

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DEL DISEÑO



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

EVALUACIÓN EN LABORATORIO DE UN SENSOR PARA EL MONITORIZADO ON-LINE DEL DESGASTE EN MULTIPLICADORAS DE AEROGENERADOR

TRABAJO FIN DE MÁSTER
MÁSTER EN INGENIERÍA
DEL MANTENIMIENTO

ALUMNO: Daniel Veintimilla Ramos

TUTOR: Bernardo Tormos Martínez

COTUTOR: Guillermo Miró Mezquita

VALENCIA, 27-07-16

Resumen.

Como consecuencia de la disminución de los recursos naturales, del encarecimiento de las materias primas, y la concienciación de los consumidores sobre los efectos derivados de la sobre-explotación de los recursos energéticos, entre otros el denominado efecto invernadero, cada vez más patente, se está produciendo una creciente demanda de energías alternativas, entre las cuales destacamos por su importancia actual la energía eólica.

Así, la energía eólica se ha convertido en una buena alternativa para sustituir en parte el consumo de combustibles fósiles usando, como materia prima, una fuente inagotable y económica como el viento. Hoy en día este tipo de aplicaciones representan un desafío en su implantación, ya que no se cuenta con la suficiente información sobre su ciclo de vida ni sobre su mantenimiento, lo que incrementa la incertidumbre respecto a su rentabilidad económica.

Por ello, el mantenimiento predictivo cobra especial relevancia. De él podemos destacar la importancia de un buen seguimiento en la evolución de la maquinaria, lo que repercutirá en la seguridad de nuestras instalaciones y del personal. Asimismo nos permite establecer una programación anticipada de tareas, repuestos y mano de obra, así como la identificación del fallo, de modo que permita la reducción de costes y tiempos de parada, lo cual a diferencia del mantenimiento preventivo permitirá el mejor aprovechamiento de la vida de las piezas.

Así, para el desarrollo de este trabajo se realizó la evaluación de un sensor para monitorizado on-line del desgaste en multiplicadoras de aerogenerador, en concreto de un sensor puesto en el mercado para su comercialización. Se diseñó un experimento consistente en la caracterización de la respuesta y sensibilidad, la verificación de la interferencia entre canales, las pruebas con cobre, las pruebas en aceite y, finalmente, las pruebas de sensibilidad

Para el desarrollo de todas las pruebas se adquirieron partículas de hierro de diferentes tamaños y tipologías, las cuales fueron analizadas mediante un microscopio para garantizar su homogeneidad.

Para el desarrollo de las pruebas mencionadas anteriormente, en primer lugar, se realizó la puesta en marcha del sensor, mediante la conexión de las diferentes salidas de los mismos para unir nuestro sistema al PC. Así, mediante software, se consiguió descargar toda la información que arrojaron los dos canales para su estudio posterior.

Las pruebas se ejecutaron en dos fases, la primera realizando la caracterización de la respuesta del sensor sin aceite con su límite de sensibilidad, grado de interferencia, y reacción a otros materiales; para finalmente realizar una segunda prueba, esta vez, tratando de caracterizar el funcionamiento del sensor sumergido en aceite típico de multiplicadoras de aerogeneradores y simulando condiciones de trabajo normal, mediante el diseño de un sistema de agitación.

El sensor desempeñó correctamente, tanto en las pruebas en vacío como en aceite. Según su respuesta, se llegó a la conclusión que se trata de un sensor de detección másico, es decir, aumenta su valor dependiendo de la masa detectada, no tanto por el número de partículas.



Agradecimientos.

Agradezco a mi Director de Máster D. Vicente Macián, así como mi agradecimiento al gran esfuerzo y constante apoyo y cercanía de mi Tutor y Cotutor de Tesis D. Bernardo Tormos Martínez, por permitirme estar en su equipo de trabajo y D. Guillermo Miró Mezquita, respectivamente, especialmente, porque sabiendo mi especial situación, me propusieron como colaborador en el proyecto objeto de este trabajo.

Un especial recuerdo a mis padres, a los, y a pesar de la lejanía, tantas veces tengo en mente porque siempre me han dado las fuerzas, el ánimo y el sostén necesario.

Y a tantos amigos que, sin necesidad de nombrarlos, saben que sin ellos no habría sido posible.



