

TFG • Grado de Tecnologías de la Comunicación

SISTEMA DE CALIBRACIÓN DE SENSORES PARA LA PLACA SMART CITIZEN

PEOPLE LOOKING FOR A BETTER CITY

Javier González Mansilla




Tutor: **Pere Tuset Peiró**

Junio de 2015





This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

-  **Attribution** • You must give [appropriate credit](#), provide a link to the license, and [indicate if changes were made](#). You may do so in any reasonable manner, but not in any way that suggests the licensor endorses you or your use.
-  **NonCommercial** • You may not use the material for [commercial purposes](#).
-  **ShareAlike** • If you remix, transform, or build upon the material, you must distribute your contributions under the [same license](#) as the original.

Resumen

¿Cómo podemos saber cuáles son los niveles reales de polución del ambiente que nos rodea y cómo puede ayudarnos esta información a mejorar la [calidad medioambiental](#)?

El presente trabajo se centra en analizar las posibles [estrategias de calibrado](#) de los sensores de las placas que [Smart Citizen](#) ha desarrollado para poder dar respuesta a aquellos Ciudadanos que se plantean estas preguntas y que ya forman parte de [Ciudades inteligentes reales](#).

Para ello conoceremos mejor cómo funcionan los [sensores de gas, temperatura y humedad del kit de Smart Citizen](#) y encontraremos la mejor manera de trabajar con la información que proporcionan.



Abstract

How can we determine the real air pollution levels around us and how could this information help us to improve our [environment quality](#)?

The following work aims to analyze different [calibration strategies](#) for the sensors of the boards developed by [Smart Citizen](#) in order to respond to Smart Citizens who have raised these questions and are already part of [real Smart Cities](#).

To this end we will learn how the [gas, humidity and temperature sensors](#) of Smart Citizen kits work and the best ways we can take advantage of the information they provide.

Gracias Pere, y gracias Alex y Guillem de SmartCitizen por la ayuda que me habéis ofrecido para poder realizar este trabajo.

Gracias a todos los que me habéis acompañado y ayudado a llegar hasta aquí.

Índice

1. INTRODUCCIÓN	8
1.1. SMART CITIES.....	8
1.2. MOTIVACIÓN Y BENEFICIOS.....	8
1.3. OBJETIVOS GENERALES.....	9
1.4. OBJETIVOS ESPECÍFICOS Y ALCANCE.....	10
1.5. PALABRAS CLAVE	10
2. MARCO DEL PROYECTO.....	11
2.1. ESCENARIO ACTUAL.....	11
2.2. COMPONENTES DE LA PLATAFORMA Y MATERIAL.....	12
2.3. PLANIFICACIÓN Y METODOLOGÍA	14
2.4. ENTREGAS PARCIALES.....	15
2.5. ENTREGABLES FINALES	16
3. SENSORES MEDIOAMBIENTALES.....	17
3.1. MICS – 4514 CO & NO2 SENSOR	17
Funcionamiento del sensor	17
Condiciones ambientales.....	19
Rango de Operación del Sensor.....	19
3.2. HTU21D(F) RH/T SENSOR.....	21
Funcionamiento del sensor	21
Condiciones ambientales.....	22
Rango de Operación del Sensor.....	23
Calibration Certification.....	24
4. ESTRATEGIAS DE CALIBRACIÓN	26
4.1. VALIDACIÓN Y LECTURA DE DATOS DE LOS SENSORES.....	26
Sensor de gases CO y NO2.....	28
Sensor de Temperatura y Humedad.....	29
4.2. SENSOR CO & NO2	30
4.3. SENSOR RH/T	33
5. METODOLOGÍA DE CALIBRADO.....	35
5.1. CONSIDERACIONES PREVIAS.....	35
Concentración de CO en ppm.....	35
Concentración de NO2 en ppb	36
Dependencia del Sensor de CO a las condiciones medioambientales.....	37
Dependencia del Sensor de NO2 a las condiciones medioambientales	39
Margen de error del sensor de Temperatura y Humedad.....	40
5.2. OBJETIVOS	41

5.3. FUNCIÓN DE CONVERSIÓN · CONCENTRACIÓN DE CO	41
5.4. FUNCIÓN DE CONVERSIÓN · CONCENTRACIÓN DE NO2.....	44
5.5. FUNCIÓN DE CORRECCIÓN PARA EL SENSOR DE CO	46
6. ALGORITMO	49
7. CONCLUSIONES.....	52
8. RECURSOS Y REFERENCIAS.....	54

Índice de imágenes

Figura 1 · Comentarios en el Foro de Smart Citizen respecto al calibrado de los Sensores	11
Figura 2 · Área Documental de Smart Citizen, Sección de Calibrado de los Sensores	12
Figura 3 · Material y Recursos empleados.....	13
Figura 4 · Metodología empleada en la elaboración del TFG	14
Figura 5 · Planificación seguida a lo largo del TFG.....	15
Figura 6 · Imagen del Sensor MiCS – 4514.....	17
Figura 7 · Sensibilidad del Sensor MiCS – 4514	18
Figura 8 · Esquema del Circuito del Sensor MICS-4514	18
Figura 9 · Imagen del Sensor SHT21	21
Figura 10 · Rango de Operación del Sensor SHT21.....	21
Figura 11 · Esquema del Circuito del Sensor SHT21	22
Figura 12 · Precisión del Sensor SHT21 según las condiciones ambientales.....	22
Figura 13 · Rango de Operación del Sensor SHT21.....	23
Figura 14 · SHT21 Sensor Calibration Certification	25
Figura 15 · Validación de Datos de los Sensores.....	27
Figura 16 · Funciones utilizadas por el Sensor MICS-4514 (sck_beta_v0_9)	28
Figura 17 · Funciones utilizadas por el Sensor SHT21 (sck_beta_v0_9).....	29
Figura 18 · Relación entre Rs y la Humedad Relativa	30
Figura 19 · Relación entre Rs y la Temperatura	31
Figura 20 · Tiempo establecido entre medición y medición (sck_beta_v0_9).....	32
Figura 21 · Curva que muestra la relación en la concentración de CO en ppm y Rs (23°C y 50%RH)	32
Figura 22 · Precisión del Sensor SHT21 según las condiciones ambientales.....	33
Figura 23 · Función de concentración de CO en ppm en base a Rs/Ro.....	35
Figura 24 · Valores de Ro para CO en sck_beta_v0_9	35
Figura 25 · Función de concentración de NO2 en ppb en base a Rs/Ro	36
Figura 26 · Valores de Ro para NO2 en sck_beta_v0_9	36
Figura 27 · Dependencia a la temperatura del Sensor de Gases	37
Figura 28 · Dependencia a la humedad del Sensor de Gases	38
Figura 29 · Dependencia a la temperatura del sensor EC4-20-NO2	39
Figura 30 · Variaciones de Temperatura aplicadas y respuesta del Sensor de NO2	39
Figura 31 · Margen de error del Sensor de Temperatura y Humedad.....	40
Figura 32 · Función para obtener la Concentración de CO en ppm	44
Figura 33 · Función para obtener la Concentración de NO2 en ppb	46
Figura 34 · Función para corregir la dependencia a la Temperatura del Sensor de CO	48
Figura 35 · Algoritmo implementado.....	50
Figura 36 · Aplicación del Factor de Corrección del Sensor de CO	51
Figura 37 · Recursos empleados por Sonoma Technology para analizar Sensores medioambientales	52
Figura 38 · TELEDYNE Model T700 Dynamic Dilution Calibrator	53

Índice de tablas

Tabla 1 · Rango de Operación del Sensor de CO	19
Tabla 2 · Rango de Operación del Sensor de NO2	19
Tabla 3 · Especificaciones del Sensor de CO	20
Tabla 4 · Especificaciones del Sensor de NO2	20
Tabla 5 · Rango de Operación del Sensor SHT21	24
Tabla 6 · Rango de Temperatura Ambiental del Sensor de Gases	31
Tabla 7 · Rangos de Temperatura y Humedad Relativa	34
Tabla 8 · Valores de concentración de CO en ppm	42
Tabla 9 · Valores de concentración de NO2 en ppb	45
Tabla 10 · Valores de dependencia a la temperatura del Sensor de CO	46



1. INTRODUCCIÓN

El presente documento muestra la motivación, alcance, objetivos, planificación y análisis realizado en el Trabajo de fin de Grado, TFG, que supone la puesta en práctica de los conocimientos adquiridos en el Grado de Tecnologías de la Telecomunicación, el **Diseño e implementación de un sistema de calibración de sensores para la placa Smart Citizen** es mi aportación al proceso de colaboración y participación Smart Citizen, la plataforma de procesos cooperativos que conecta a los ciudadanos con su entorno con el objetivo de servir para construir una ciudad mejor.

1.1. SMART CITIES

Los ciudadanos estamos siendo testigos de cómo en las metrópolis actuales los datos fluyen a través de canales de comunicación cotidianos, datos que es necesario convertir en información que podamos utilizar para darle un nuevo sentido al espacio físico urbano con el que interactuamos.

En esta nueva vida urbana somos capaces de integrar sensores, interfaces físicas, aplicaciones móviles y tecnologías cooperativas open source para evolucionar hacia **ciudades más responsables y sostenibles** donde los ciudadanos podemos medir, monitorizar, evaluar y compartir democráticamente información sobre las condiciones del entorno que nos rodea.

Ciudades inteligentes en las que **ciudadanos inteligentes** aportan información a una red distribuida para lograr desarrollar modelos domésticos, industriales y de servicios que serán energéticamente más eficaces.

1.2. MOTIVACIÓN Y BENEFICIOS

Considero que una plataforma como la de Smart Citizen que está basada en Arduino, como concepto en sí, ha revolucionado el acceso a la tecnología. Hardware, software y documentación libre distribuidos de manera

abierta e innovadora proporcionando todo un mundo de posibilidades por su sencillez, versatilidad y aplicabilidad. Es apasionante comprobar que es posible desarrollar fácilmente aplicaciones en casi cualquier campo, desde la medicina, el ocio, la industria o la seguridad, hasta el gran potencial que ofrece en el mundo del Internet de las cosas.

Personalmente, este Trabajo de fin de Grado supone una oportunidad única de la cuál sentirse orgulloso, ya que me permite participar estrechamente como colaborador en un proyecto de estas características, aportando una solución a un problema reportado por los usuarios de Smart Citizen desde hace meses que es la falta de una metodología apropiada y un algoritmo adecuado de calibrado de los sensores medioambientales para evitar lecturas erróneas.

En este proyecto hay un claro **beneficio**, y es medioambiental, la monitorización de la calidad del aire junto con las condiciones ambientales en las ciudades a través de procesos participativos de usuarios que disponen de herramientas efectivas y de bajo coste accesibles para cualquier ciudadano comprometido con una ciudad mejor.

1.3. OBJETIVOS GENERALES

El objetivo general ha sido realizar un ejercicio de síntesis y consolidación de todos los conocimientos adquiridos a lo largo de los estudios del Grado de Tecnologías de la Telecomunicación con el fin de poder aplicarlos en un entorno profesional y/o académico.

En particular, se trata de poner en práctica las siguientes competencias y habilidades específicas dentro del ámbito de los sistemas integrados, embebidos o empotrados:

- Conocer de primera mano las aplicaciones y metodologías en el desarrollo de sistemas empotrados tanto a nivel de modelos de software como de arquitectura hardware.
- A través del uso de herramientas conocidas, saber programar aplicaciones sencillas para poder utilizar funcionalidades básicas en sistemas empotrados.
- Demostrar capacidad de adaptación a las nuevas tecnologías y las posibilidades que nos ofrecen los entornos actuales.

1.4. OBJETIVOS ESPECÍFICOS Y ALCANCE

El objetivo principal de este Trabajo de fin de Grado en concreto contempla:

- Por una parte estudiar y evaluar diferentes estrategias de calibración para los sensores medioambientales MICS4514 y Sensirion SHT21 incorporados en las placas Smart Citizen v1.1 y anteriores, y por otra,
- Desarrollar una **metodología de calibración** de los sensores e implementar el **algoritmo por código** que la utilice y que estará disponible en el repositorio público GitHub.

1.5. PALABRAS CLAVE

- **Smart Citizens in Smart Cities:** Concepto clave en el que se basa la plataforma Smart Citizen, ciudadanos inteligentes en ciudades inteligentes.
- **Sensor Medioambiental integrado:** el objetivo principal del proyecto es poder calibrar los sensores integrados en la placa Smart Citizen.
- **Calidad del aire:** uno de los principales beneficios es poder colaborar en la mejora de la calidad del aire en las ciudades a través de la monitorización y la evaluación de los indicadores generados.
- **Procesos Cooperativos:** cumple con la cultura Arduino, desarrollos tecnológicos colaborativos en pro de un entorno sostenible y responsable.
- **Metodología:** no sólo es uno de los objetivos de este Trabajo de fin de Grado, supone también estandarizar el conjunto de procedimientos enfocados en este caso a calibrar los sensores.

2. MARCO DEL PROYECTO

2.1. ESCENARIO ACTUAL

Hasta el momento, han sido varios los usuarios de los Kits de Smart Citizen que han mostrado su interés y también han planteado sus dudas sobre el actual calibrado de los sensores medioambientales, tal y como se puede ver en los siguientes comentarios del foro de Smart Citizen,

sensors calibration ?

@rohwer @TechLabLR Sorry for the late response. You can check the RAW sensor data via Arduino serial monitor. You can also send this RAW data from the SCK to your own server adding a customized formula. As we have said before, the formula in the platform is wrong! It was implemented thinking on a SCK v1.1 inside an enclosure. If you do not have your kit inside an enclosure you temperature will be always under real value. Any help on this aspect will be really welcome as we still trying to find somebody that focuses on **calibr** Calibration – what are normal values?

aitoraloa March 29 in Sensors

Hi Kaz911,

Sorry for the late response.

