qua non del oxígeno para una óptima combustión y, además, la relación que debe haber entre este y el combustible. En la siguiente se pondrá de manifiesto el elemento sensor que intervendrá en el sistema de monitoreo de oxígeno que se implementará. Por último, se dará a conocer las características principales del amplificador de instrumentación que permitirá la verosimilitud de las señales que se recogerán a partir del sensor ya mencionado.

El segundo apartado contiene las siguientes secciones: SISTEMA DE MONITOREO DE OXÍGENO y EL PROTOPIPO.

En el primero se indica el comportamiento de los elementos que intervinieron en el monitoreo, como lo son: el sensor lambda, el amplificador de instrumentación y el microcontrolador empleado con su respectiva programación.
……Por último se revelan los esquemas circuitales del sistema implementado, aunque se utilizan elementos que se aproximan, en algunos casos, a los realmente utilizados, debido a que los softwares empleados, no los contenían.

Índice de contenido

Dedicatoria .....
Resumen .....
Sigla y Simbología .....
Introducción.....1
Objetivos 2
CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO.....3
1.1 LA COMBUSTIÓN Y LA IMPORTANCIA DEL OXÍGENO EN SU EFICIENCIA.....4
1.1.1 Elementos que intervienen en la combustión 4
1.1.2 Combustión estequiométrica.....5
1.1.3 Coeficiente de exceso de Aire.....6
1.2 EL SENSOR LAMBDA.....7
1.2.1 Principio de funcionamiento 7
1.2.2 Tipos de sondas Lambda 8
a. Sensores de zirconio 9
b. Sensores de titanio 10
1.3 EL AMPLIFICADOR DE INSTRUMENTACIÓN 14
1.3.1 Amplificador de Instrumentación Ideal 14
1.3.2 El amplificador sustractor.....15
1.3.3 Amplificador diferencial (pre-amplificador de instrumentación).....16
1.3.4 Amplificador de instrumentación.....17
CAPÍTULO 2: EXPERIENCIA PRÁCTICA 19
2.1 SISTEMA DE MONITOREO DE OXÍGENO.....20
2.1.1 Elementos utilizados en el prototipo 20
2.1.2 Diagrama del lazo de control 28
2.2 PROTOTIPO.....28
2.2.1 Esquema circuital 28
Conclusiones.....29
Bibliografía y lincografía 31

Índice de figuras

1-1 Respuesta del sensor 9
1-2 Sensor lambda de zirconio 10
1-3 Sensor lambda de Titanio 11
1-4 Célula de Medida 11
1-5 Célula de Oxígeno 12
1-6 Sensor lambda de Banda ancha 14
2-1 Sensor lambda utilizado 21
2-2 Curva característica del sensor utilizado 22
2-3 Señales de tensión visualizadas en el monitor serial de plataforma Arduino 23
2-4 Amplificador de Instrumentación implementador 24
2-5 Arduino Uno 25
2-6 Motor paso a paso Nema 17 27
2-7 Driver A4988 para motor paso a paso bipolar 27
2-8 Prototipo 28
2-9 Esquema circuital 29

Introducción

La electrónica ha ocupado, en este último tiempo, un papel preponderante en la sociedad, sobretodo en el desarrollo de nuevas tecnologías en variados campos de la vida, como por ejemplo, el campo de la industria, la medicina, la ciencia, la robótica y la domótica, por decir algunos, las cuales han permitido transformar sistemas complejos y poco eficaces, en otros más simples y eficientes. Respecto a todo lo anteriormente indicado, es necesario manifestar que el mundo de hoy se caracteriza por estar en una constante búsqueda de mayor confort y de respuestas concretas a su creciente deseo de tener una vida más fácil, más amigable con el medio ambiente, más inmediata, etc., por lo que se precisa de sistemas electrónicos que le permitan satisfacer dichas necesidades. En este sentido, se ha constatado que una de las necesidades que posee una alta demanda por parte de los hogares e instituciones, es la relacionada con los sistemas de calefacción, de ellos el más usado y preferido por la gente es el de calefacción a leña.

Sin embargo, dicho sistema se ha puesto en tela de juicio debido a que no se usa de manera eficiente, por un lado, y emite muchos gases contaminantes al ambiente, por otro. De ahí que se observe un progresivo interés por crear mecanismos que mejoren la eficiencia de la calefacción a base de biomasa. Así, entonces, se encuentran, por ejemplo, las estufas a pellet o las de doble cámara, que según los fabricantes, aseguran una mayor eficiencia en la combustión, menos emisiones contaminantes y un mayor ahorro en combustible. Otros mecanismos, regulan el exceso de aire en la cámara de combustión, asegurando de ese modo lo anteriormente dicho.

Cabe mencionar que dichos sistemas aún son muy costosos, por los que quienes los poseen son una minoría. Debido a esto, se decidió asumir este desafío y emprender este proyecto, creando un sistema de bajo costo que permita una mayor eficiencia en la combustión de una estufa a leña, reduciendo, además, las emisiones de gases contaminantes al ambiente. Esto, se llevará a cabo a través de una mecanismo de monitoreo de oxígeno en los humos, para luego controlar mediante un actuador, el paso del aire hacia la cámara de combustión, de modo que la mezcla aire-combustible, sea la adecuada para que se logre la indicada eficiencia.

Objetivos

Objetivo general

Implementar un sistema de control de oxígeno en una estufa a leña, a fin de mejorar la eficiencia de la combustión en la misma.

Objetivos específicos

a) Estudiar el proceso de combustión en una estufa a leña y de manera particular, el rol que cumple el oxígeno en la misma.

b) Crear un sistema que permita monitorear el oxígeno presente en el proceso de combustión en una estufa a leña.

c) Emplear a nivel de prototipo el sistema de monitoreo creado.

Por lo tanto, habiendo constatado que el sistema de calefacción más utilizado es a base de leña, y, además, la necesidad de hacerlo más eficiente a bajo costo. Se decidió crear un sistema de monitoreo y control de oxígeno para cumplir con el propósito indicado.

CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO

1.1 LA COMBUSTIÓN Y LA IMPORTANCIA DEL OXÍGENO EN SU EFICIENCIA

La combustión es un conjunto de reacciones químicas de oxidación que se producen entre dos elementos a través de las cuales se desprende calor, dichos elementos son el **combustible** que puede ser un sólido, un líquido o un gas; y el **agente oxidante,** siendo el oxígeno el oxidante por excelencia. Dicho desprendimiento de calor, puede ser sumamente lento, por lo que se hace insensible al ser humano, o extremadamente rápido como en el caso de una detonación.

Para que la combustión pueda ser posible, es necesario que se den cita conjuntamente tres componentes fundamentales:

- La presencia de combustible
- El comburente
- Energía de activación

En este sentido, como el agente oxidante más usado y universal es el oxígeno, se utiliza el aire como elemento comburente, debido a que prácticamente está compuesto por 21% de Oxígeno (O_2) y 79% de Nitrógeno (N_2).

Por otro lado, es necesario decir que los combustibles están compuestos principalmente de Carbono (C) e Hidrógeno (H), aun cuando posean, además, elementos como el Azufre (S) y la humedad (H_2O). Por consiguiente, la combustión se analizará desde el punto de vista de sus elementos fundamentales como lo son el Carbono, el Hidrógeno y el Oxígeno.[6]

1.1.1 Elementos que intervienen en la combustión

Como ya está dicho, todo tipo de combustión necesita de oxígeno para que se lleve a cabo y una fuente detonante, de manera que se puedan romper los enlaces de carbono, por ejemplo, de modo que los átomos de oxígeno puedan atrapar átomos de carbono, transformándose en CO_2, lo que libera una gran cantidad de calor y luz.

Ahora bien, la unión química del carbono con el oxígeno se efectúa de acuerdo a leyes fijas, es decir, un peso molecular de carbono (C) reacciona con un peso molecular de oxígeno (O_2), para producir un peso molecular de anhídrido carbónico (CO_2).

En estas uniones se deben cumplir tres principios fundamentales:

a) El Principio de Conservación de la Materia, de forma que conocidas las cantidades de combustible y de aire necesario para la combustión, sea posible hallar la cantidad resultante de productos de combustión.

b) El Primer Principio de la Termodinámica, por cuanto las reacciones químicas, y en particular las combustiones, son transformaciones energéticas.

c) El Segundo Principio de la Termodinámica, que permite obtener el rendimiento termodinámico de la transformación de energía que tiene lugar durante la reacción química, y conocer en qué dirección y en qué proporción se desarrollará, (equilibrio químico). [5]

Entre más unidos estén químicamente, el combustible y el comburente, más perfecta será la combustión, de ahí que los combustibles gaseosos sean los más adecuados para que dicha combustión se produzca.