Índice

1	MEMORIA.....	5
1.1	INTRODUCCIÓN.....	6
1.1.1	Planteamiento del proyecto.....	6
1.1.2	Viabilidad.....	7
1.2	Objetivos.....	7
1.2.1	Objetivo General.....	7
1.2.2	Objetivos específicos.....	7
1.3	ENERGIA EÓLICA.....	8
1.3.1	Introducción a la energía eólica.....	8
1.3.2	Ventajas y desventajas de la energía eólica.....	8
1.3.3	Clasificación de la energía eólica y su importancia para el futuro.....	8
1.3.4	Funcionamiento de un aerogenerador.....	10
1.3.5	Partes de un aerogenerador.....	11
1.3.6	Partes de una multiplicadora.....	12
1.3.7	Importancia del monitorizado de las multiplicadoras de aerogenerador.....	13
1.3.8	Desarrollo de la energía eólica en el Ecuador.....	14
1.4	TRIBOLOGÍA DEL SISTEMA AEROGENERADOR.....	15
1.4.1	Introducción a la Tribología.....	15
1.4.2	Lubricantes y sistemas de lubricación.....	15
2	Desarrollo del trabajo.....	21
3	Evaluación del sensor Gill 2.....	21
3.1	Características del Sensor Gill 2.....	21
3.1.1	Definición de la prueba.....	24
3.1.2	Puesta en marcha del sensor.....	25
3.1.3	Caracterización de la respuesta del sensor en vacío.....	36
3.1.4	Validación de las zonas de transición entre canales.....	60
3.1.5	Prueba con cobre.....	64
3.1.6	Diseño del sistema de agitación y prueba.....	65
3.1.7	Pruebas en aceite.....	69
3.1.8	Prueba de sensibilidad variable.....	82
3.1.9	Correlación con PQ Index.....	89
3.1.10	Pruebas complementarias.....	91
4	Conclusiones.....	101



4.1	Trabajos futuros	102
5	Pliego de condiciones.....	103
5.1	Equipos de protección individual (EPIs).	103
5.1.1	Protección de los ojos.	103
5.1.2	Protección de las manos.....	103
5.1.3	Protección del cuerpo.....	103
5.2	Gestión de residuos.	103
5.2.1	Introducción.	103
5.2.2	Residuos líquidos.	103
5.2.3	Residuos sólidos.....	104
6	PRESUPUESTO.....	105
6.1	Acondicionamiento del laboratorio.....	105
6.1.1	Costes de los equipos.	105
6.1.2	Costes totales en equipamiento del laboratorio.....	106
6.2	Material utilizado.	106
6.2.1	Introducción.	106
6.2.2	Costes de material de ensayo.	106
6.2.3	Costes de material fungible.....	107
6.2.4	Costes totales de material.....	107
6.3	Salarios.....	108
6.4	Costes totales.....	108
7	Bibliografía	¡Error! Marcador no definido.



TRABAJO FINAL DE MÁSTER

1 MEMORIA.

1.1 INTRODUCCIÓN.

1.1.1 Planteamiento del proyecto.

Como consecuencia de la disminución de los recursos naturales, del encarecimiento de las materias primas, y la concienciación de los consumidores sobre los efectos derivados de la sobre-explotación de los recursos energéticos, entre otros el denominado efecto invernadero, cada vez más patente, se está produciendo una creciente demanda de energías alternativas, entre las cuales destacamos por su importancia actual la energía eólica.

Así, la energía eólica se ha convertido en una buena alternativa para sustituir en parte el consumo de combustibles fósiles usando, como materia prima, una fuente inagotable y económica como el viento. Hoy en día este tipo de aplicaciones representan un desafío en su implantación, ya que no se cuenta con la suficiente información sobre su ciclo de vida ni sobre su mantenimiento, lo que incrementa la incertidumbre respecto a su rentabilidad económica.

Por todo ello, cobra especial relevancia el mantenimiento predictivo. De él podemos destacar la importancia de un buen seguimiento en la evolución de la maquinaria, lo que repercutirá en la seguridad de nuestras instalaciones y del personal. Asimismo nos permitirá establecer una programación anticipada de tareas, repuestos y mano de obra, así como la identificación del fallo, de modo que permita la reducción de costes y tiempos de parada, lo cual a diferencia del mantenimiento preventivo permitirá el mejor aprovechamiento de la vida de las piezas.

El análisis de aceite es una parte muy importante del mantenimiento predictivo en sistemas lubricados, entre sus principales objetivos están el control de la degradación y contaminación del mismo, así como el control del desgaste de los mecanismos, lo que permite un aumento de la fiabilidad de los sistemas, y control del periodo óptimo de cambio del aceite.