Temperature and humidity peaks are already fixed. Something went wrong when coding. It happened to all of us. :)

Calibration is a work in progress topic. All my sensors are also below the real temperature. We need to reformulate the **calibration** parameters. It is a bit unreal that would be

CO in lethal levels.

Look what we had from the Air Quality sensor manufacturer:

Calibration for 4514 is more difficult because stability is lower than for 2614 which is the sensor used for outdoor ozone monitoring. After burn-in operation of 2 weeks in electronic and final plastic housing, we recommend multipoint **calibration** in concentration (depends of the range to cover) at three temp. This **calibration** is valid for 6 months but depends of environmental conditions and sensor protection.

Important points to bare in mind:

- 1) Metal oxide gas sensors have intrinsic drift over time i.e. it is necessary to perform **calibration** on a regular basis.
- 2) Because of spread in baseline resistance, sensitivity, cross-sensitivity, temperature dependency it is not possible to apply same **calibration** parameters to all the sensors.
- 3) This type of sensor is efficient to detect change in concentration but not well adapted to absolute readings because of multiple dependency (T, RH, cross-contaminants).
- 4) Using smart algorithm allows indicating useful information like the correlation with CO2 in confined space like offices or buildings (see VZ-87 in attachment).

For absolute readings with high accuracy and repeatability I agree with you that you should use another technology.

Temperature and Humidity wrong values

Hello all,
we just found a bug in our data **calibration** system when dealing with batch updates.
Now it is solved and everything should be working fine.
Our apologies and please let us know if something goes wrong again, your feedback is really appreciated.
Guillem.

guillem April 2014 in Sensors

Figura 1 · Comentarios en el Foro de Smart Citizen respecto al calibrado de los Sensores

Las principales inconsistencias expuestas son las siguientes:

- Los valores de concentración registrados por los sensores superan los valores de exposición recomendados por las principales agencias de salud. Si esos valores fueran correctos serían altamente tóxicos.

- Existen diferencias entre los valores registrados de unas placas a otras en igualdad de condiciones medioambientales.
- Los valores de concentración de gas se muestran en unidades de resistencia, tal cual se recibe del sensor, pero es conveniente mostrar esa información en unidades internacionalmente reconocidas, partes por millón, por billón o miligramos por metro cúbico.
- Hay variaciones en los valores registrados por los sensores que se deben previsiblemente a factores medioambientales.

La respuesta por parte del equipo de Smart Citizen es que actualmente se está preparando documentación al respecto y que se está trabajando duro en ofrecer una solución en cuanto al calibrado de los sensores,

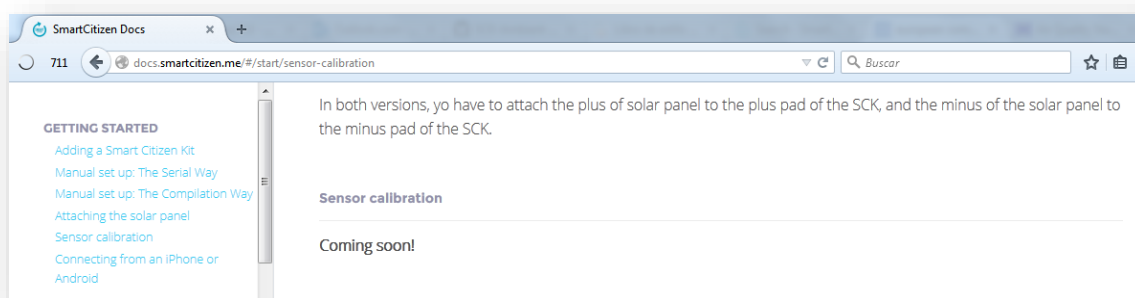


Figura 2 · Área Documental de Smart Citizen, Sección de Calibrado de los Sensores

Por todo ello, con este trabajo, se intenta establecer las bases del proceso de calibrado necesario para que los Kits de Smart Citizen se puedan distribuir con absoluta garantía de funcionalidad.

2.2. COMPONENTES DE LA PLATAFORMA Y MATERIAL

Para realizar el análisis se ha utilizado la plataforma open source de monitorización medioambiental, El **Smart Citizen Kit** o SCK Urban Shield v1.1 compuesto por hardware compatible con Arduino, una placa base que cuenta con una unidad central de proceso que usa el chip AVR Mega 32U4-AU de Atmel, un microcontrolador de 8 bits de alto rendimiento, y con el módulo WIFLY RN 131 para la transmisión inalámbrica de datos.

Cuenta también con la placa de **sensores integrados** de la que se utilizarán el sensor metal oxido MicroChemical Systems 4514 de e2V que sirve para medición de calidad del aire y el sensor Sensirion SHT21 para medir las condiciones de humedad y temperatura.

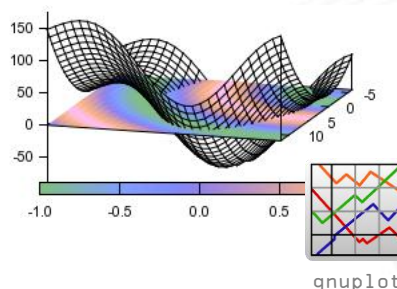
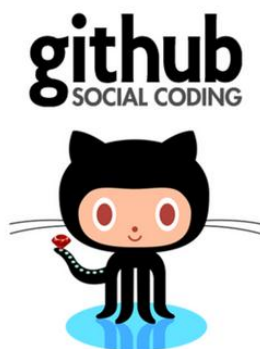
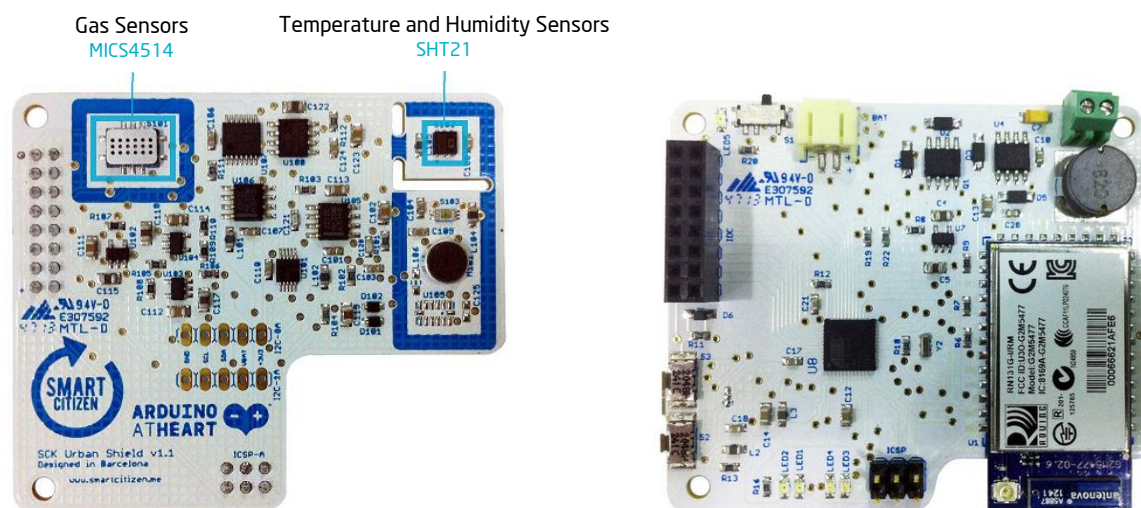


Figura 3 · Material y Recursos empleados

Para poder realizar una aproximación a las funciones de conversión de valores de concentración de gases y la corrección de lecturas incorrectas de gas debido a la dependencia a la temperatura de los sensores, ha sido necesario utilizar el programa Gnuplot en su versión 5.0, software distribuido bajo licencia de uso libre que permite generar gráficas y funciones de datos.

Además, como documentación y material de apoyo están disponibles las librerías para el ATmega32U4, el conjunto de herramientas toolchain para Arduino y el firmware, documentación y publicaciones tanto de los sensores como del SCK v1.1.

2.3. PLANIFICACIÓN Y METODOLOGÍA

La realización de este Trabajo de fin de Grado se ha enfocado siguiendo un modelo en cascada, es decir siguiendo un enfoque metodológico de fases consecutivas que han ido iniciándose y finalizando de manera lineal:

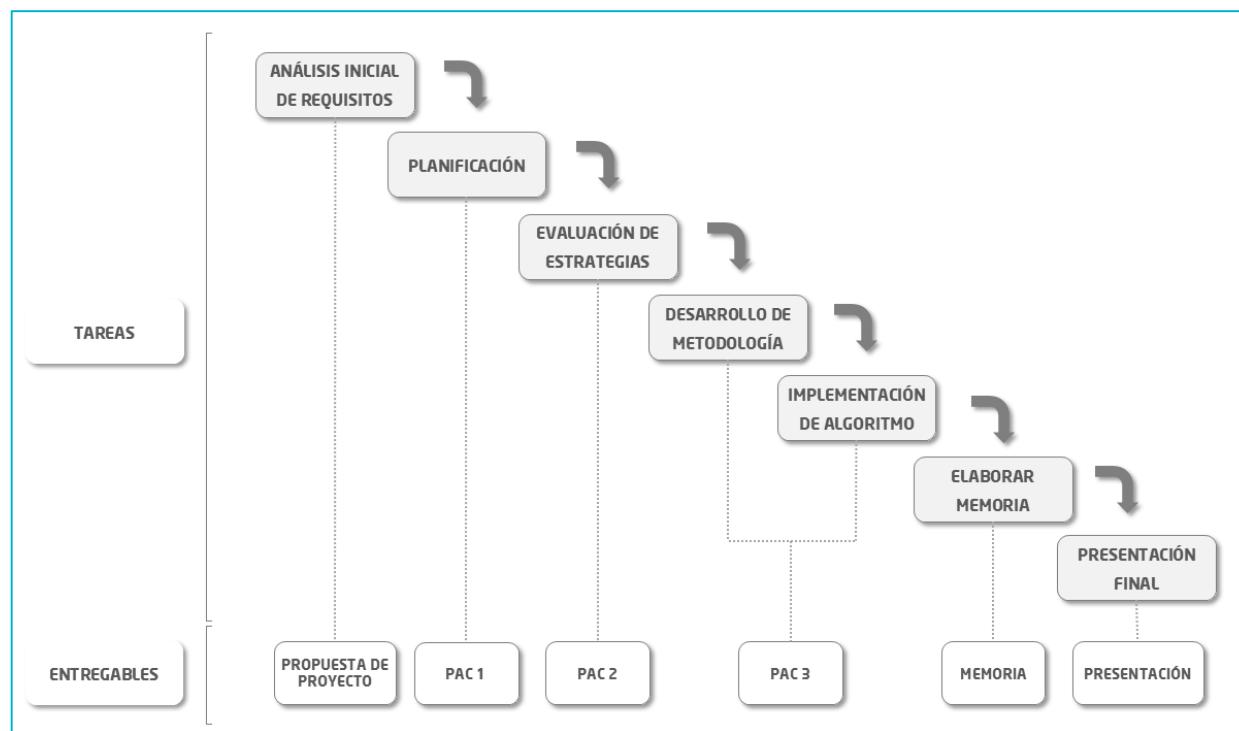


Figura 4 · Metodología empleada en la elaboración del TFG

Según este enfoque planteado, el plan de trabajo seguido es el que se detalla a continuación en el siguiente diagrama que incluye:

- La duración de cada fase incluyendo las fechas clave para el proyecto.
- Las tareas principales propias de cada fase.
- La duración de cada tarea.
- Entregables de cada fase definidos en el anterior apartado.

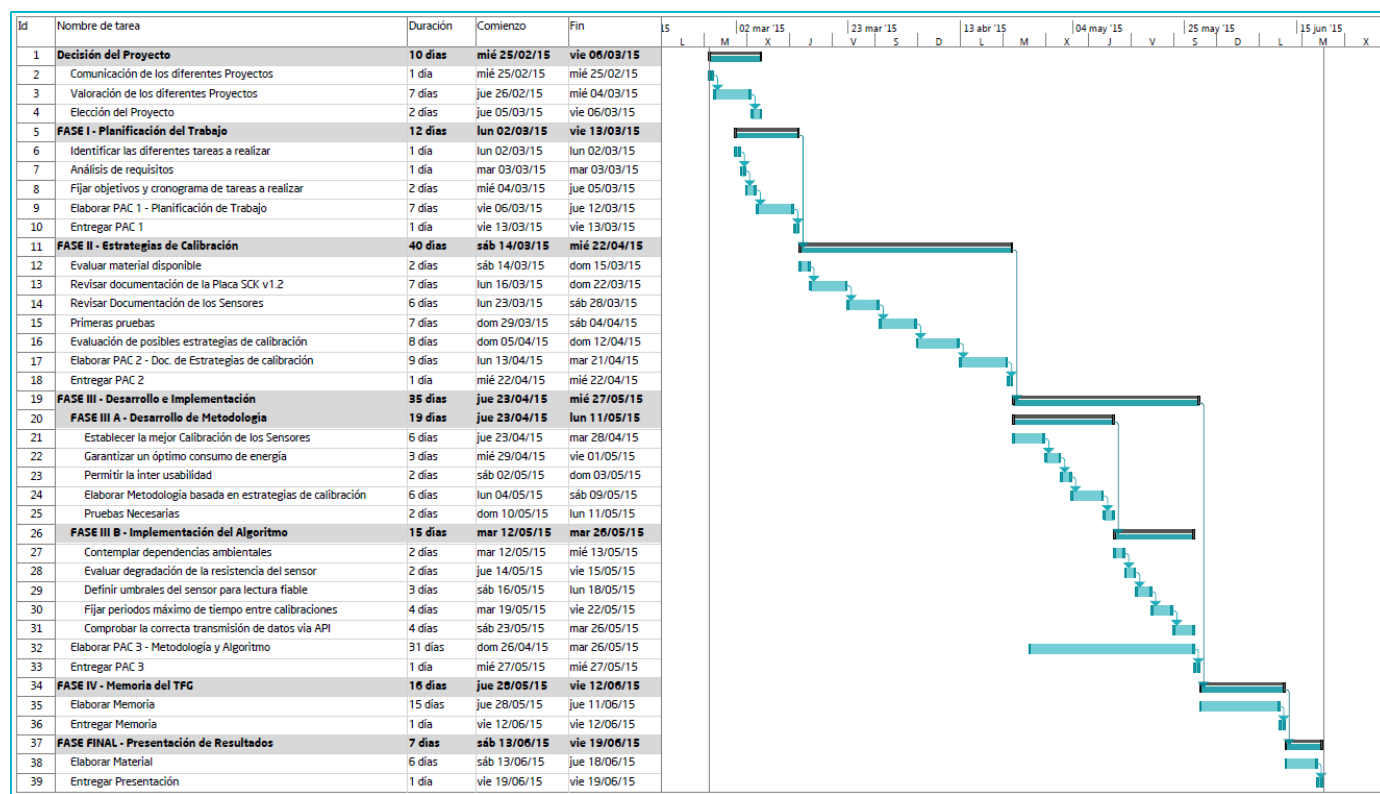


Figura 5 - Planificación seguida a lo largo del TFG

2.4. ENTREGAS PARCIALES

Las entregas puntuales de este Trabajo de fin de Grado han sido las que se detallan a continuación:

- **Propuesta de Proyecto:** mail con la propuesta de proyecto elegido de entre todas las posibles opciones tanto planteadas por el tutor como posibles proyectos propios.
- **Plan de Trabajo (PAC1):** documento con la motivación, alcance, objetivos y planificación del Trabajo de fin de Grado.
- **Estrategias de calibración (PAC2):** documento con las diferentes estrategias de calibración evaluadas para los sensores low cost de gases, temperatura y humedad que serán la base para desarrollar la metodología.
- **Metodología de calibración y algoritmo por código que la utilice (PAC3):** documento con la metodología de calibración de los sensores desarrollada y también el algoritmo implementado que utilice dicha metodología, disponible a su vez en el repositorio público GitHub.

2.5. ENTREGABLES FINALES

- **Memoria:** documento con el detalle de todo el trabajo realizado a lo largo del proyecto y que contiene la
 - Portada.
 - Dedicatoria y agradecimientos.
 - Resumen.
 - Índice de contenidos y de imágenes.
 - Introducción.
 - Justificación de porqué el Trabajo de fin de Grado elegido y contexto en el cual se desarrolla.
 - Objetivos Generales y específicos.
 - Enfoque y metodología.
 - Planificación y entregables.
 - Conclusiones.
 - Glosario.
 - Referencias.
 - Documentación anexa.

- **Presentación:** material que será la síntesis del trabajo realizado y que permitirá tanto la evaluación del mismo como el planteamiento y aclaración de cualquier duda o consulta al respecto.

- **Auto-informe:** con la evaluación de las competencias transversales definidas en el grado:
 - Uso y aplicación de las TIC en el ámbito académico y profesional
 - Capacidad de comunicación en lengua extranjera
 - Capacidad para adaptarse a las tecnologías y futuros entornos
 - Capacidad para innovar y generar nuevas ideas

- **Código:** el código implementado en el calibrado de los sensores estará disponible en el repositorio público GitHub.

3. SENSORES MEDIOAMBIENTALES

A continuación trataremos los siguientes aspectos:

- Cuáles son las especificaciones técnicas y los rangos operacionales de los sensores.
- Cuál es el funcionamiento básico de los sensores para poder identificar las funciones asociadas implementadas en la versión de firmware sck_beta_v0_9.
- Qué proponen los Fabricantes en cuanto a calibrado de los sensores.
- Cuáles son los **factores fundamentales a tener en cuenta** a la hora de plantear y desarrollar la metodología de calibración.

3.1. MICS - 4514 CO & NO2 SENSOR

Funcionamiento del sensor

El funcionamiento es sencillo, el sensor está compuesto por dos películas sensibles compuestas por un óxido metálico con base de silicio, normalmente SnO₂, que al calentarse, cambian su conductividad eléctrica debido a los químicos que se depositan en la superficie lo que provoca que varíen sus resistencias eléctricas, analizando estos cambios de resistencia se pueden obtener los valores de concentración de cada gas.



Figura 6 - Imagen del Sensor MiCS – 4514

Los valores de concentración en partes por millón o ppm de CO y en partes por billón (partes *por* mil millones) o ppb de NO₂ en la atmósfera, se pueden obtener en base a la relación R_s/R_o , siendo R_s la resistencia del sensor y R_o la resistencia del sensor en el aire, ambos valores en $k\Omega$, tal y como se muestra a continuación,

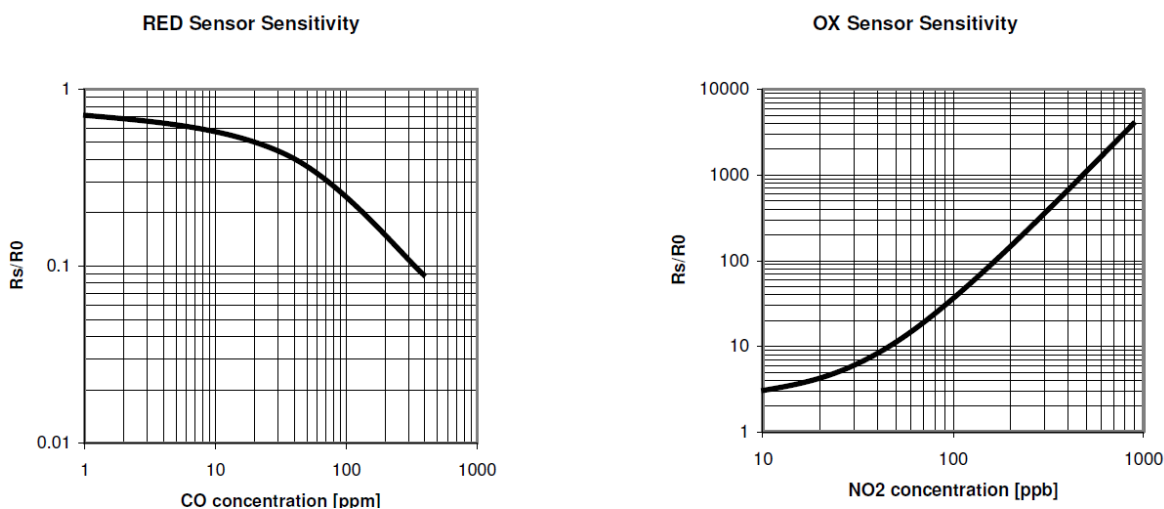


Figura 7 · Sensibilidad del Sensor MiCS – 4514



Para poder establecer una metodología de calibración es fundamental **usar como referencia las mediciones de las resistencias R_0 del MiCS-4514 y los valores de concentración de gases en ppm y ppb (R_s/R_0) tomados por el fabricante en condiciones de laboratorio.**

En la lectura de la resistencia R_s de cada gas, tanto para gases oxidantes (OXY) como el NO_2 , como para gases reductores (RED) como el CO, se usa una resistencia de carga R_L de 820Ω para cada sensor y se aplica una corriente continua de 5V de tensión y una frecuencia de 100.000 Hz tal y como se muestra a continuación,

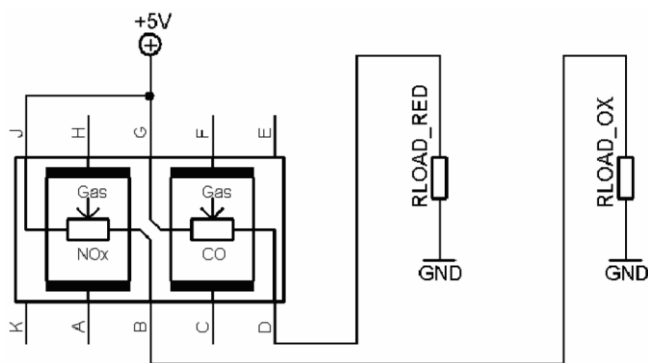


Figura 8 · Esquema del Circuito del Sensor MiCS-4514

Pin Number	
A	Rh1 OXY
B	Rs1 OXY
C	Rh1 RED
D	Rs1 RED
E	NC
F	Rh1 RED
G	Rs1 RED
H	Rh1 OXY
J	Rs1 OXY
K	NC

Condiciones ambientales

Las condiciones ambientales influyen directamente sobre la sensibilidad y la resistencia de los sensores, por eso es recomendable que el sensor no esté expuesto a corrientes de aire que puedan alterar la temperatura necesaria para poder calentar su superficie, no exponerlo a temperaturas extremas ya que disminuye la sensibilidad en cada medición y por supuesto evitar el contacto directo con disolventes orgánicos, amoníaco, humo de tabaco y demás vapores que puedan afectar el correcto funcionamiento del sensor al depositarse químicos en alguna de las membranas sensibles provocando lecturas erróneas fuera de los rangos marcados por el fabricante.



Es muy importante **tener en cuenta las condiciones ambientales a las que se expone el sensor MICS-4514** para poder garantizar un correcto calibrado y por supuesto un óptimo funcionamiento.

Rango de Operación del Sensor

De igual modo, para la correcta operación del sensor, estos son los parámetros eléctricos marcados por el fabricante,

SENSOR DE CO	
Parámetro	Rango de Operación
Heating Power P_H	78 – 88 mW
Heating Voltage V_H	2.5 V
Heating Current I_H	34 mA
Heating Resistance R_H	66 – 82 Ω

Tabla 1 · Rango de Operación del Sensor de CO

SENSOR DE NO2	
Parámetro	Rango de Operación
Heating Power P_H	30 – 50 mW
Heating Voltage V_H	1.7 V
Heating Current I_H	26 mA
Heating Resistance R_H	59 – 73 Ω

Tabla 2 · Rango de Operación del Sensor de NO2

Según especificaciones del fabricante, la potencia nominal recomendada para el sensor RED de CO es P_H de 83 mW y P_H de 43 mW para el sensor OX de NO2.



Una parte fundamental de la metodología de calibración es **comprobar que el sensor MICS-4514 opera según las especificaciones técnicas marcadas por el fabricante.**

Por último, para poder comprobar el correcto funcionamiento del sensor, y como base para poder fijar una metodología de calibrado del mismo, resulta clave conocer cuál es la sensibilidad de cada sensor así como el rango de valores que pueden medir, que son los mostrados a continuación,

SENSOR DE CO		
Característica	Valores	Condiciones ambientales durante la medición
CO Detection Range FS	1 – 1000 ppm	Mínimo -30 °C y máximo 86 °C de Temperatura y una Humedad Relativa entre 5 - 95 %
Resistencia del Sensor en el aire R₀	100 – 1000 KΩ	23 ± 5 °C y 50 ± 10 % RH
Factor de Sensibilidad S_R	1.8 – 6.6	R _s en una concentración de CO de 60 ppm dividido por R _s en 200 ppm a 23 ± 5 °C y 50 ± 10 % RH
Sensibilidad al CO en 60 ppm S₆₀	2 – 18	R _s en aire dividido entre R _s en una concentración de CO de 60 ppm a 23 ± 5 °C y 50 ± 10 % RH

Tabla 3 · Especificaciones del Sensor de CO

SENSOR DE NO2		
Característica	Valores	Condiciones ambientales durante la medición
NO2 Detection Range FS	0.05 – 5 ppm	Mínimo -30 °C y máximo 86 °C de Temperatura y una Humedad Relativa entre 5 - 95 %
Resistencia del Sensor en el aire R₀	0.8 – 8 KΩ	23 ± 5 °C y 50 ± 10 % RH
Factor de Sensibilidad S_R	6 – 100	R _s en una concentración de NO2 de 0.25 ppm dividido por R _s en aire a 23 ± 5 °C y ≤ 5 % RH

Tabla 4 · Especificaciones del Sensor de NO2



Debido a la complejidad de los sensores de gases semiconductores, que combinan variables termales, químicas y efectos eléctricos, una posible estrategia a la hora de establecer una metodología de calibración, sería la de **monitorizar los cambios en la concentración de gas más que centrarse en mediciones absolutas** tomando siempre como referencia los valores en cuanto a sensibilidad y rangos de operación marcados por el fabricante.

3.2. HTU21D(F) RH/T SENSOR

Funcionamiento del sensor

Este sensor es completamente digital y proporciona una señal de salida lineal y calibrada basada en el protocolo I²C con una resolución de entre 8 y 12 bits para la Humedad relativa y de entre 12 y 14 bits para la temperatura.

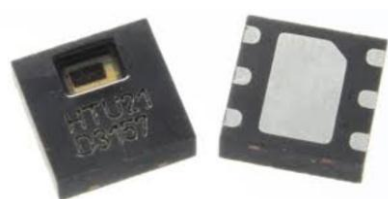


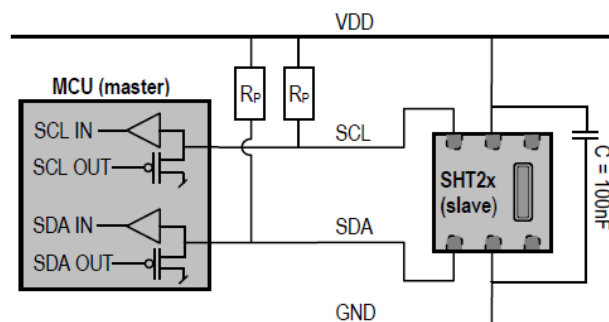
Figura 9 · Imagen del Sensor SHT21

Independientemente de la resolución utilizada, los valores de Temperatura y Humedad relativa a partir de la señal de salida se obtienen aplicando las formulas siguientes,

$$Temp = -46.85 + 175.72 \times \frac{S_{Temp}}{2^{16}} \quad RH = -6 + 125 \times \frac{S_{RH}}{2^{16}}$$

Figura 10 · Rango de Operación del Sensor SHT21

Para el correcto funcionamiento del sensor se recomienda aplicar una tensión entre los 2.1 V y 3.6 V ($\pm 3V$ recomendados).