Por otro lado, si consideramos un elemento sólido como combustible, es necesario tomar en cuenta que aquel combustible, primero experimenta una gasificación, de manera que los gases desprendidos se combinen con el aire, produciéndose así, la llama que hará que el carbono alcance la temperatura necesaria para que entre en combustión.

En este sentido, la combustión puede ser completa o perfecta, o bien incompleta. Es completa cuando todo el combustible se ha oxidado al máximo, e incompleta cuando, luego de la combustión, aún quedan elementos capaces de ser oxidados como el CO, por ejemplo, que puede transformarse en CO_2, lo cual ocurre debido a que la cantidad de aire mezclado con el combustible es insuficiente, produciendo pérdidas de energía y procesos altamente contaminantes. En consecuencia, es necesario determinar cuál es la cantidad necesaria de aire en un proceso de combustión, para que esta se produzca de modo completo.[2]

1.1.2 Combustión estequiométrica

Es la combustión que se produce con la cantidad mínima y estrictamente necesaria de oxígeno para que se genere una combustión completa, es decir, sin productos inquemados, lo que supone que todo el oxígeno se haya consumido en la combustión. Sin embargo, esta combustión es sólo teórica, ya que en la práctica siempre se producen inquemados, aunque sea en cantidades mínimas. De acuerdo a lo anterior, el llamado aire teórico o estequiométrico, es la cantidad mínima de aire que proporciona aquella combustión completa.

El aire, por su parte, es una combinación de gases ligeramente variables, compuesto de 78% de Nitrógeno, 21% de Oxígeno, y un 1% de otras sustancias como ozono, dióxido de carbono, hidrógeno y gases nobles (Argón, Kriptón).[2]

Pues bien, la cantidad de aire real que hay que aportar al hogar para que se produzca una buena combustión es mayor que la cantidad mínima, o estequiométrica, debido a que las partículas de combustible son más pesadas que las del aire, por lo que impide una mezcla perfecta entre el combustible y el oxígeno, pues el flujo de aire es muy rápido, por lo tanto, parte del oxígeno presente en el aire, no reaccionará con el combustible. De ahí que es necesario exceso de aire para que la calidad de la combustión sea la óptima.

1.1.3 Coeficiente de exceso de Aire

El coeficiente de exceso de aire es la relación entre el aire introducido y el aire mínimo necesario para la combustión. Para combustibles sólidos como la madera, este coeficiente tiene valores de 1.5 a 2.

El rendimiento máximo de la combustión, por su parte, se consigue cuando el coeficiente de exceso de aire es mínimo, es decir $\lambda > 1$.

Para evaluar el porcentaje de aire en exceso, es necesario conocer previamente la relación de aire λ. Este parámetro se define operacionalmente como el cociente entre el Aire real y el Aire teórico.

$$\Lambda = \frac{Aire\ real\ que\ ingresa\ a\ la\ cámara\ de\ combustión}{Aire\ teórico\ que\ interviene\ en\ la\ combustión} = \frac{Ar}{At} = \frac{21}{21-O2m}$$

En este sentido, considerando la característica de los combustibles, se puede afirmar que para combustibles:

- Sólidos Λ= 1,5 – 2
- Líquidos Λ= 1,1 – 1,2
- Gaseosos Λ= 1,0 – 1,1

De este modo, el exceso de aire como tal, se define en la forma:

E = Aire real – Aire mínimo = (s-1) Aire mínimo

Lo que suele expresarse en porcentaje, pudiendo ser positivo (exceso) o negativo (defecto).

Resumiendo, el rango de exceso de aire de la combustión dependerá del tipo de planta de combustión y el combustible, quedando las variables relacionadas de la siguiente manera:

$$\Lambda = \frac{1 + O2}{21 - O2}$$

De acuerdo a lo anterior, para combustibles como la madera y en general para los combustibles basados en biomasa, el porcentaje de exceso de oxigeno debe rondar entre 8 y 9 %, lo que significa que el Λ debe fluctuar entre 1,5 y 2.[11]

1.2 EL SENSOR LAMBDA

La sonda Lambda es un sensor que mide de forma continua el nivel de oxígeno en los humos de combustión en tiempo real. Esta sonda calcula la concentración de gases de escape, por una medición comparativa de la cantidad de oxígeno. Se compara el contenido de oxígeno del aire exterior con el oxígeno residual de los gases de escape, para lo cual se utiliza como referencia el contenido de oxígeno en el aire, que corresponde al 21% del mismo. La diferencia resultante se traduce en un nivel de tensión que va entre 0 a 1 volt, este nivel de tensión es la señal que se aprovecha para que, una vez hecho el escalamiento, se pueda definir la cantidad de oxígeno presente en los gases de escape de una estufa o caldera a leña. [9]

1.2.1 Principio de funcionamiento

La sonda lambda está compuesta básicamente de un cuerpo especial de cerámica, cuya superficie está provista con electrodos de platino permeables al gas. El efecto de la sonda es producto de factores físicos de dos clases diferentes. Por una parte, el material de cerámica es poroso, lo que produce la difusión del oxígeno del aire y también, dicho material cerámico se vuelve conductor al superar la temperatura de los 300 ° C. El contenido del oxígeno es medido en ambos extremos del electrodo, si se produce una diferencia se genera en los electrodos una tensión eléctrica del orden de los milivoltios.

Existen dos tipos de sondas en cuanto a su construcción, las de titanio que modifican su resistencia y las de Zirconio que modifican los valores de tensión, siendo estas últimas las que más se usan, las cuales consisten en una carcasa de aluminio en la que se monta una pieza de cerámica, (electrolito fijo), la parte exterior del cuerpo cerámico se encuentra en el flujo de los gases de escape mientras que la parte interior se encuentra en contacto con el aire del ambiente exterior. Bajo estas condiciones, se produce, según la diferencia de oxígeno entre los gases de escape y el exterior, una migración de electrones que provoca un aumento brusco de la tensión de la sonda el cual es utilizado como regulación lambda.

Todo lo anterior se basa en la ecuación de Nernst que se utiliza para calcular el potencial de redox (reducción-oxidación) de un electrodo fuera de las condiciones estándar (concentración de 1 M, presión de 1 atm, temperatura de 298 K o 25 ° C).
Por lo tanto, el fundamento de una celda electroquímica, como la celda que posee una sonda Lambda, es siempre una reacción redox, que se puede desglosar en dos semirreacciones:

- la oxidación (pérdida de electrones) tiene lugar en el ánodo, que es el electrodo negativo.
- la reducción (ganancia de electrones) transcurre en el cátodo o polo positivo.

La corriente eléctrica se genera debido a la diferencia de potencial eléctrico entre estos dos electrodos. Esta diferencia de potencial se crea como resultado de la diferencia entre los potenciales individuales de los dos electrodos en relación con el electrólito o disolución en la que están sumergidos, en el caso de dicha sonda es el dióxido de Zirconio. El potencial de dicha celda será la diferencia entre el potencial del electrodo positivo (cátodo, donde se realiza la reducción) y el potencial del electrodo negativo (ánodo, donde se realiza la oxidación).

$$\mathbf{Ecel = E+ - E- \longrightarrow E_{cátodo} - E_{ánodo}}$$

Aunque el potencial global de una célula se puede medir, no hay ninguna manera sencilla de medir con precisión el potencial de un solo electrodo aislado. Dicho potencial eléctrico también varía con la temperatura, la concentración de oxígeno y con la presión. Dado que el potencial de oxidación de una semirreacción es de igual valor pero con signo contrario que el potencial de reducción de esa misma semirreacción redox, es posible calcular cualquiera de los potenciales.