Pin Number	
SDA	Serial Data
VSS	Ground
VDD	Supply Voltage
SCL	Serial Clock

Figura 11 · Esquema del Circuito del Sensor SHT21

Condiciones ambientales

Las exposiciones prolongadas a condiciones ambientales extremas aceleran el desgaste y generan lecturas poco precisas, sobre todo con valores de Humedad relativa inferiores al 10% y superiores al 80% y Temperaturas por debajo de los 5 °C y por encima de los 80 °C. Una vez dentro del rango normal de operación, el propio sensor vuelve sólo al estado calibrado.

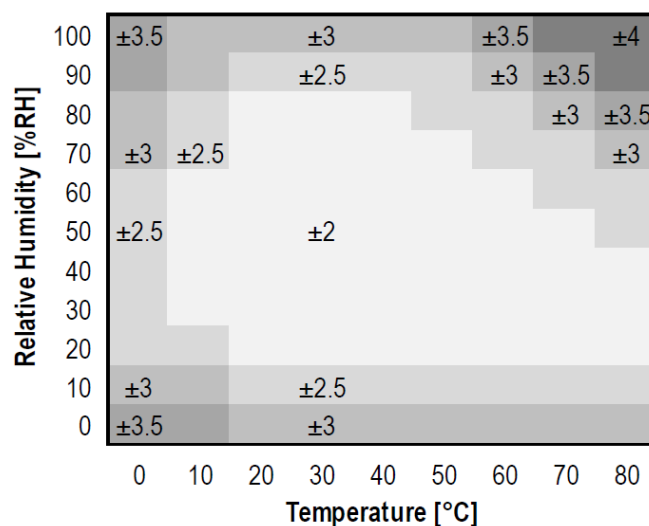


Figura 12 · Precisión del Sensor SHT21 según las condiciones ambientales

De igual modo, una exposición prolongada a la luz solar o a radiación ultravioleta, a disolventes químicos, etc. acortará la vida útil del sensor.



Es muy importante **tener en cuenta las condiciones ambientales a las que se expone el sensor SHT21** para poder garantizar un correcto calibrado y por supuesto un óptimo funcionamiento.

Rango de Operación del Sensor

El sensor opera de manera estable dentro de los rangos considerados normales por el fabricante tal y como se muestra a continuación,

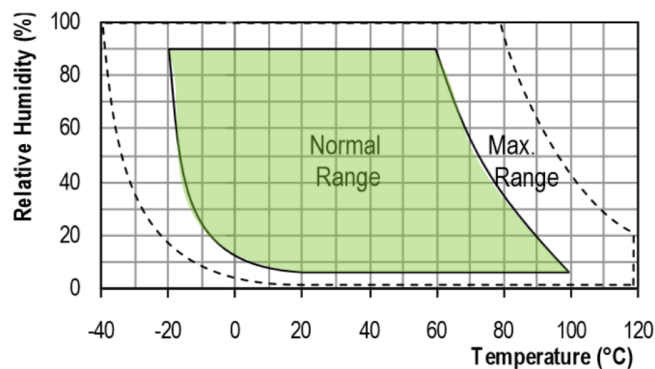


Figura 13 · Rango de Operación del Sensor SHT21

De igual modo, las características eléctricas del sensor son las marcadas por el fabricante, teniendo en cuenta que cualquier otro valor fuera de los rangos operacionales puede ser la causa de un funcionamiento inapropiado del sensor,

Parámetro	Estado	Rango de Operación
Supply Voltage VDD	-	2.1 – 3.6 V
Supply Current IDD	Sleep mode	0.15 – 0.4 μ A
	Measuring	200 – 330 μ A
Power Disipation para VDD=3V y T < 60°C	Sleep mode	0.5 – 1.2 μ W
	Measuring	0.6 – 1 mW
	Average 8 bit	3.2 μ W
Heater para VDD=3V	-	5.5 mW y $\Delta T = +0.5 -1.5^{\circ}C$

Tabla 5 · Rango de Operación del Sensor SHT21



Una parte fundamental de la metodología de calibración es **comprobar que el sensor SHT21 opera según las especificaciones técnicas marcadas por el fabricante.**

Calibration Certification

A diferencia del sensor de gases que debe ser calibrado regularmente, el sensor SHT21 no necesita ser calibrado siempre que opere en las condiciones consideradas normales por el fabricante tal y como indica Sensirion en el certificado que confirma que el sensor ha sido calibrado de acuerdo con las especificaciones y en base al estándar ISO/IEC 17025.



Figura 14 · SHT21 Sensor Calibration Certification

4. ESTRATEGIAS DE CALIBRACIÓN

Las estrategias de calibración muestran básicamente los **factores fundamentales a tener en cuenta** a la hora de plantear y desarrollar una metodología de calibración, en concreto:

- Cómo se pueden obtener los valores de concentración de gases en partes por millón o ppm y en partes por billón o ppb en vez de mostrar lecturas periódicas del valor R_s en $k\Omega$, que es la resistencia que ofrece el sensor de gases.
- Cómo se puede resolver el problema del sensor de gases que además de un calibrado inicial, con el paso del tiempo necesita ser recalibrado de nuevo ya que las propiedades de sus componentes van cambiando principalmente por la sobreexposición ambiental.
- Cuál son las funciones asociadas al funcionamiento del sensor e implementadas en la versión de firmware `sck_beta_v0_9`.
- Cuándo se realiza la validación de los datos recogidos por los sensores para poder localizar el momento adecuado en el que implementar el calibrado.
- Cómo utilizar la sensibilidad del sensor para plantear una medición basada en cambios en la concentración de gases en vez de en medidas de valores absolutos.

4.1. VALIDACIÓN Y LECTURA DE DATOS DE LOS SENSORES

A continuación podemos observar el momento en el que se produce la lectura y validación de datos tras la inicialización de los sensores y que se será un punto adecuado donde incluir las rutinas de calibrado,

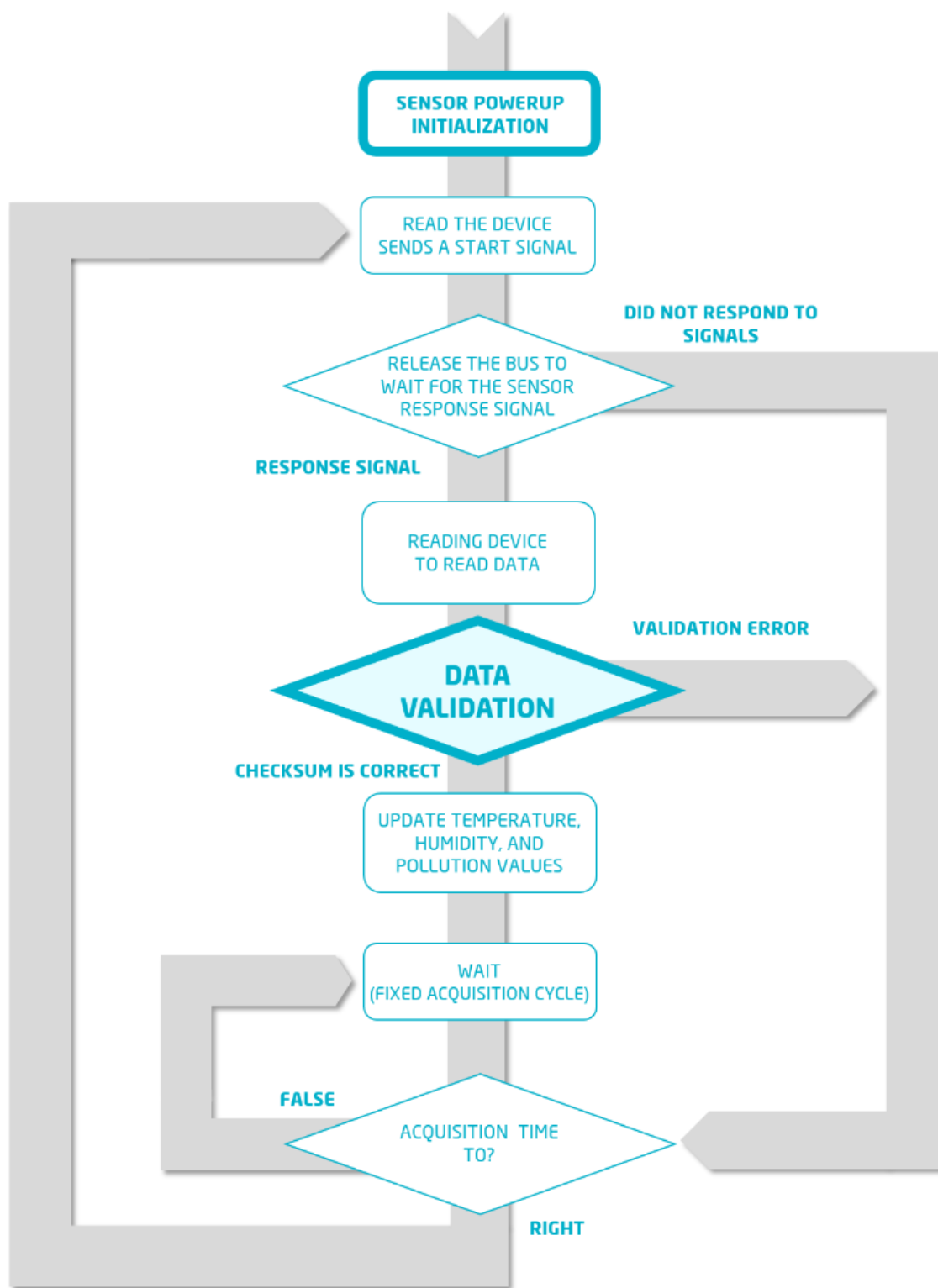
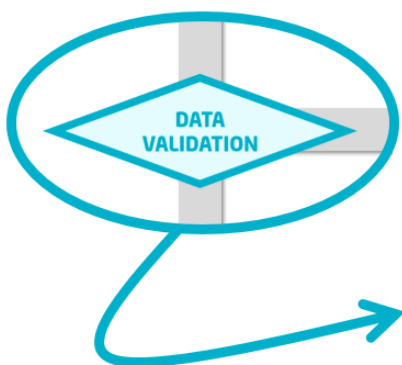


Figura 15 · Validación de Datos de los Sensores

Las funciones incluidas actualmente en el firmware sck_beta_v0_9 que está implicadas en la lectura y validación de datos son las que se muestran a continuación,

Sensor de gases CO y NO2



```

253 }
254
255 float SCKAmbient::readRL(byte device)
256 {
257     #if F_CPU == 8000000
258     return (kr1*base_.readMCP(MCP1, device + 6)); // Returns Resistance (Ohms)
259     #else
260     return (kr1*base_.readMCP(MCP1, device)); // Returns Resistance (Ohms)
261     #endif
262 }

```

```

402     #endif
403 }
404 }
405
406 void SCKAmbient::getMICS(){
407
408     // Charging tension heaters
409     heat(MICS_5525, 32); //Corriente en mA
410     heat(MICS_2710, 26); //Corriente en mA
411
412     RsCO = readMICS(MICS_5525);
413     RsNO2 = readMICS(MICS_2710);
414
415 }
416
417 #if F_CPU == 8000000
418 uint16_t S
419 uint16_t
420 #endif

```

```

338 }
339
340 float SCKAmbient::readRs(byte device)
341 {
342     byte Sensor = S0;
343     float VMICS = VMIC0;
344     if (device == MICS_2710) (Sensor = S1; VMICS = VMIC1;);
345     float RL = readRL(device); //Ohm
346     float VL = ((float)base_.average(Sensor)*Vcc)/1023; //mV
347     if (VL > VMICS) VL = VMICS;
348     float Rs = ((VMICS-VL)/VL)*RL; //Ohm
349     #if debugAmbient
350         if (device == MICS_5525) Serial.print("MICS5525 Rs: ");
351         else Serial.print("MICS2710 Rs: ");
352         Serial.print(VL);
353         Serial.print(" mV, ");
354         Serial.print(Rs);
355         Serial.println(" Ohm");
356     #endif
357     return Rs;
358 }

```

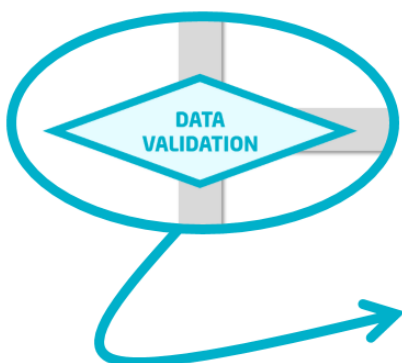
```

357     return Rs;
358 }
359
360 float SCKAmbient::readMICS(byte device)
361 {
362     float Rs = readRs(device);
363     float RL = readRL(device); //Ohm
364
365     // Charging impedance correction
366     if ((Rs <= (RL - 1000)) || (Rs >= (RL + 1000)))
367     {
368         if (Rs < 2000) writeRL(device, 2000);
369         else writeRL(device, Rs);
370         delay(100);
371         Rs = readRs(device);
372     }
373     return Rs;
374 }
375
376 void SCKAmbient::GasSensor(boolean active)
377 {

```

Figura 16 · Funciones utilizadas por el Sensor MICS-4514 (sck_beta_v0_9)

Sensor de Temperatura y Humedad



```

416
417 #if F_CPU == 8000000
418 uint16_t SCKAmbient::readSHT21(uint8_t type){
419     uint16_t DATA = 0;
420     Wire.beginTransmission(Temperature);
421     Wire.write(type);
422     Wire.endTransmission();
423     Wire.requestFrom(Temperature,2);
424     unsigned long time = millis();
425     while (!Wire.available()) if ((millis() - time)>500) return 0x00;
426     DATA = Wire.read()<<8;
427     while (!Wire.available());
428     DATA = (DATA|Wire.read());
429     DATA &= ~0x0003;
430     return DATA;
431 }
432
433 void SCKAmbient::getSHT21()
434 {
435     lastTemperature = readSHT21(0xE3); // RAW DATA for calibration in platform
436     lastHumidity = readSHT21(0xE5); // RAW DATA for calibration in platform
437     #if debugAmbient
438         Serial.print("SHT21: ");
439         Serial.print("Temperature: ");
440         Serial.print(lastTemperature/10.);
441         Serial.print(" C, Humidity: ");
442         Serial.print(lastHumidity/10.);
443         Serial.println(" %");
444     #endif

```

```

524 #define TIMEOUT 10000
525
526 boolean SCKAmbient::getDHT22()
527 {
528     // Read Values
529     int rv = DhtRead(IO3);
530     if (rv != true)
531     {
532         lastHumidity = DHTLIB_INVALID_VALUE; // invalid value, or is NaN preferred?
533         lastTemperature = DHTLIB_INVALID_VALUE; // invalid value
534         return rv;
535     }
536
537     // Convert and Store
538     lastHumidity = word(bits[0], bits[1]);
539
540     if (bits[2] & 0x80) // negative temperature
541     {
542         lastTemperature = word(bits[2]&0x7F, bits[3]);
543         lastTemperature *= -1.0;
544     }
545     else
546     {
547         lastTemperature = word(bits[2], bits[3]);
548     }
549
550     // Test Checksum
551     uint8_t sum = bits[0] + bits[1] + bits[2] + bits[3];
552     if (bits[4] != sum) return false;
553     if ((lastTemperature == 0)&&(lastHumidity == 0))return false;
554     return true;
555 }

```

Figura 17 · Funciones utilizadas por el Sensor SHT21 (sck_beta_v0_9)

4.2. SENSOR CO & NO2

- Usar como referencia las mediciones de las resistencias R_o de los sensores y los valores de concentración de gases en ppm y ppb (R_s/R_o) tomados por el fabricante en condiciones de laboratorio.

Es fundamental usar como referencia las mediciones de la concentración de cada gas tomadas en condiciones de laboratorio, 25°C de temperatura, una humedad relativa del 40% y una resistencia base en el aire o R_o con valores entre 0.8 y 8 K Ω para el sensor de NO₂ y de entre 100 y 1000 K Ω para el sensor de CO, medidas también en condiciones ambientales controladas de 23 ± 5 °C de temperatura, y una humedad relativa de 50 ± 10% para el sensor RED (CO) y de ≤ 5% para el sensor OXY (NO₂).

- Tener en cuenta las condiciones ambientales a las que se expone el sensor de gases.

Las condiciones ambientales de temperatura y humedad son valores que se pueden obtener gracias al sensor SHT21. La humedad en el ambiente influye directamente en la resistencia base del sensor, ya que la capa sensible absorbe el agua y actúa como agente reductor. Por ejemplo, por debajo de una Humedad relativa del 20% se pueden producir lecturas poco fiables tal y como se muestra a continuación,

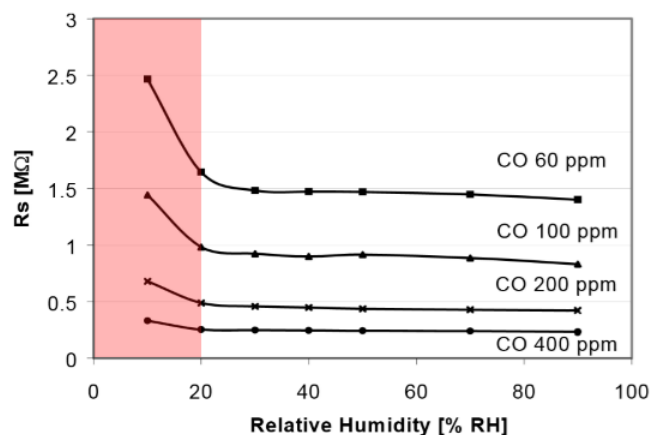


Figura 18 · Relación entre R_s y la Humedad Relativa

Por lo tanto, fuera de los rangos de operación recomendados por el fabricante, entre un 15% y un 95 % de Humedad relativa, sería necesario aplicar algún factor de compensación en la medición. De igual modo, la sensibilidad del sensor varía dependiendo de la temperatura, tal y como se puede observar a continuación, para 4 concentraciones de gas de 60, 100, 200 y 400 ppm de CO, una temperatura de entre 0 y 50 °C,

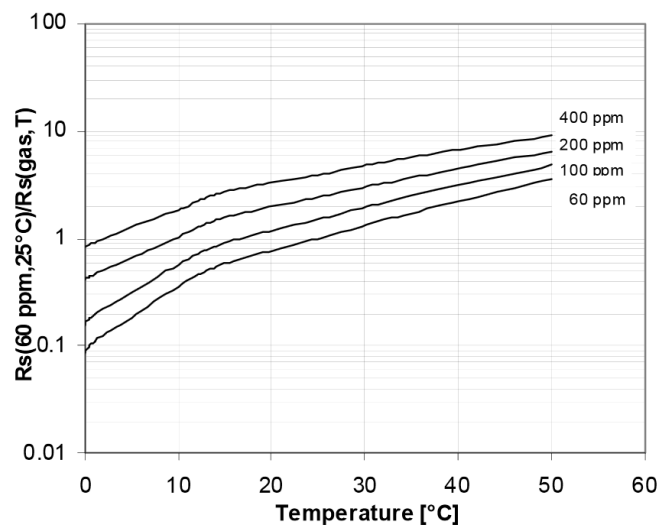


Figura 19 · Relación entre Rs y la Temperatura

Por eso es importante no operar con el sensor fuera de los rangos recomendados de operación marcados por el fabricante,

Parámetro	Rango de Temperatura Ambiental [Mínima – Máxima]
Ambient Operating Range	-30 – 85 °C
Valor Storage Temperature Range	-40 – 120 °C

Tabla 6 · Rango de Temperatura Ambiental del Sensor de Gases

- **Comprobar que el sensor no opera fuera de los rangos marcados según las especificaciones del fabricante.**

Para garantizar una correcta calibración de los sensores y para evaluar si es necesario calibrar el sensor es necesario comprobar que el sensor opera dentro de los rangos marcados por el fabricante en cuanto a potencia, voltaje y corriente básicamente. Es importante también tener en cuenta que para alcanzar las temperaturas óptimas de la superficie de los sensores para lograr una mejor medición, 360°C en el caso del sensor de CO y 220°C en para el sensor de NO2 con una temperatura ambiente de 20°C, es necesario dejar pasar un tiempo razonable entre medición y medición, aproximadamente unos 10 minutos. En la actual versión de firmware y para placas Atmel ATMEGA32U4, en el modo económico, este valor es de 6 minutos, tal y como se muestra a continuación,

```

725     }
726     base_.timerInitialize();
//
727     #endif
728     if (((millis()-timeMICS)<=6*minute)|| (mode!=ECONOMIC)) //6 minutes
729     {
730         #if F_CPU == 8000000
731             #endif

```

Figura 20 · Tiempo establecido entre medición y medición (sck_beta_v0_9)

- **Monitorizar los cambios en la concentración de gas más que centrarse en mediciones absolutas.**

Debido a que la resistencia puede cambiar considerablemente de un sensor a otro y depende también de las condiciones ambientales en el momento de realizar la medición, podría monitorizarse la sensibilidad y los cambios en la concentración de gases en vez de valores absolutos, para ello se tendrían en cuenta los cambios de la resistencia del sensor R_s y la resistencia base R_o de la siguiente manera $S = (R_s - R_o)/R_o$.

- **Aplicar las técnicas de calibración propuestas por el fabricante**

Puesto que la respuesta del sensor al CO no es lineal y muestra grandes cambios en pequeñas concentraciones de gas tal y como se muestra a continuación,

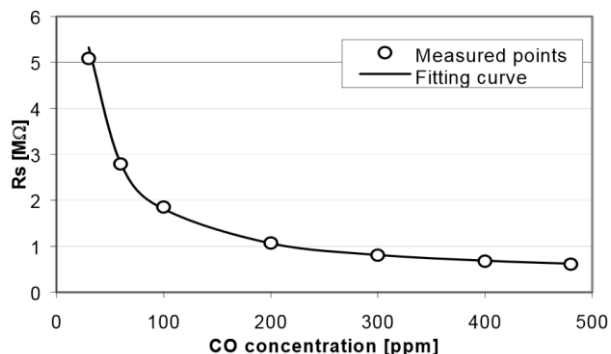


Figura 21 · Curva que muestra la relación en la concentración de CO en ppm y R_s (23°C y 50%RH)

Sería posible calibrar el sensor utilizando la dependencia entre la concentración de gas y R_s aplicando la siguiente función,

$$R_s = a + b/CO$$

donde a representa la resistencia en niveles infinitos de concentración de CO y b sería la variación de R_s debido a la concentración de gas. Tomando como equivalentes una concentración del 100% y la concentración existente en el punto con 1000 ppm, la concentración de CO podría ser calculada usando la siguiente fórmula,

$$CO = b/(Rs-a)$$

La derivada de b y de la respuesta del sensor pueden obtenerse midiendo la respuesta del sensor en dos puntos distintos, obteniendo con ello un valor de nivel de CO dentro de un rango cuyo margen de error es inferior al 5%.

Dependiendo de las condiciones ambientales a las que se expone el sensor y de los valores registrados, podría plantearse realizar un calibrado del sensor con una periodicidad mensual.

4.3. SENSOR RH/T

- **Tener en cuenta las condiciones ambientales a las que se expone el sensor.**

La lectura de Humedad relativa depende directamente de la temperatura, por eso, es muy importante mantener el sensor a la misma temperatura que el aire del que se realiza la medición.

Para evitar lecturas poco exactas, es necesario tener en cuenta los valores tipo y máximos de precisión marcados por el fabricante a una temperatura de 25 °C tal y como se muestra a continuación,

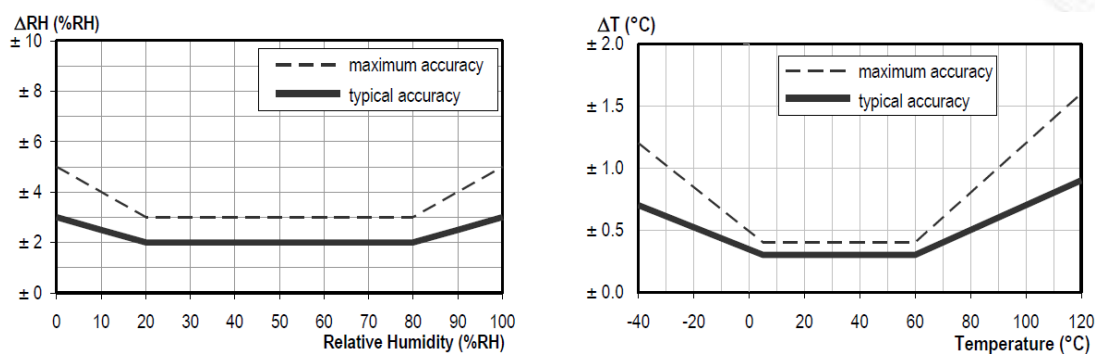


Figura 22 · Precisión del Sensor SHT21 según las condiciones ambientales

También es importante no operar con el sensor fuera de los rangos de Temperatura y Humedad relativa marcados por el fabricante,

Parámetro	Rangos de Temperatura y Humedad Relativa [Mínimo – Máximo]
Ambient Operating Range	-40 – 125 °C y entre 0 – 100 % RH
Storage Temperature Conditions	-10 – 50 °C y entre 20 – 60 % RH

Tabla 7 · Rangos de Temperatura y Humedad Relativa

También existe una desviación anual en los valores medidos que es menor al 0.25 % para el sensor de humedad y menor a 0.02 °C para el sensor de temperatura, que hay que tener en cuenta para poder establecer valores compensatorios o simplemente para corregir esa desviación.

- **Comprobar que el sensor no opera fuera de los rangos marcados según las especificaciones del fabricante.**

Para evitar lecturas poco fiables provocadas por un calentamiento excesivo del propio sensor, es necesario mantener la temperatura que emite por debajo de los 0.1°C, para ello, además de evitar manipular la placa de smartcitizen montando componentes en las proximidades del sensor, es recomendable no mantener activo el SHT21 más del 10% del tiempo, lo que equivale a dos lecturas por segundo con una resolución de 12 bits.