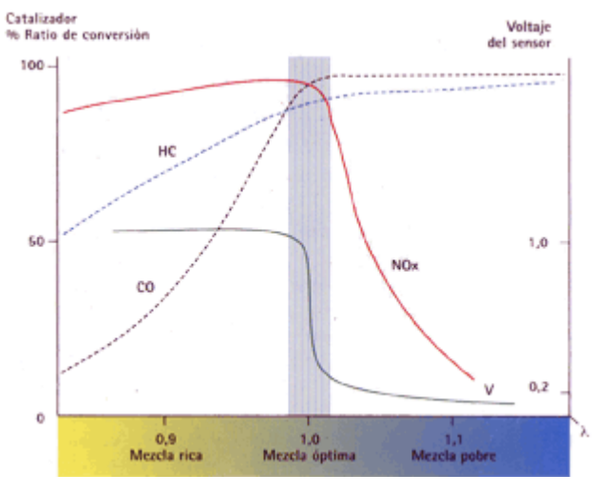
1.2.2 Tipos de sondas Lambda

Se distinguen tres tipos de sondas Lambda, las sondas de dióxido de Zirconio, las de dióxido de titanio, que también se denominan de salto o binarias porque la señal de la sonda oscila entre dos valores; y un tercer grupo corresponde a las llamadas sondas de banda ancha, también denominadas lineales, ya que pueden medir y lograr una transición fluida entre diferentes estados de mezcla.

a. Sensores de zirconio

El exterior del elemento de zirconio está en contacto con el gas de escape y el interior, en contacto con el aire. Ambas superficies del elemento están revestidas con una fina capa de platino. Los iones de oxígeno pueden pasar a través del elemento y depositar una carga en la capa de platino. Estas capas de platino son los electrodos, que transmiten la señal del sensor desde el elemento hasta el cable de carga.

El elemento de zirconio conduce los iones de oxígeno cuando la temperatura excede aproximadamente de 300ºC. Debido a las propiedades especiales de dicho elemento, cuando la concentración de oxígeno a uno y otro lado del mismo es diferente, se genera una tensión. En el caso de los motores a gasolina, si la mezcla de aire-combustible es excesivamente pobre, la tensión generada es baja, y si es excesivamente rica, la tensión que se genera es alta. Alrededor de 14,7:1, relación aire / combustible, la tensión cambia bruscamente.[3]



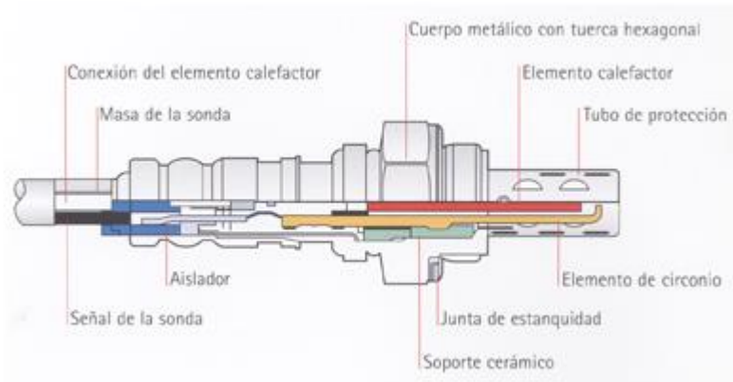
1-1Respuesta del sensor.

Fuente: www.foroshonda.com/index.php?threads/sonda-lambda-o-sensor-de-oxigeno.807/

Dicha relación exacta de aire/combustible se conoce como Lambda 1,0 y es la razón por la que los sensores se denominan sondas lambda. La unidad de control utiliza la tensión producida por la sonda lambda para ordenar al sistema de mezcla de combustible que aumente o disminuya la riqueza de la misma. En el caso de una estufa o caldera a leña, lo que se variará será el flujo de aire.

Como el sensor sólo genera tensión cuando el elemento está por encima de unos 300ºC, el gas de escape requiere muy poco tiempo para calentar el elemento hasta esa temperatura después de haber puesto en funcionamiento el motor. Para reducir el tiempo que el sensor emplea en activarse, la mayor parte de los sensores actuales se instalan con

un calentador cerámico interior. Estos sensores tienen 3 ó 4 hilos conductores. Para garantizar el máximo rendimiento y fiabilidad de los calentadores cerámicos. [3]

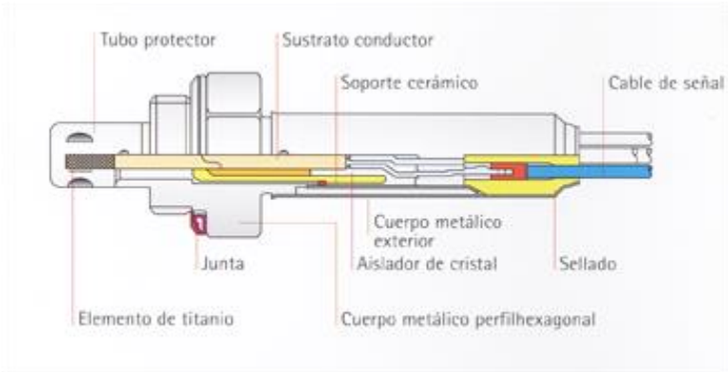


1-2 Sensor lambda de zirconio.

Fuente: https://es.slideshare.net/juanperedo12/sondas-lambda-ntk

b. Sensores de titanio

El elemento de titanio de estos sensores no genera tensión alguna, a diferencia de lo que ocurre con el elemento de zirconio. En lugar de ello, cambia la resistencia eléctrica del elemento de titanio según la concentración de oxígeno en el gas de escape. Al valor lambda 1,0 corresponde un gran cambio del valor resistivo del elemento. Así, cuando se aplica una tensión al elemento, el valor de la tensión de salida varía en función de la concentración de oxígeno en el gas de escape. Esta señal procedente del sensor la utiliza la unidad de control para ejercer el control en circuito cerrado. Como los sensores de titanio no necesitan aire en un lado del elemento, pueden ser mucho más reducidos y quedar completamente sumergidos en el flujo del gas. El elemento sensor, sus electrodos de platino y el elemento calefactor van montados en un substrato cerámico. Los sensores de titanio y de zirconio no son intercambiables entre sí debido a la diferencia de tamaño y a las distintas estrategias de control que emplean uno y otro para interpretar la señal del sensor.[9]



1-3 Sensor lambda de Titanio.

Fuente: https://es.slideshare.net/juanperedo12/sondas-lambda-ntk

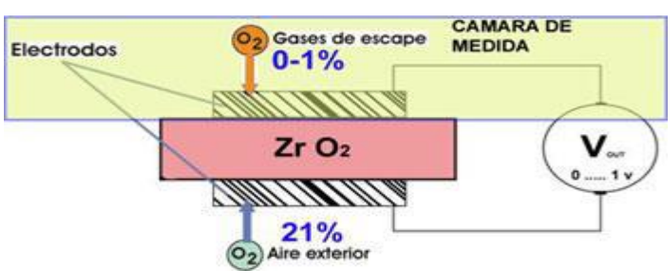
c. Sensores de banda ancha [13]

La base de funcionamiento de la sonda lambda de banda ancha, hace que la zona de funcionamiento de la célula de medida trabaje siempre en una zona de lambda 1. Para ello utiliza la célula de oxígeno, que se encarga de hacer variar el oxígeno medido para mantener la condición anterior.

El controlador determina el valor lambda en función del trabajo de la célula de oxígeno para mantener el valor lambda 1 en la cámara de medida. Para ver más claro su funcionamiento, se dividirá la sonda lambda en dos etapas, una la ***célula de medida*** y otra la **célula de oxígeno.**

- **Célula de medida**

Esta parte es la encargada de medir el porcentaje de oxígeno que contiene los gases de escape. Ofrece una tensión de 0 a 1 voltios en función del oxígeno. La tensión es más elevada cuando aumenta la diferencia de oxígeno entre el contenido en los gases de escape y el que hay en el exterior.

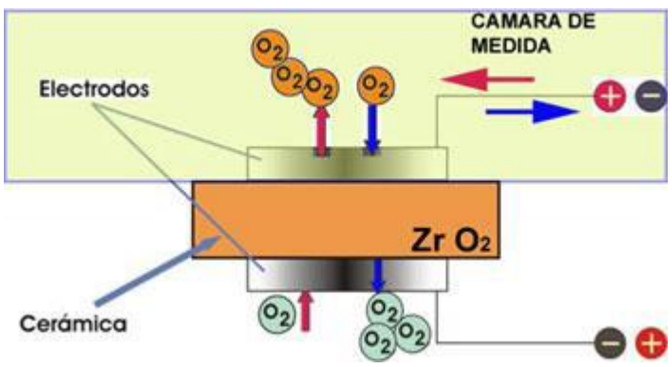


1-4 Célula de Medida.