5. METODOLOGÍA DE CALIBRADO

5.1. CONSIDERACIONES PREVIAS

Concentración de CO en ppm

Para poder obtener los valores de concentración en partes por millón o ppm de CO en la atmósfera, es necesario tener en cuenta la relación R_s/R_o , siendo R_s la resistencia del sensor y R_o la resistencia del sensor en el aire, ambos valores en $k\Omega$, tal y como el fabricante muestra en las especificaciones del sensor,

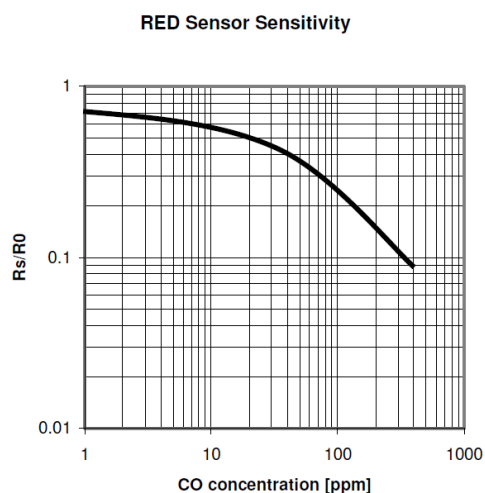


Figura 23 · Función de concentración de CO en ppm en base a R_s/R_o

Valores medidos en condiciones de laboratorio a 25°C de temperatura y con una humedad relativa del 40%.

R_o se ha establecido por defecto en 750 $k\Omega$ en la versión `sck_beta_v0_9` del firmware, valor que está dentro del rango fijado por el fabricante, entre 100 y 1000 $k\Omega$ para unas condiciones ambientales de 23 ± 5 °C y 50 ± 10 % RH,

```

55
56 // MICS (Gas Sensors) Ro Default Value (Ohm)
57 float RoCO = 750000;
58 float RoNO2 = 2200;
59

```

Figura 24 · Valores de R_o para CO en `sck_beta_v0_9`

Concentración de NO2 en ppb

De igual modo, para poder obtener los valores de concentración en partes por billón o ppb de NO2 en la atmósfera, es necesario tener en cuenta la relación R_s/R_o , siendo R_s la resistencia del sensor y R_o la resistencia del sensor en el aire, ambos valores en $k\Omega$, tal y como el fabricante muestra en las especificaciones del sensor,

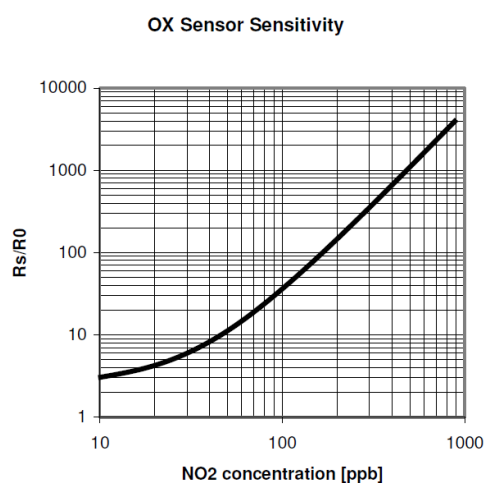


Figura 25 · Función de concentración de NO2 en ppb en base a R_s/R_o

Valores medidos en condiciones de laboratorio a 25°C de temperatura y con una humedad relativa del 40%.

R_o se ha establecido por defecto en 2.2 $k\Omega$ en la versión `sck_beta_v0_9` del firmware, valor que está dentro del rango fijado por el fabricante, entre 0.8 y 8 $k\Omega$ para unas condiciones ambientales de $23 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ y $\leq 5 \text{ \% RH}$,

```

56 // MICS (Gas Sensors) Ro Default Value (Ohm)
57 float RoCO = 750000;
58 float RoNO2 = 2200;
59

```

Figura 26 · Valores de R_o para NO2 en `sck_beta_v0_9`



El primer paso para calibrar el sensor de gases es **mostrar la concentración de CO en partes por millón o ppm** y **la concentración de NO2 en partes por billón o ppb** en vez de en KΩ.

Dependencia del Sensor de CO a las condiciones medioambientales

Según especificaciones del fabricante, en los sensores basados en semiconductores de óxido metálico la resistencia del sensor varía dependiendo de las condiciones ambientales sobretodo de temperatura, ya que se puede ver claramente cómo la resistencia disminuye a medida que aumenta la temperatura tal y como se muestra a continuación,

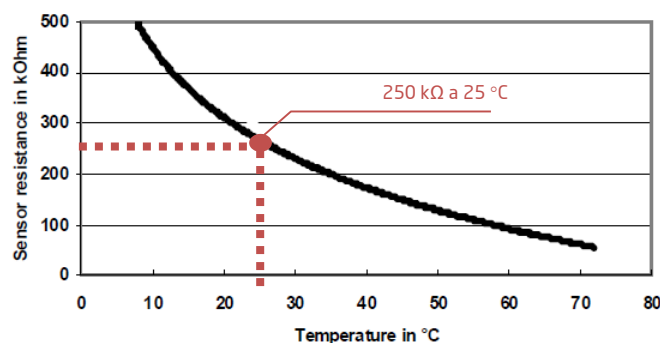


Figura 27 · Dependencia a la temperatura del Sensor de Gases

Para aplicar un Factor de Corrección que evite mostrar lecturas poco fiables debido a la dependencia a la Temperatura del Sensor de CO, el punto de referencia utilizado ha de ser el de 250 kOhms según las especificaciones del Fabricante tal y como se muestra en la figura anterior, ya que las mediciones fueron realizadas en condiciones de laboratorio a 25°C tal y como así se indica en la documentación de referencia.



Es fundamental aplicar un **factor de corrección** para compensar las posibles lecturas incorrectas de concentración de CO **debido a la dependencia a la temperatura** que presenta el sensor de gases.

Por otra parte, el sensor no muestra la misma dependencia a los cambios de humedad tal y como se demuestra en la siguiente gráfica que aporta el fabricante donde se puede observar la linealidad de valores siempre y cuando la humedad relativa no sea inferior al 20 % RH,

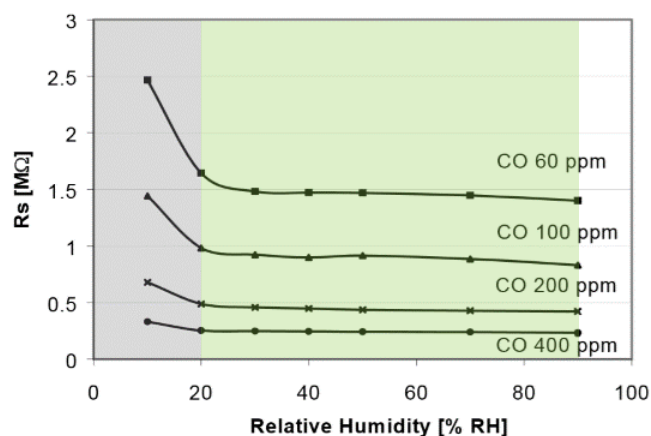


Figura 28 · Dependencia a la humedad del Sensor de Gases



No es necesario aplicar **ninguna compensación por los cambios de humedad relativa** en el ambiente siempre y cuando los valores se muevan dentro del rango de entre 15 % y 95 RH.

Dependencia del Sensor de NO2 a las condiciones medioambientales

El fabricante no ha proporcionado información sobre las variaciones de la resistencia del sensor de gases oxidantes, NO₂, montado en el kit de Smart Citizen v1.1, sí que lo hizo para las versiones anteriores del sensor, el sensor electroquímico EC4-20-NO₂, tal y como se muestra a continuación,

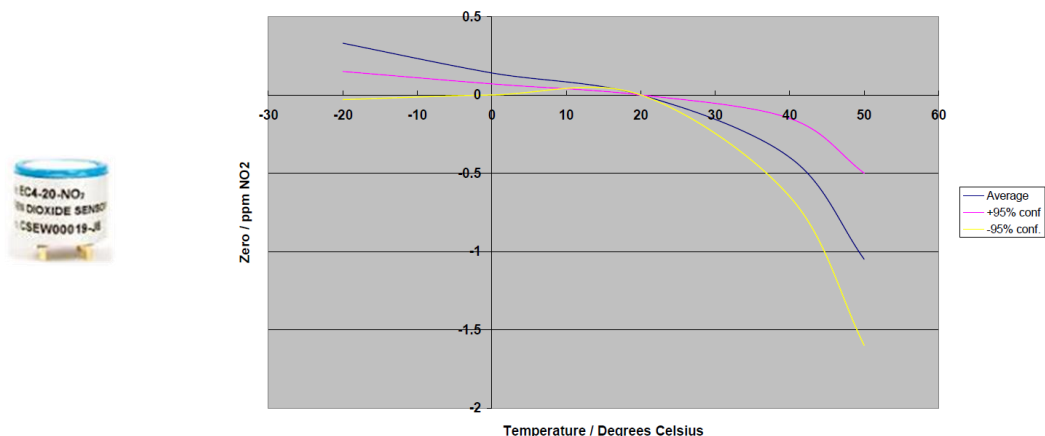


Figura 29 · Dependencia a la temperatura del sensor EC4-20-NO₂

A pesar de haber intentado obtener una aproximación manual mediante cambios de temperatura de ± 15 °C, aplicando directamente a la placa calor y frío a lo largo de varias horas, los valores obtenidos no son adecuados para obtener una función empleando el mismo método utilizado con el sensor de CO. En las gráficas que se muestran a continuación se puede observar una clara dependencia del sensor a los cambios de temperatura y una cierta función de aproximación marcada en verde, que podría ser aprovechada pero no sería exacta,

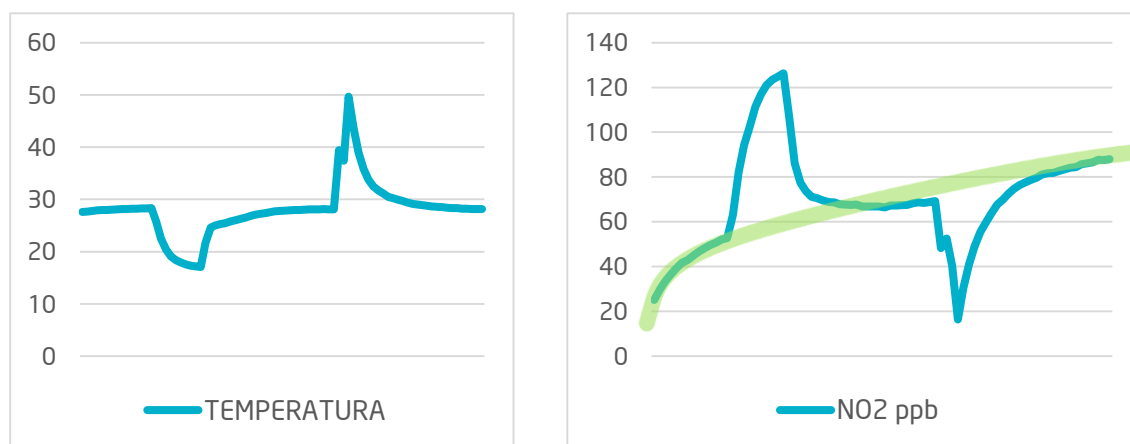


Figura 30 · Variaciones de Temperatura aplicadas y respuesta del Sensor de NO₂



Debido a la falta de especificaciones técnicas por parte del fabricante y puesto que la función obtenida no es lo suficientemente exacta ni precisa, se ha descartado aplicar un **factor de corrección** para compensar las posibles lecturas incorrectas de concentración de NO₂ debido a la dependencia a la temperatura que presenta el sensor de gases.

Margen de error del sensor de Temperatura y Humedad

Para el sensor de temperatura, el calibrado del fabricante garantiza un margen de error aceptable siempre y cuando nos movamos dentro de los rangos de Temperatura y Humedad relativa marcados por Sensirion. No obstante hay que tener en cuenta que existe una cierta pérdida de precisión en las lecturas que aporta el sensor fuera de los rangos mostrados a continuación

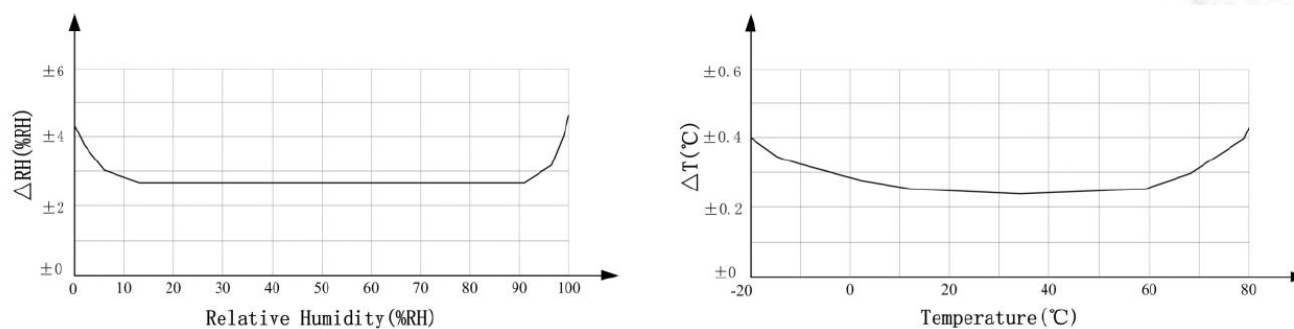


Figura 31 · Margen de error del Sensor de Temperatura y Humedad



La precisión del Sensor de Temperatura es aceptable siempre que las lecturas se realicen con una humedad relativa entre el 5% y 95%, y una temperatura entre los 20°C bajo cero y 80°C

5.2. OBJETIVOS

Los objetivos marcados en la calibración del sensor son los siguientes:

- Obtener mediante Gnuplot la función para la conversión de valores de resistencia del Sensor en valores de concentración de CO en partes por millón o ppm basándose en los datos y especificaciones del fabricante.
- Obtener mediante Gnuplot la función para la conversión de valores de resistencia del Sensor en valores de concentración de NO2 en partes por billón o ppb basándose en los datos y especificaciones del fabricante.
- Obtener mediante Gnuplot la función para implementar la corrección de lecturas incorrectas de CO debido a la dependencia a la temperatura del Sensor.