Fuente: http://www.edu.xunta.gal/centros/cifpsomeso/system/files/sonda+lambda+de+banda+ancha.pdf

- **Célula de oxígeno**

Esta etapa es la encargada de modificar la cantidad de oxígeno que tiene los gases de escape en la cámara de medida de la sonda lambda. Para realizar esta modificación de oxígeno, desvía el mismo desde el exterior (aire de referencia) hacia la cámara de medida o a la inversa, en función de una corriente eléctrica que se le hace atravesar a la célula. La intensidad y el sentido de la corriente, determina la cantidad de oxígeno y si se extrae o añade a la cámara de medida. Con esta modificación del porcentaje de oxígeno en la cámara de medida, se consigue modificar también el valor lambda de la misma. Con el circuito electrónico se controla la intensidad de la célula de oxígeno hasta que se obtiene en la cámara de medida un valor lambda 1, evidentemente esto indica que el valor lambda real de los gases de escape puede ser diferente de 1, como se verá justificado más adelante. Para determinar exactamente el valor lambda de los gases de escape, la unidad procesa el valor de tensión recibido por la célula de medida (en condiciones normales constante) y el valor de intensidad que le aplica a la célula de oxígeno (en condiciones normales variable).



1-5 Célula de Oxígeno.

Fuente: http://www.edu.xunta.gal/centros/cifpsomeso/system/files/sonda+lambda+de+banda+ancha.pdf

- **El funcionamiento en conjunto**

La sonda lambda de banda ancha, se compone de la unión de la célula de medida y la célula de oxígeno y está controlada por un amplificador operacional.

La cámara de medida se encuentra alojada entre la célula de oxígeno y la célula de referencia. Cuando los gases de escape entran en la cámara de medida, se compara el

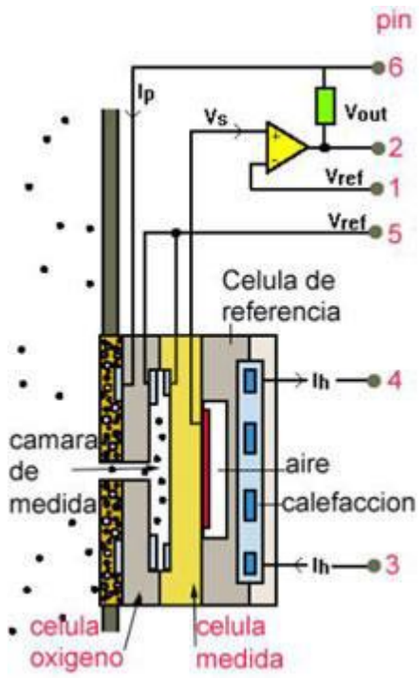
oxígeno presente en ellos con el del aire exterior, la diferencia entre ellos hace que se genere una tensión en bornes de la célula de medida. Eléctricamente, la célula de medida está sobre una tensión de referencia vref (en borne 5), 2,5 voltios. La diferencia anterior de oxigeno convertida en voltaje se le suma a esta vref consiguiéndose el voltaje (vs). El valor de tensión que nos encontramos en vs es 2,5 + v-lambda, que llega a valer entre 2,5 y 3,5 v si trabajara en los dos extremos. El amplificador operacional, funciona a un voltaje de referencia vref (en borne 1) de 3v. Cuando vs cambia y es mayor o menor de esos 3v, el amplificador operacional actúa en el circuito de control.

- **Mezcla rica:** si vs > vref (1), la salida del operacional es más pequeña que vref(5), haciendo pasar una corriente por la célula de oxígeno con un sentido específico, de forma que aumenta el % de oxígeno en la cámara de medida.

- **Mezcla (pobre):** si vs < vref (1), la salida del operacional es más grande que vref (5), haciendo pasar una corriente inversa por la célula de oxígeno, de forma que disminuye el % de oxígeno en la cámara de medida. Con esta corrección, la mezcla en la cámara de medida se va modificando para que su valor lambda sea 1, en este punto la célula de medida ofrece una tensión de 450 mv, valor que se mantendrá constante durante la fase de funcionamiento.

Por lo tanto, cuando la Mezcla es rica el valor lambda está por debajo de 1 y en la cámara de medida se obtiene una tensión que tiene tendencia a subir de los 450 mv. Este efecto hace que el amplificador haga pasar una corriente en un sentido determinado a través de la célula de oxígeno. De esta forma se hace que circule el oxígeno y se aumente el porcentaje en la cámara de medida hasta que el valor sea igual a 450 mv. A medida que se va aproximando a los 450 mv, el valor de corriente va disminuyendo.

Por todo lo anteriormente expuesto, se concluye que por las características de cada uno de los tipos de sensores, el más eficiente en cuanto a la medición del nivel de oxígeno en los gases o en los humos en el caso de una estufa a leña, es el sensor de banda ancha. Sin embargo, la sonda convencional también ofrece una alta fiabilidad y es más sencilla en su implementación, pues solo es necesario implementar un amplificador de instrumentación para que las señales que entregue pueda ser captado por el microcontrolador que se usará para el control del nivel de exceso de aire o de oxígeno en la cámara de combustión de la estufa a combustión lenta. Por lo tanto, es esta sonda la que se usará para hacer las pruebas pertinentes, para su posterior implementación definitiva.



1-6 Sensor lambda de Banda ancha.

Fuente: http://www.edu.xunta.gal/centros/cifpsomeso/system/files/sonda+lambda+de+banda+ancha.pdf

1.3 EL AMPLIFICADOR DE INSTRUMENTACIÓN

1.3.1 Amplificador de Instrumentación Ideal

Los amplificadores de instrumentación son amplificadores diferenciales con las siguientes características:

a. Z_{id} *y* $Z_{ic} \rightarrow \infty$ (para no afectar la fuente de señal a medir)

b. Z_0 $\rightarrow 0$ (para que no afecte la entrada de la etapa siguiente)

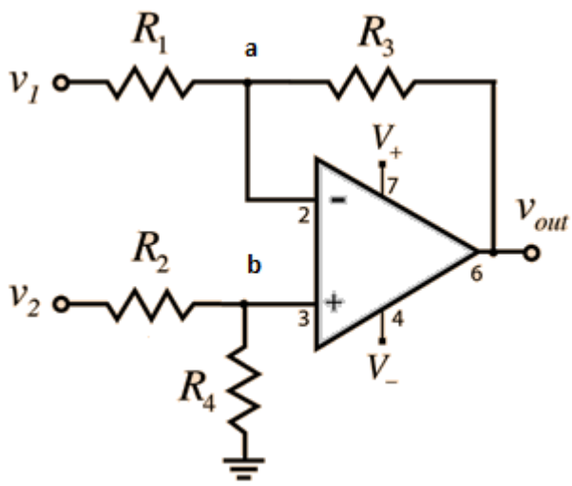
c. AV exacta, estable y controlable

d. $F_r \rightarrow \infty$

e. Bajo offset y deriva para trabajar con entradas de continua y pequeñas.

Uso: amplificador de señal de bajo valor, con alta componente en modo común. por ejemplo la salida de un transductor.[1]

1.3.2 El amplificador sustractor



1-7 Amplificador Sustractor .

Fuente: http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/Electronic/opampvar6.html. Modificado para el capítulo por Raúl Medel.

Debido a que las corrientes en R_1 y R_3 son iguales, pues tanto en la entrada inversora como la no inversora es cero, las corrientes se podrían calcular de la siguiente manera:

$$I1 = \frac{V1 - Va}{R1} \qquad I3 = \frac{Vout - Va}{\mathrm{R3}}$$

Igualando ambas corrientes queda:

(1)

$$\frac{V1 - Va}{R1} = \frac{Vout - Va}{\mathrm{R3}}$$

Respecto a la entrada no inversora

$$I2 = \frac{V2 - Vb}{R2} \qquad I4 = \frac{Vb}{R4}$$

Igualando:

(2)

$$\frac{V2 - Vb}{R2} = \frac{Vb}{R4}$$

(3)

$$Vb = \frac{V2 * R4}{R2 + R4}$$

Considerando que V_a es igual V_b, se reemplaza (3) en (1) y queda que:

$$\frac{V1 - \frac{V2 * R4}{R2 + R4}}{R1} = \frac{Vout - \frac{V2 * R4}{R2 + R4}}{R3}$$

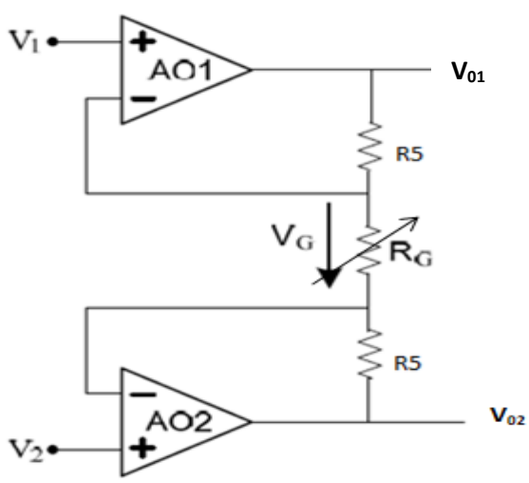
Si igualamos R_1 con R_2 y R_3 con R_4, se tiene:

$$Vout = \frac{R2}{R1} * (V2 - V1)$$

A su vez si se hacen igual las resistencias R_1 con R_2, se tiene que:

(4) $$Vout = V2 - V1$$

1.3.3 <u>Amplificador diferencial (pre-amplificador de instrumentación)</u>



1-8 Amplificador Diferencial.