5.3. FUNCIÓN DE CONVERSIÓN · CONCENTRACIÓN DE CO

1. Obtener los valores de concentración de CO en ppm en base a R_s/R_o directamente de los datos que ofrece el fabricante (ver Figura 23),

Rs/Ro	CO (ppm)
0.75	1
0.7	2
0.65	3
0.61	4
0.56	10
0.5	20
0.45	30
0.4	40
0.37	50
0.35	60
0.30	70
0.28	80
0.27	90
0.24	100
0.14	200
0.11	300
0.089	400

Tabla 8 · Valores de concentración de CO en ppm

2. Guardarlos en un fichero de texto, **Valores_Funcion_Concentracion_GasCO.txt** , para usarlos después.
3. Por aproximación obtener primero la función de conversión y después ajustarla mediante Gnuplot 5.0:

```

gnuplot> f(x)= a+exp(b*x)+c/x+d*x
gnuplot> fit f(x) "C:/Valores_Funcion_Concentracion_GasCO.txt" via a,b,c,d
After 5 iterations the fit converged.
final sum of squares of residuals : 785.497
rel. change during last iteration : -5.44494e-008

degrees of freedom (FIT_NDF) : 13
rms of residuals (FIT_STDFIT) = sqrt(WSSR/ndf) : 7.77321
variance of residuals (reduced chisquare) = WSSR/ndf : 60.4228

Final set of parameters Asymptotic Standard Error
=====
a = -75.6518 +/- 13.54 (17.9%)
b = -143.735 +/- 5.343e+007 (3.717e+007%)
c = 41.1398 +/- 1.837 (4.466%)
d = 27.3354 +/- 19.45 (71.14%)

correlation matrix of the fit parameters:
      a      b      c      d
a      1.000
b      0.584 1.000
c     -0.936 -0.742 1.000
d     -0.963 -0.481 0.846 1.000
gnuplot> f(x)= -75.6518+exp(-143.735*x)+41.1398/x+27.3354*x
gnuplot> set xrange[0.01:1]
gnuplot> set yrange[1:1000]
gnuplot> set multiplot

```

4. Comprobar gráficamente que la función obtenida es correcta y coincide con los valores del fabricante,

```

multiplot> plot (f(x))
multiplot> plot "C:/Valores_Funcion_Concentracion_GasCO.txt"

```

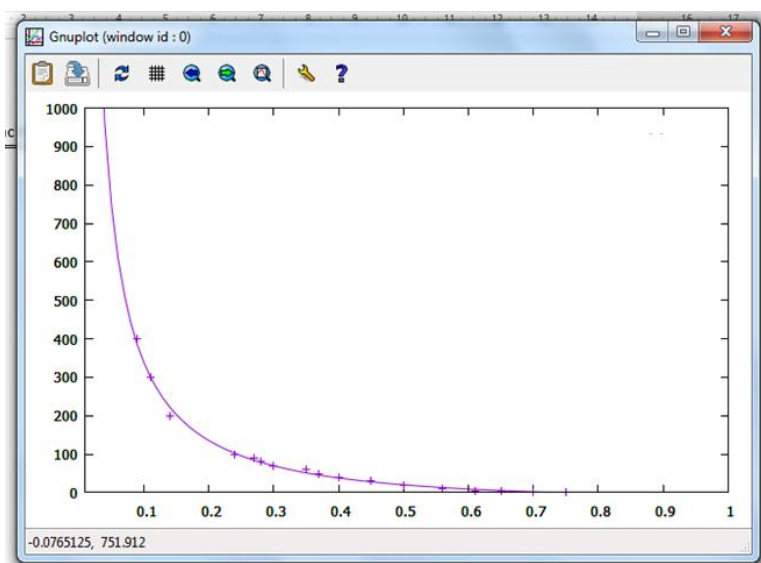


Figura 32 · Función para obtener la Concentración de CO en ppm

5.4. FUNCIÓN DE CONVERSIÓN · CONCENTRACIÓN DE NO₂

1. Obtener los valores de concentración de NO₂ en ppb en base a Rs/Ro directamente de los datos que ofrece el fabricante (ver Figura 25),

Rs/Ro	NO ₂ (ppb)
3	10
3.5	20
5	30
8	40
10.2	50
13	60
18	70
22	80
30	90
36	100
130	200
330	300
650	400
1100	500
1800	600

2300	700
3100	800
4000	900

Tabla 9 · Valores de concentración de NO2 en ppb

2. Guardarlos en un fichero de texto, **Valores_Funcion_Concentracion_GasNO2.txt** , para usarlos después.
3. Por aproximación obtener primero la función de conversión y después ajustarla mediante Gnuplot 5.0:

```
gnuplot> f(x)=a*x+b+c*x**d
gnuplot> fit f(x) "C:/Valores_Funcion_Concentracion_GasNO2.txt" via a,b,c,d
After 1 iterations the fit converged.
final sum of squares of residuals : 602.191
rel. change during last iteration : 0

degrees of freedom (FIT_NDF) : 14
rms of residuals (FIT_STDFIT) = sqrt(WSSR/ndf) : 6.55848
variance of residuals (reduced chisquare) = WSSR/ndf : 43.0136

Final set of parameters Asymptotic Standard Error
=====
a = 0.0473538 +/- 0.01112 (23.49%)
b = -60.4778 +/- 15.23 (25.18%)
c = 50.8654 +/- 10.17 (20%)
d = 0.327898 +/- 0.02787 (8.498%)

correlation matrix of the fit parameters:
      a      b      c      d
a      1.000
b     -0.862  1.000
c      0.908 -0.987  1.000
d     -0.942  0.973 -0.996  1.000
gnuplot> f(x)=0.0473538*x-60.4778+50.8654*x**0.327898
gnuplot> set xrange[2:5000]
gnuplot> set yrange[5:1000]
gnuplot> set multiplot
```

4. Comprobar gráficamente que la función obtenida es correcta y coincide con los valores del fabricante,

```
multiplot> plot (f(x))
multiplot> plot "C:/Valores_Funcion_Concentracion_GasNO2.txt"
```

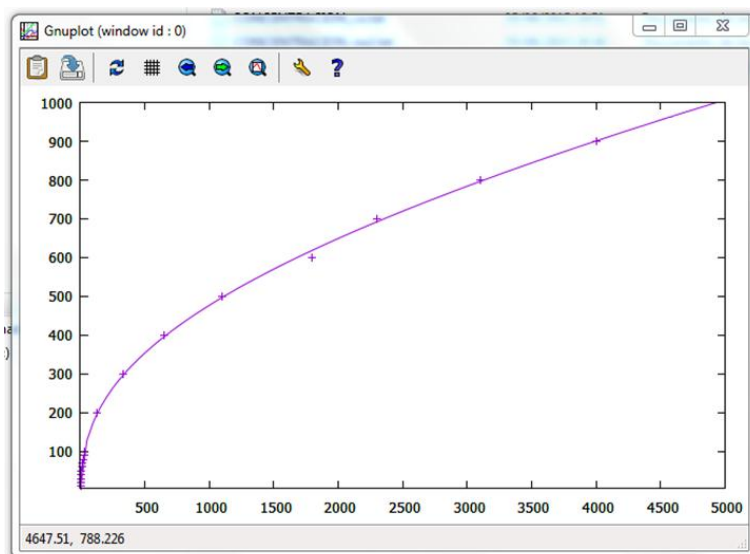


Figura 33 · Función para obtener la Concentración de NO2 en ppb

5.5. FUNCIÓN DE CORRECCIÓN PARA EL SENSOR DE CO

1. Obtener los valores que muestran la dependencia a la temperatura del Sensor de CO directamente de los datos que ofrece el fabricante (ver Figura 27),

°C	Rs (KΩ)
10	500
20	310
30	230
40	180
50	130
60	95
70	70

Tabla 10 · Valores de dependencia a la temperatura del Sensor de CO

2. Guardar los valores en un fichero de texto, **Valores_Funcion_DependenciaTemp_SensorGasCO.txt** para usarlos después.
3. Por aproximación obtener primero la función de dependencia y después ajustarla mediante Gnuplot 5.0:

```

gnuplot> f(x)=a/x+b+c*x
gnuplot> fit f(x) "C:/Valores_Funcion_DependenciaTemp_SensorGasCO.txt" via a,b,c
  After 7 iterations the fit converged.
  final sum of squares of residuals : 68.6307
  rel. change during last iteration : -9.72573e-013

  degrees of freedom      (FIT_NDF)                : 4
  rms of residuals        (FIT_STDFIT) = sqrt(WSSR/ndf) : 4.14218
  variance of residuals (reduced chisquare) = WSSR/ndf  : 17.1577

  Final set of parameters          Asymptotic Standard Error
  =====
  a          = 3313.44             +/- 108.6          (3.278%)
  b          = 194.11              +/- 9.895          (5.097%)
  c          = -2.51034            +/- 0.1524         (6.072%)

  correlation matrix of the fit parameters:
          a      b      c
  a          1.000
  b         -0.935  1.000
  c          0.858 -0.965  1.000
gnuplot> f(x)=3313.44/x+194.11-2.51*x
gnuplot> set xrange [0:80]
gnuplot> set yrange [0:550]
gnuplot> set multiplot
  
```

4. Comprobar gráficamente que la función obtenida es correcta y coincide con los valores del fabricante,

```

multiplot> plot (f(x))
multiplot> plot "C:/Valores_Funcion_DependenciaTemp_SensorGasCO.txt"
  
```

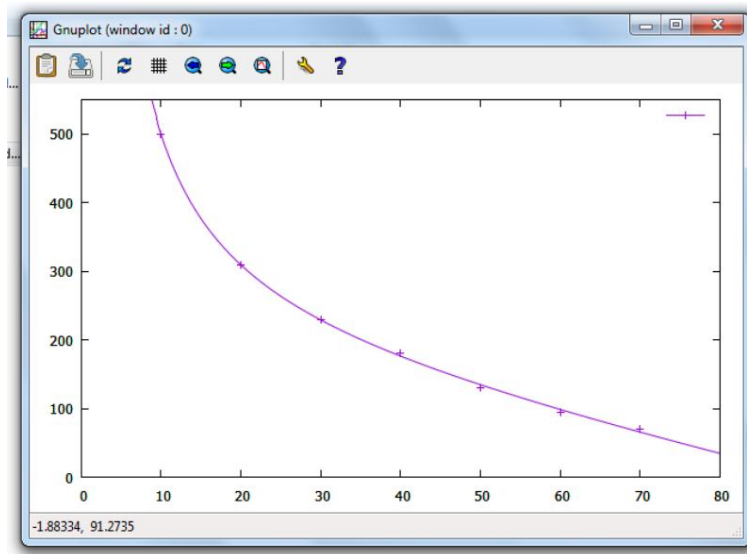


Figura 34 · Función para corregir la dependencia a la Temperatura del Sensor de CO

6. ALGORITMO

Una vez obtenidas las funciones, ya se puede implementar el algoritmo,

```

//////////////////////////////// CO Sensor Calibration //////////////////////////////////

float temperature;          /// Temperature in °C
float humidity;            /// Relative Humidity in %RH
float RsCO;                /// RsCO value
float RsNO2;               /// RsNO2 value
float RsCOTemp;           /// Rs value with temperature correction
float x;                   /// RsCO/R0CO Ratio
float y;                   /// RsNO2/R0NO2 Ratio
float COConcentration;     /// CO concentration in ppm
float COConcentrationTempDatasheet; /// CO concentration in ppm with Temperature correction (as per datasheet)
float tempCorrectionFactor; /// Temperature correction
float NO2Concentration;    /// NO2 concentration in ppb

//////////////////////////////// CO Sensor Calibration //////////////////////////////////

Serial.println(" ===== CO Sensor Calibration ===== ");
Serial.println("Sensor calibrated for temperatures between 10 a 70 Centigrade degrees and ");
Serial.println("Relative humidity from 5% to 95% RH as per datasheet ");

temperature=(float)(value[0])/1000;          /// Conversion to °C
humidity=(float)(value[1])/1000;            /// Conversion to %RH

Serial.print("Relative Humidity: ");
Serial.print(humidity);                    /// Relative Humidity in %RH
Serial.println(" %RH");

Serial.print("Temperature: ");
Serial.print(temperature);                /// Temperature in °C
Serial.println(" C");

RsCO=(float)(value[5]);                    /// RsCO in Ohms
x=RsCO/RoCO;                               /// Rs/Ro Ratio calculation
COConcentration=-75.6518+exp(-143.735*x)+41.1398/x+27.3354*x; /// Concentration Function (ppm)
Serial.print("CO Concentration in ppm without temperature correction: "); /// Concentration in ppm
Serial.print(COConcentration);
Serial.println(" ppm");

tempCorrectionFactor=250/(3313.44/temperature+194.11-2.51*temperature); /// Temperature Correction Function,
RsCOTemp=tempCorrectionFactor*RsCO;        /// Applying correction
x=RsCOTemp/RoCO;
COConcentrationTempDatasheet=-75.6518+exp(-143.735*x)+41.1398/x+27.3354*x; /// Concentration Function (ppm)
Serial.print("CO Concentration in ppm with temperature correction: "); /// Concentration in ppm
Serial.print(COConcentrationTempDatasheet);
Serial.println(" ppm");

RsNO2=(float)(value[6]);                   /// RsNO2 in Ohms
y=RsNO2/RoNO2;                             /// Rs/Ro Ratio calculation
NO2Concentration=0.0473538*y-60.4778+50.8654*pow(y,0.327898); /// Concentration Function (ppb)
Serial.print("NO2 Concentration in ppb without temperature correction: "); /// Concentration in ppb
Serial.print(NO2Concentration);
Serial.println(" ppb");
Serial.println(" ===== ");

////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
    
```

Para verificar que el código funciona correctamente se ha incluido en las librerías de la versión **sck_beta_v0_9** del firmware, en concreto en el archivo **SCKAmbient.cpp** en la llamada a la función **SCKAmbient::txDebug()** para poder aprovechar la definición global de variables y hacer una lectura de los valores de temperatura, humedad y resistencia, **value[0]**, **value[1]** y **value[5]** respectivamente.