Fuente: http://ingdkmero.blogspot.com/2012/11/4-amplificador-de-instrumentacion.html.

Se busca Vo1 y Vo2 en función de V1 y V2:

Se aplica c.c. virtual y se plantea Kirschoff de corrientes en el punto V01

$$\frac{Vo1 - V1}{R5} = \frac{V1 - V2}{RG}$$

Despejando V01

(5)

$$Vo1 = V1 * \left(\frac{R5}{RG} + 1\right) - \frac{R5}{RG} * V2$$

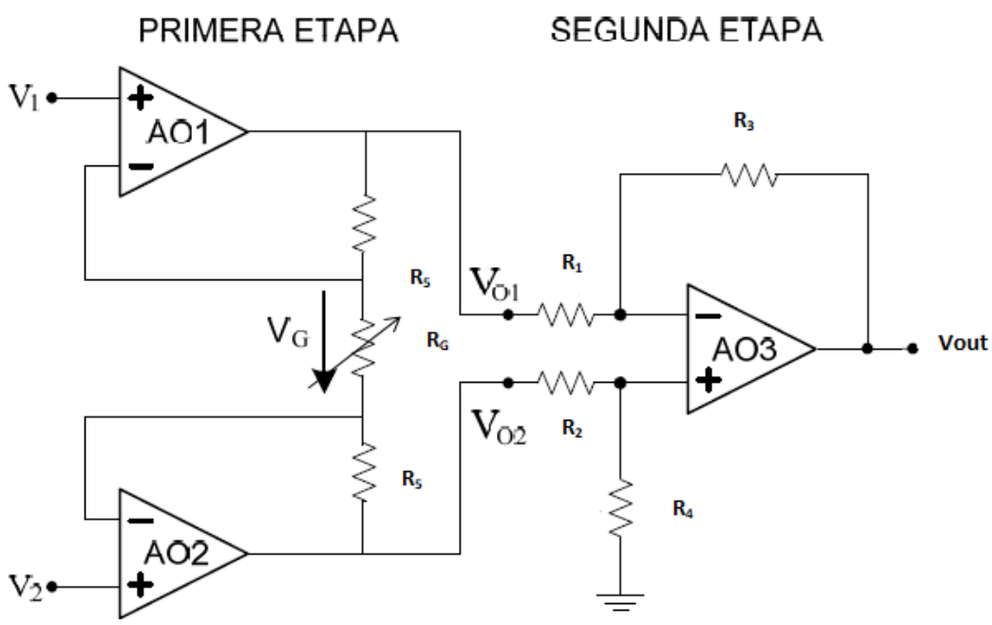
De igual modo con V02

$$\frac{V1 - V2}{RG} = \frac{V2 - Vo2}{R5}$$

(6)

$$Vo2 = V2 * \left(\frac{R5}{RG} + 1\right) - \frac{R5}{RG} * V1$$

1.3.4 Amplificador de instrumentación



1-9 Amplificador de Instrumentación.

Fuente: http://ingdkmero.blogspot.com/2012/11/4-amplificador-de-instrumentacion.html.

Como se puede visualizar en el amplificador de instrumentación se combinan las características de ambos amplificadores previos, aprovechando lo mejor de cada uno, por un lado se aprovecha del pre-amplificador (primera etapa) su alta impedancia de entrada y del amplificador restador (segunda entapa) su baja impedancia de salida, de manera que sea sensible, por una lado, a señales pequeñas, y la salida se transfiera totalmente a la carga por otro.

Ahora bien: reemplazando (5) y (6) en (4) queda:

$$Vout = \left(V2 * \left(\frac{R5}{RG} + 1\right) - \frac{R5}{RG} * V1\right) - \left(V1 * \left(\frac{R5}{RG} + 1\right) - \frac{R5}{RG} * V2\right)$$

Entonces:

$$Vout = \left(1 + \frac{2R5}{RG}\right) * (V2 - V1)$$

CAPÍTULO 2: EXPERIENCIA PRÁCTICA

2.1 SISTEMA DE MONITOREO DE OXÍGENO

Para la implementación del siguiente sistema se consideraron las características específicas de la combustión en una estufa a leña para elegir de manera adecuada los componentes, en especial el sensor que testeará el oxígeno en los humos de escape, el cual entregará las señales necesarias para que el controlador, a través de un actuador, haga un control conveniente del nivel de oxígeno, permitiendo que la combustión sea más eficiente.

Se eligió una sonda lambda para la medición del oxígeno, esta proporcionará un nivel de tensión que se ingresará al amplificador de instrumentación implementado, de manera que amplifique la señal, para que el microcontrolador lo interprete de modo óptimo y pueda generar una señal de salida para comandar un actuador, en este caso se utilizará un motor paso a paso bipolar, el Nema 17, que moverá, a través de un mecanismo reductor, un dispositivo que intervendrá el tiraje de la estufa con el cual se controlará el paso del oxígeno hacia la cámara de combustión.

Por su parte, el control de lo ya expuesto, se logrará utilizando la plataforma Arduino y su entorno de programación, teniendo como base el microcontrolador ATMega328.

2.1.1 Elementos utilizados en el prototipo

a. Sensor lambda de cuatro cables

Para las pruebas se utilizó un sensor de zirconio de cuatro cables, dos de ellos corresponden al calefactor (resistencia) interno para hacer que el dispositivo llegue a la temperatura óptima de funcionamiento (300° C) de una manera más rápida. Los dos restantes pertenecen a los terminales positivo y negativo respectivamente.

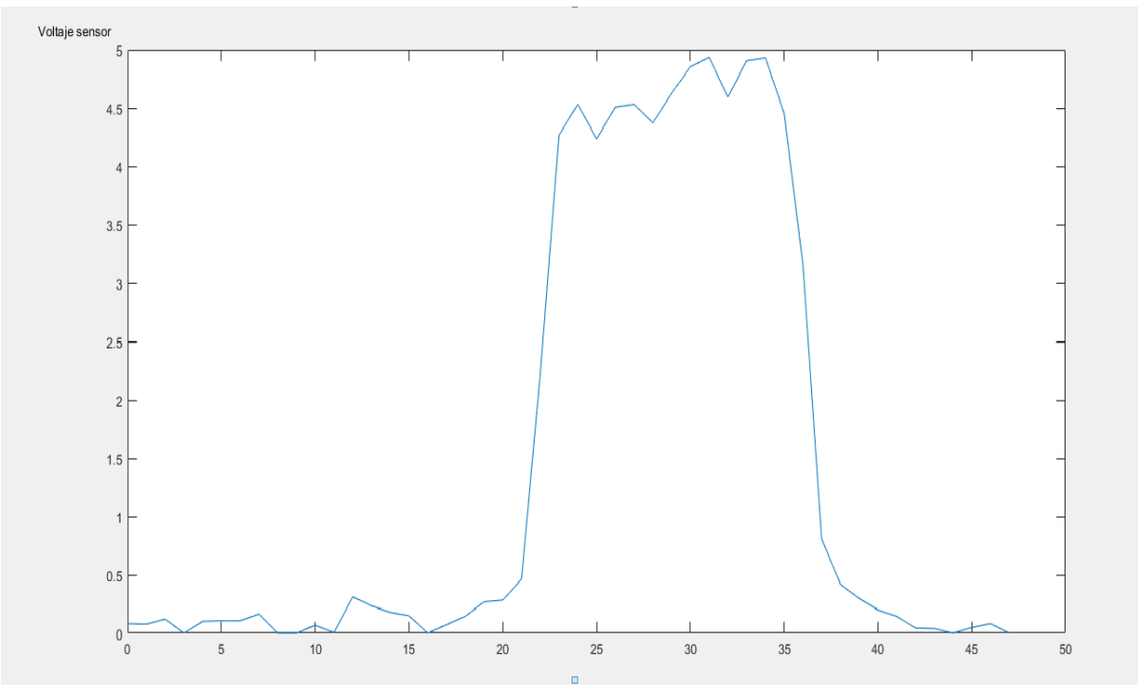
Las pruebas se realizaron en estufas a leña de distintos tipos y tamaños, a las que se tuvo que intervenir a nivel del cañón, de manera de situar dicho sensor en un lugar propicio para la detección del oxígeno residual en los gases.

2-1 Sensor lambda utilizado.

Fuente: elaborado por Raúl Medel.

Al hacer las mencionadas pruebas, se logró constatar que el lugar más adecuado para obtener una lectura favorable de la señales emitidas por el sensor, se encuentra entre la cámara de combustión y el tiraje, por lo que se hace necesario que para la implementación se adapte un tiraje en el cañón para lograr dicha localización, tomando en cuenta, además, que el sensor no debe situarse muy cerca de la cámara de combustión ya que las lecturas de las señales en esa condición se hacen muy inestables.

Atendiendo a las condiciones anteriormente descritas, se logró posicionar el sensor en un sector adecuado de la estufa procediendo a comprobar su funcionamiento. Una vez situado el sensor, este se conectó mediante un amplificador de instrumentación a una tarjeta de adquisición de datos USB6008 de National Instruments, para registrar su comportamiento en Matlab y de este modo poder graficar su curva característica que permitiera obtener los parámetros sobre los cuales trabajar para el posterior control a lazo cerrado. La curva característica obtenida se visualiza en la siguiente imagen:



2-2 Curva característica del sensor utilizado.

Fuente: elaborado por Raúl Medel desde Matlab.

Según los datos obtenidos por la presente curva se puede observar que el control se puede hacer solo en dos rangos de tensión; entre 0.08 V y 0.46 V, y entre 4.25 V y 4.85 V. Al visualizar los datos en el monitor serial del arduino, los rangos de tensión a controlar se sitúan entre 0.0 V y 0.5 V, por un lado y entre 4.24 V y 4,8 V por otro.

En este sentido, el primer rango pertenece a un valor lambda < 1 y el segundo rango pertenece a un valor lamda > 1. Por lo tanto, el rango de tensión que va desde los 1.4 V y los 3.3 V pertenecería a un valor lambda = 1, el que se consideraría el óptimo para una combustión eficiente como se ha mostrado más arriba.

b. Amplificador de instrumentación

El amplificador de instrumentación utilizado se implementó con el integrado LM324 alimentado con una fuente simétrica realizada a base de transistores de potencia y amplificadores operacionales.

El amplificador se diseñó para que a su salida de obtuviera un máximo de 5 V, se utilizaron 6 resistencias de 10kΩ y una resistencia de 5kΩ, de modo que según la expresión:

$$Vout = \left(1 + \frac{2R5}{RG}\right) * (V2 - V1)$$

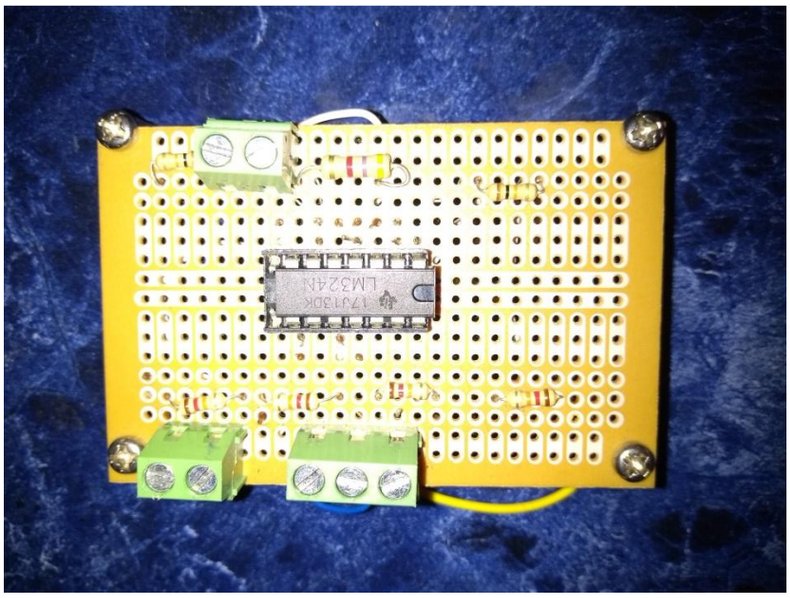
Asumiendo los valores para R5 y RG en 10KΩ y 5 KΩ respectivamente, se calculó que la ganancia máxima el amplificador será de 5V, ya que máximo el nivel de tensión que puede entregar el sensor lambda es de 1V (V2=1V y V1=0V). De este modo, se aseguró que el microcontrolador pudiera leer las señales sin error. Así entonces, el mencionado amplificador se implementó, combinando las características de dos tipos de configuraciones con amplificadores operacionales, a saber: como amplificador diferencial y como amplificador sustractor. De este modo, se pudo comprobar que al ingresarles las señales emitidas por el sensor al amplificador de instrumentación, este las amplificaba según lo teóricamente calculado, por lo que se pudo constatar que a la entrada posee una muy alta impedancia y a la salida una impedancia muy cercana a 0.

Por consiguiente, las lecturas que arrojo el microcontrolador visualizadas en el monitor serial se muestran en la siguiente imagen:

```
vooltaje escalado: 0.00
Lambda <1
voltaje escalado: 0.06
Lambda <1
voltaje escalado: 0.01
Lambda <1
voltaje escalado: 0.18
Lambda <1
voltaje escalado: 0.12
Lambda <1
voltaje escalado: 0.29
Lambda <1
voltaje escalado: 4.24
Lambda >1
voltaje escalado: 4.79
Lambda >1
voltaje escalado: 4.55
Lambda >1
voltaje escalado: 4.72
Lambda >1
voltaje escalado: 4.42
Lambda >1
voltaje escalado: 0.24
Lambda <1
voltaje escalado: 0.08
Lambda <1
voltaje escalado: 0.06
Lambda <1
voltaje escalado: 0.00
Lambda <1
voltaje escalado: 0.00
Lambda <1
voltaje escalado: 0.39
Lambda <1
```

2-3 Señales de tensión visualizadas en el monitor serial de plataforma Arduino

Fuente: Elaborado por Raúl Medel desde monitor serial arduino.



2-4 Amplificador de Instrumentación implementador.
Fuente: Elaborado por Raúl Medel.

c. Plataforma Arduino

Cómo ya se dijo más arriba, para el control del oxígeno se utilizó la plataforma arduino y su entorno de desarrollo. Ésta es una plataforma de prototipos electrónicos de código abierto basada en hardware y software, posee entradas y salidas digitales, así como entradas analógicas y salidas pwm. Se caracteriza, además, por ser barato, multiplataforma, por poseer un entorno de programación simple y claro; por tener un código abierto, un software extensible y finalmente por estar basado en los microcontroladores ATMEGA328 y ATMEGA168 de Atmel.

En lo concerniente al presente proyecto, se utilizó una entrada analógica (A0) por la cual se leyeron las señales del sensor utilizado, cuatro salidas digitales (8, 9, 10, 11) para comandar el motor paso a paso bipolar (Nema 17), y dos salidas digitales más (6, 7) para encender dos leds indicadores de estado lambda. Por último, basado en el lenguaje de programación en C, se procedió a realizar el programa que pondrá en funcionamiento el sistema de monitoreo y control, el cual se detalla a continuación:

2-5 Arduino Uno.

Fuente: Elaborado por Raúl Medel.