Tras compilar el código, observamos que el funcionamiento es el esperado tal y como se puede observar a continuación,

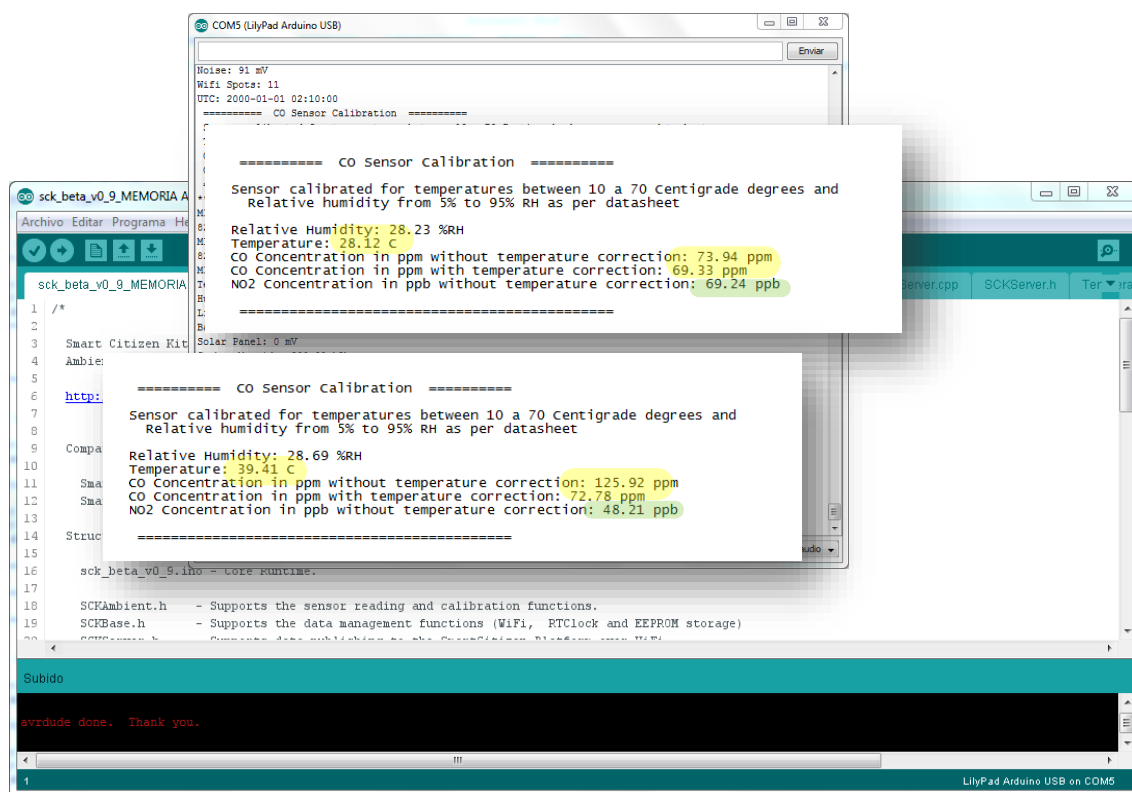


Figura 35 · Algoritmo implementado

Donde podemos comprobar que a pesar de la subida de temperatura de más de 10 °C, la concentración en ppm de CO con el factor de corrección aplicado varía menos de 3 puntos mientras que sin aplicar el factor de corrección, la concentración aumenta su valor más de un 40%.

Comprobamos también que aunque se realiza correctamente la conversión a ppb, es necesario aplicar un factor de corrección para mostrar lecturas correctas de NO2 sin esa dependencia a la temperatura del Sensor.

También podemos ver gráficamente que a pesar de haber sometido al sensor de gas a las variaciones de temperatura anteriormente comentadas, cambios de $\pm 15\text{ }^{\circ}\text{C}$, aplicando directamente a la placa calor y frío a lo largo de varias horas, la concentración de CO se mantiene estable y tan sólo presenta oscilaciones de $\pm 8\text{ ppm}$ y algún valor que se sale del rango pero que puede descartarse ya que se corresponde a los momentos en los que se aplicaron los cambios de temperatura,

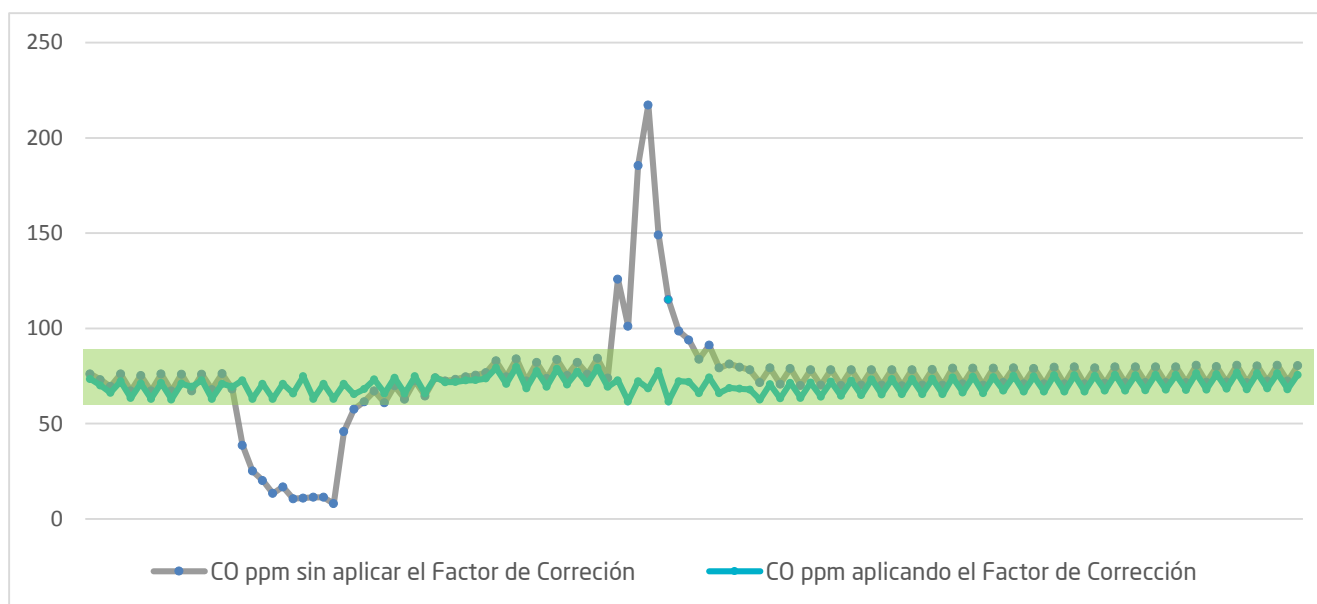


Figura 36 · Aplicación del Factor de Corrección del Sensor de CO

Este algoritmo se ha incorporado en una nueva versión de la librería **SCKAmbient.cpp** de la versión **sck_beta_v0_9** del firmware que está disponible a través del siguiente enlace:

- <https://github.com/jgmansilla/SCK-Ambient-Sensor-Calibration>



7. CONCLUSIONES

La principal conclusión extraída después de realizar este trabajo es que para poder establecer un correcto calibrado de los sensores medioambientales que incorporan las placas de los kits de Smart Citizen es necesario realizar una serie de análisis en las condiciones adecuadas, preferiblemente en laboratorio adaptado o bien con unos recursos y aparatos de medición precisos que sirvan para aportar valores exactos de referencia.

A modo de ejemplo y para ilustrar cuáles son las condiciones adecuadas para poder establecer una metodología apropiada de calibrado de sensores medioambientales, sirven las siguientes imágenes donde se puede observar cómo y con qué medios, Sonoma Technology, realizó un estudio en 2010 sobre sensores para la agencia gubernamental estadounidense US Environmental Protection Agency,



Figura 37 · Recursos empleados por Sonoma Technology para analizar Sensores medioambientales

Con aparatos de calibrado como los distribuidos por TELEDYNE que proporcionan unos modelos de medición altamente precisos,



Figura 38 · TELEDYNE Model T700 Dynamic Dilution Calibrator

Obviamente el coste de implementar una solución como esta para poder calibrar los sensores que incorpora el kit de Smart Citizen es claramente elevado, ya sólo el modelo de TELEDYNE supera los 9500 \$. Por eso, una posible alternativa sería la de establecer convenios de ayuda entre Smart Citizen y centros docentes o instituciones públicas o privadas que dispongan de los medios suficientes y que puedan verse beneficiados de acuerdos de cooperación que pueden seguir por ejemplo el modelo de colaboración que la UOC tiene actualmente con Smart Citizen.

No obstante, con este Trabajo de Fin de Grado, se ponen las bases para poder fijar una metodología completa de calibrado, partiendo por algo que es fundamental, por una parte poder mostrar la información que registran los sensores en valores y unidades útiles para poder trabajar con ellos después, y por otra parte marcar cuáles son los umbrales y márgenes de actuación en los que se mueven los sensores.

Ha servido por tanto todo el esfuerzo y dedicación para dar un paso más en este camino que las tecnologías cooperativas tienen por delante para poder seguir evolucionando, y para que los ciudadanos podamos ser realmente parte de las Ciudades inteligentes en las que ya comenzamos a vivir y con las que ya estamos interactuando.

8. RECURSOS Y REFERENCIAS

Podemos distinguir entre dos tipos de recursos utilizados, por un lado toda la documentación, publicaciones, guías y aportaciones de los usuarios disponibles a través del site del proyecto Smart Citizen y del repositorio público de código Github:

- **The Smart Citizen platform: Open source technology for citizens' political participation in smarter cities.** Smart Citizen Team. [En línea]
<<https://smartcitizen.me/>>
- **SCK Getting Started.** Smart Citizen Team. [En línea]
<<http://docs.smartcitizen.me/#/>>
- **Smart Citizen Kit firmware for the Ambient Sensor Board.** Smart Citizen Team. [En línea]
<https://github.com/fablabbcn/Smart-Citizen-Kit/blob/master/sck_beta_v0_9/SCKAmbient.cpp>

La consulta de la documentación disponible a través de estos enlaces ha resultado ser crucial para poder entender:

- La filosofía del Proyecto Smart Citizen.
- El funcionamiento de la plataforma.
- La lectura de datos procedentes de los sensores.

Y por otra parte, la documentación técnica que aportan los fabricantes de los sensores:

- **MICS 4514 Sensor Datasheet.** [En línea]
<https://github.com/fablabbcn/Smart-Citizen-Kit/wiki/Datasheets/MiCS-4514_CO_NO2.pdf>
- **HPP828E031 (SHT21) Sensor Datasheet.** [En línea]
<<https://github.com/fablabbcn/Smart-Citizen-Kit/wiki/Datasheets/HTU-21D.pdf>>
- **SHT21 Humidity and Temperature Sensor IC Datasheet.** [En línea]
<http://www.sensirion.com/fileadmin/user_upload/customers/sensirion/Dokumente/Humidity/Sensirion_Humidity_SHT21_Datasheet_V4.pdf>
- **e2v frequently Asked Questions for MiCS Gas Sensors.** [En línea]
http://www.e2v.com/shared/content/resources/File/sensors_datasheets/Metal_Oxide/mics_an2.pdf
- **EC4-20-NO2 Sensor specifications.** [En línea]
<http://www.e2v.com/shared/content/resources/File/sensors_datasheets/Electrochem/EC4-20-NO2.pdf>
- **Sensirion Calibration Certification.** [En línea]

<http://www.sensirion.com/fileadmin/user_upload/customers/sensirion/Dokumente/Humidity/Sensirion_Humidity_SHTxx_Calibration_Certification.pdf>

Documentos que junto con el firmware han resultado ser la base para poder elaborar la metodología de calibrado y para desarrollar el algoritmo que la implementa.

También hay recursos bibliográficos disponibles a través de la Xarxa de biblioteques Municipals de Barcelona y de la Biblioteca Virtual de la UOC, que aunque podrían hacer pensar que no aportan demasiado a la hora de elaborar este Trabajo de fin de Grado, realmente han resultado ser herramientas útiles para entender el contexto ante el que nos situamos:

- **Smart City: Hacia la gestión inteligente.** Sergio Colado García. 2013. Ed. Marcombo. [Universitat Oberta de Catalunya Library Catalogue].
- **Beyond Smart Cities: How Cities Network, Learn and Innovate.** Tim Campbell. 2012. Ed. Taylor and Francis. [Catàleg Aladí de la XBM de Barcelona].

Lecturas fundamentales para lograr entender:

- Cómo se están replanteando los actuales modelos de gestión de recursos mediante soluciones coordinadas.
- Cómo la interconectividad entre las plataformas de servicios facilitan la colaboración de los ciudadanos en los procesos de gestión de las ciudades.
- Cómo las ciudades inteligentes promueven unas condiciones de continuo aprendizaje y de innovación gracias a las relaciones que se establecen en entornos urbanos.

Y por último, ha sido necesario consultar algunas fuentes públicas como por ejemplo:

- **Air Quality Standards. European Commission.** [En línea]
<<http://ec.europa.eu/environment/air/quality/standards.htm>>
- **Characterization of Low-Cost NO2Sensors.** [En línea]
<<https://airqualityeqg.wikispaces.com/file/view/NO2+Sensors+Report.pdf>>
- **TELEDYNE Advanced pollution instrumentation.** [En línea]
<http://www.teledyne-api.com/pdfs/T700_Literature.pdf>