- Programación

```
#include <math.h>
const int steppin = 10;
const int dirpin = 12;
const int tiempo = 5;

```

Se declaran las variables que se utilizarán para comandar el motor paso a paso, y se incluye una librería que permitirá el escalamiento de la señal.

```
void setup()
{
pinMode(steppin,OUTPUT);
pinMode(dirpin,OUTPUT);
pinMode(7,OUTPUT);
pinMode(6,OUTPUT);
pinMode(5,OUTPUT);
Serial.begin(9600);
}
```

Se declaran los pines digitales como salida y se inicia el monitor serial, por medio del cual se visualizarán los datos obtenidos de la entrada analógica provenientes del sensor lambda.

```
void loop()
{
float valorSensor;
float voltajeSensor;
valorSensor = analogRead(A0);
voltajeSensor =(valorSensor/1024)*5.0;
Serial.print("voltaje escalado: ");
Serial.println(voltajeSensor);
```

Se inicia el ciclo iterativo infinito y se declaran las variables asociadas al sensor en las cuales se alojaran los datos que ingresan directamente a la entrada A0, por una parte

(valorSensor), y en la que se alojarán los valores transformados a voltaje (voltajeSensor), por otro, para posteriormente imprimirlos en el monitor serial.

```
24 if((voltajeSensor>=0.0)&&(voltajeSensor<=1.2))
25 {
26 Serial.println("Lambda <1");
27 digitalWrite(7,HIGH);
28 digitalWrite(6,LOW);
29 digitalWrite(5,HIGH);
30 digitalWrite(dirpin,HIGH);
31 for(int x = 0; x < 200; x++)
32 {
33 digitalWrite(steppin,HIGH);
34 delay(tiempo);
35 digitalWrite(steppin,LOW);
36 delay(tiempo);
37 }
38 }
```

A través de la instrucción “if”, se indican las condiciones en las cuales el motor paso a paso recibirá una señal para girar en un sentido, lo que se logra poniendo la variable “dirpin” en HIGH, lo cual permitirá modificar el valor lambda de los niveles de oxígeno en los humos, integrando, además, un ciclo “for” para que dicho motor dé un giro en 360° con un tiempo de retardo en cada paso, que en este caso es de 5 milisegundos.

Los valores indicados más arriba, corresponden a un valor labmda < 1.

```
39 else if((voltajeSensor >=3.9)&&(voltajeSensor<=4.9))
40 {
41 Serial.println("Lambda >1");
42 digitalWrite(7,HIGH);
43 digitalWrite(6,LOW);
44 digitalWrite(5,HIGH);
45 digitalWrite(dirpin,LOW);
46 for(int x = 0; x < 200; x++)
47 {
48 digitalWrite(steppin,HIGH);
49 delay(tiempo);
50 digitalWrite(steppin,LOW);
51 delay(tiempo);
52 }}
```

Mediante la instrucción “else if”, se indican las condiciones en las cuales el motor paso a paso recibirá una señal para girar en el sentido opuesto al anterior, enviando un nivel “LOW” a “dirpin”, lo cual permitirá modificar el valor lambda de los niveles de oxígeno en los humos, integrando un ciclo “for” cuya función ya se ha mencionado más arriba.

Los valores indicados en este ciclo corresponden a un valor lambda >1.

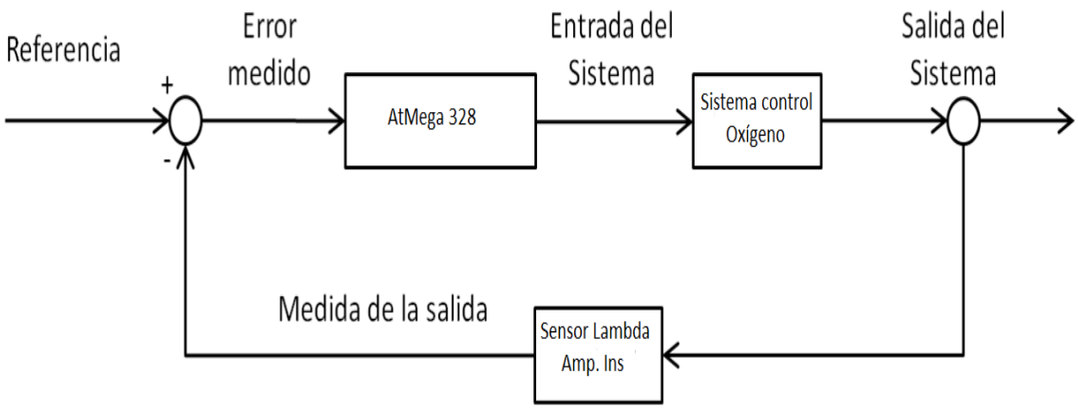
```
else if ((voltajeSensor > 1.2)&&(voltajeSensor < 3.9))
{
Serial.println("Lambda 1");
digitalWrite(7,LOW);
digitalWrite(6,HIGH);
digitalWrite(5,LOW);
digitalWrite(steppin,LOW);
}
}
```

Finalmente, se indican las condiciones en las cuales el motor paso a paso se mantenga inactivo debido a que los valores corresponden a un lambda = 1, correspondiente al nivel estequiométrico del oxígeno en los humos. Para lograr dicho propósito, se envía un valor “LOW” a la variable ”steppin”, de modo que el motor paso a paso se detenga.

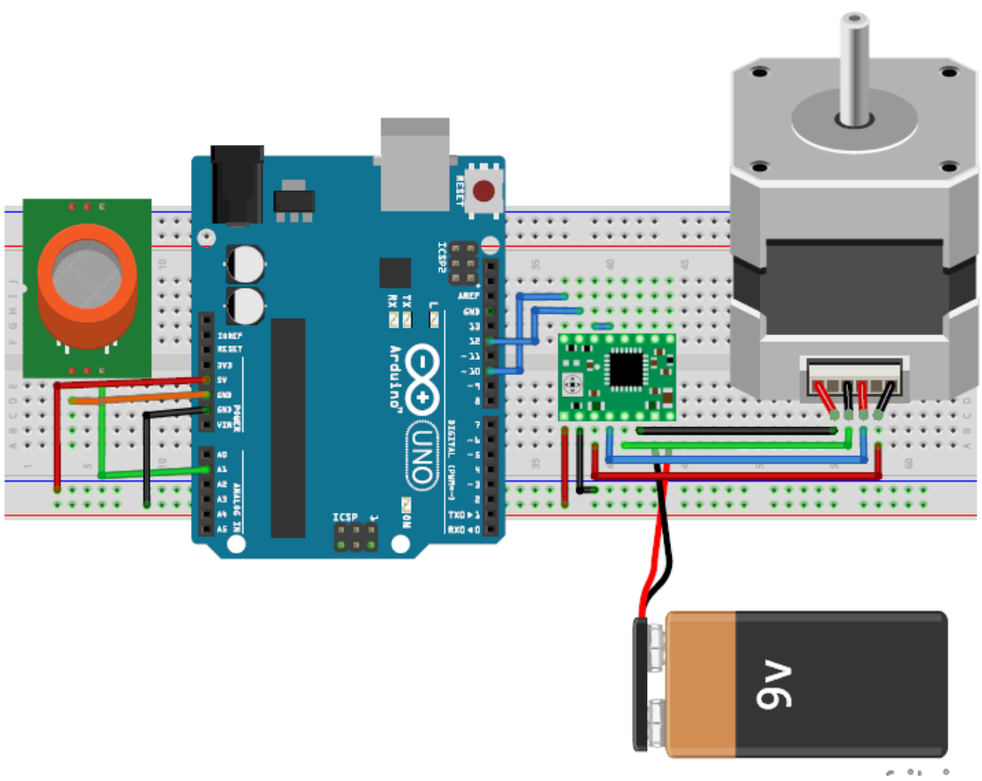
2-6 Motor paso a paso Nema 17.
Fuente: Elaborado por Raúl Medel.

2-7 Driver A4988 para motor paso a paso bipolar.
Fuente: Elaborado por Raúl Medel.

2.1.2 Diagrama del lazo de control



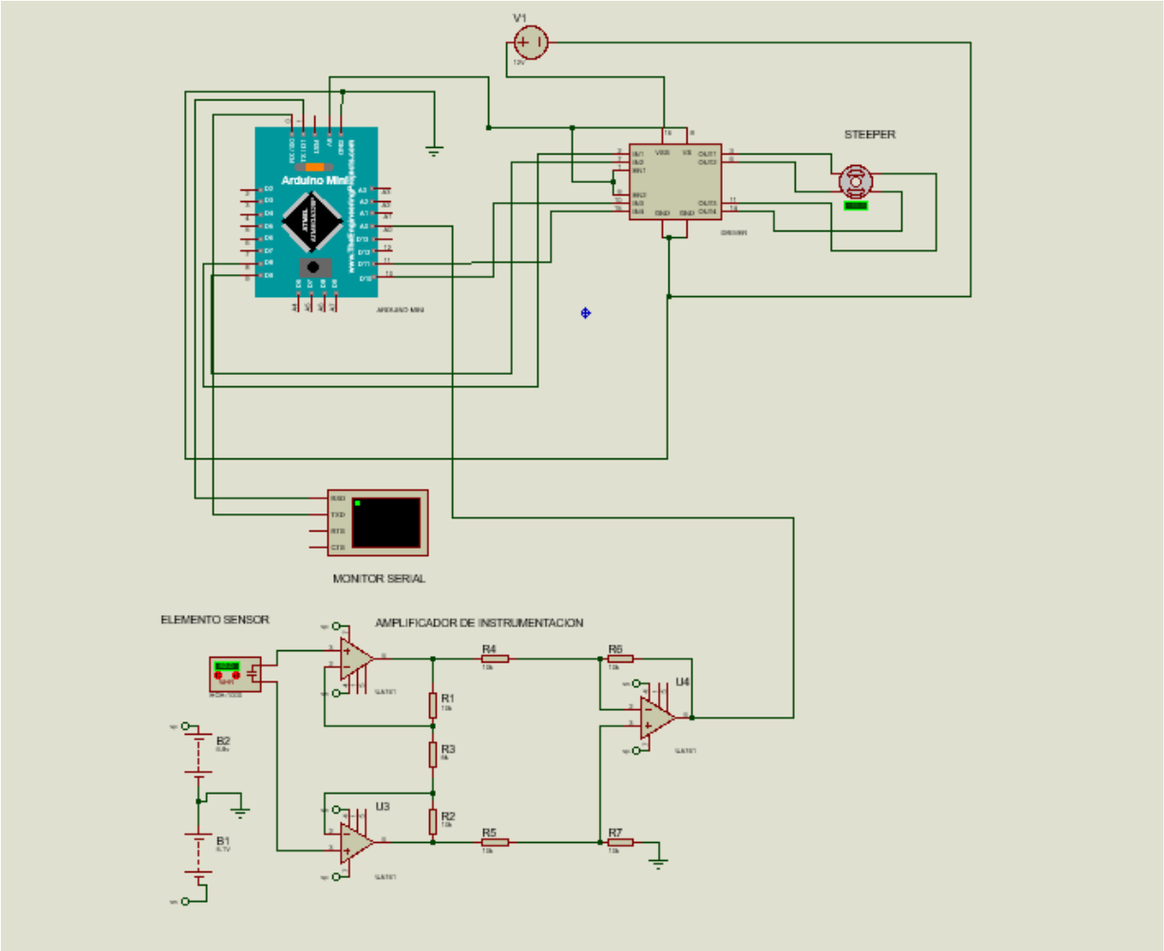
2.2 PROTOTIPO



2-8 Prototipo.

Fuente: Elaborado por Raúl Medel.

2.2.1 Esquema circuital



2-9 Esquema circuital.

Fuente: Elaborado por Raúl Medel.

Conclusiones

Al estudiar el proceso de combustión en una estufa a leña se pudo constatar que el oxígeno ocupa un rol preponderante en la misma, ya que como comburente permite, por un lado, que esta se produzca, y por otro, que sea más eficiente, según la cantidad de oxígeno que haya en ella. De este modo, una combustión eficiente será la que se dé alrededor de la relación estequiométrica de la mezcla aire-combustible, lo cual supone que la cantidad de oxígeno que se testee en los humos sea en torno al lambda 1.

Por otro lado, se consiguió verificar que mientras más seca se encuentre la madera, menor poder calorífico se perderá en la combustión, y menor será la emisión de gases contaminantes, debido a que lo primero que libera la madera en la combustión es el H2O, de modo que con gran cantidad de humedad un apreciable porcentaje de su poder calorífico se perderá en el proceso de secado, por lo que se estará en presencia de una muy ineficiente combustión.

Al utilizar el sistema de monitoreo creado se logró visualizar la curva del nivel de oxígeno presente en los humos. Sin embargo, debido a las características del sensor empleado, la medición fue más o menos lineal solo en dos rangos del recorrido, el inferior y el superior respectivamente. Por lo tanto, para identificar los niveles de relación lambda a controlar, fue necesario atenerse a las señales correspondientes a dichos rangos.

Respecto a la implementación del sistema creado, se logró comprobar que el control del nivel de oxígeno es posible solo en los rangos anteriormente descritos, es decir, entre los rangos superior e inferior (0.0 - 0.5 y 4.24 – 4.8) por lo que, si bien, hace que la combustión sea más eficiente, dicho sistema se podría mejorar aún más. Lo cual se lograría, mediante la linealización de las señales emitidas por el sensor, diseñando un circuito electrónico adicional, a base de operacionales y el integrado LM3914, por ejemplo. Sin embargo, para lograr dicho propósito se requeriría un estudio más acabado y centrado solo en la respuesta del sensor, lo que supondría un nuevo proyecto de investigación.

Bibliografía

[1] BOYLESTAD Rober, NASHELSKY Louis, Electrónica: Teoría de circuitos y dispositivos electrónicos, Décima edición, México, Pearson, 2009, ISBN 978-607-442-292-4.

[2] MÁRQUEZ Manuel, Combustión y quemadores, España, Marcombo, 2010, ISBN 84-267-1361-5.

[3] BERU.COM, Todo sobre sondas lambda, [en línea],< https://es.scribd.com/document/236489677/Todo-Sobre-Las-Sondas-Lambda> [Junio 2018].

[4] COUGHLIN Robert, Amplificadores operacionales y circuitos integrados linéales, Quinta edición, [en línea], https://kupdf.net/download/amplificadores-operacionales-y-circuitos-integrados-lineales-robert-f-coughlin-5edpdf_59e06b4308bbc5772be65354_pdf [junio 2018].

[5] FERNÁNDEZ, Pedro, Termodinámica técnica, Cap XVI, Combustión, [en línea] < http://files.pfernandezdiez.es/Termodinamica/PDFs/16Termod.pdf> [23 abril de 2018].
MORENO, Ignacio, El amplificador de instrumentación, Área de tecnología electrónica, Universidad de Burgos, [en línea], <http://www.unet.edu.ve/~ielectro/42-amplificadorInstrumentacion.pdf>, [23, abril de 2018].

[6] GARCÍA, Ricardo, Combustión y combustibles, noviembre 2001, [en línea], <kimerius.com/app/download/5780666669/Combustión+y+combustibles.pdf> [23, abril de 2018].

[7] JAIME, Díaz, “Diseño y construcción de un electrocardiógrafo portátil con selector de doce derivaciones para visualización de trazos en un equipo de cómputo”, Ingeniero Eléctrico-Electrónico, México D.F. Ciudad Universitaria, Universidad Nacional Autónoma de México, 2011, Amplificación de Señales, Cap 3, [en línea], http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/jspui/bitstream/132.248.52.100/263/5/A5.pdf [1, mayo, 2018].

[8] LÓPEZ, Jaime, Programa de Ingeniería electrónica, Universidad del Quindio, Armenia, Colombia, 2003.

[9] MECÁNICO AUTOMOTRIZ.ORG, La electrónica del automóvil, [en línea],< https://www.mecanicoautomotriz.org/1857-manual-electronica-automotriz-sensores-actuadores-sistemas > [junio 2018].

[10] TESTO, Análisis de la combustión, [en línea], https://es.scribd.com/document/356125746/CALEFACCION-DR-pdf [1, mayo de 2018].

[11] UNIVERSIDAD SANTIAGO DE CHILE, Ingeniería de ejecución mecánica, programa vespertino, Asignatura contaminación ambiental desarrollo sustentable, Fenómeno de la combustión, [en línea] <https://es.scribd.com/document/269969981/Fenomeno-de-Combustion> , [mayo 2018].

[12] VARÓN Javier, RESTREPO Álvaro, Caracterización térmica y estequiométrica de la combustión de la cascarilla de arroz, Dialnet, N° 24, 2003.

[13] Xunta, Edu, Cuaderno de análisis, [en línea] http://www.edu.xunta.gal/centros/cifpsomeso/system/files/SONDA+LAMBDA+DE+BANDA+ANCHA.pdf ,[junio, 2018].