Dentro del campo de la sensorización, se han ido desarrollando sensores on-line que proporcionan una medida fiable tanto del nivel de degradación del aceite lubricante, como de desgaste de los componentes mecánicos. Una de las ventajas de los sensores on-line es que permite realizar un mantenimiento del aceite basado en su condición real e inmediata, y por tanto, realizar un mantenimiento predictivo. Esto proporciona importantes utilidades como el beneficio económico y medio-ambiental por ahorro de aceite; la extensión de la vida útil de la máquina, al asegurar que el aceite o la máquina siempre está en buenas condiciones; la detección de estados iniciales de degradación o desgaste de tendencias anómalas en el aceite lubricante o la máquina; y también la estimación de la vida remanente del aceite y de la máquina para realizar una planificación del mantenimiento.

El siguiente proyecto pretende aplicar los principios de mantenimiento predictivo en el caso concreto de las multiplicadoras de aerogeneradores, realizando una validación del sensor para monitorizado on-line del desgaste en multiplicadoras de aerogenerador "Gill Oil Debris Sensor", el cual fue diseñado para evaluar la presencia y cantidad de partículas ferromagnéticas en el aceite lubricante.

Se desea realizar una completa caracterización de la sensibilidad de este sensor, así como evaluar el correcto desempeño al ser sometido a condiciones similares a su funcionamiento. En conclusión, se realizará un análisis de la mayor cantidad de parámetros posibles que permitan determinar el grado de detección de la presencia del desgaste del aceite, para así anticipar un fallo grave mediante la detección temprana de partículas gruesas que podrían derivar en una falla catastrófica.

El análisis de todos los resultados arrojará una serie de conclusiones que ayudarán a determinar la correcta aplicación de este tipo de sensor en una flota de aerogeneradores y poder aplicar los principios de mantenimiento predictivo para un pronto diagnóstico.

1.1.2 Viabilidad.

La correcta viabilidad del proyecto está garantizada, ya que cuenta con el respaldo del Departamento de Máquinas y Motores Térmicos que aportan su extensa experiencia, así como sus instalaciones y laboratorios. Además, el grupo que propone el proyecto ya ha trabajado en proyectos similares de caracterización de sensores on-line para el análisis del material de desgaste en el aceite de aerogeneradores.

Otro punto a destacar es que en este proyecto está involucrada una de las empresas de mayor reputación en el país, un grupo multinacional líder en el sector energético, que desde sus orígenes se ha preocupado por la innovación en energías alternativas, apostando por las tecnologías de energía renovables, manifestando su preocupación por mejorar el desempeño de sus instalaciones en cuyo afán por mejorar ha propuesto colaborar en este proyecto lo que permitirá aumentar la eficiencia y eficacia de esta tecnología.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General.

El objetivo general de este trabajo es la realización de la evaluación en laboratorio de un sensor para el monitorizado on-line del desgaste en multiplicadoras de aerogenerador, de manera que se pueda observar un comportamiento satisfactorio del sensor en su funcionamiento de detección de partículas.

1.2.2 Objetivos específicos

Además, los objetivos específicos que se buscan para el siguiente proyecto son:

El diseño de una metodología de validación experimental propia, junto con la realización de una primera fase de pruebas de funcionamiento, para la caracterización de la respuesta del sensor con sus límites de sensibilidad, grados de interferencia y posibles reacciones con otros materiales.

Con el objetivo de recrear de una manera simplificada la turbulencia propia del fluido lubricante dentro de una multiplicadora de aerogenerador se propone la realización de un banco de ensayo que permita realizar una prueba de funcionamiento del sensor en condiciones normales de trabajo, sumergido en aceite típico de multiplicadoras de aerogenerador.

Realizar la puesta en marcha de la interfaz electrónica del sensor, para conseguir descargar toda la información que arroje el sensor, y estudiar las diferentes opciones de almacenamiento de datos para su estudio posterior. Esto conlleva un aprendizaje de conceptos y técnicas que se van adquiriendo con la instalación eléctrica-electrónica de la interfaz del sensor y conexión de cables.

Revisar el correcto funcionamiento del sensor de partículas mediante la realización de algunas pruebas de simulación de funcionamiento.

Fortalecer la energía eólica en el futuro mediante la evaluación del sensor on-line, pues después de estos experimentos, se tendrán más conocimientos sobre esta energía limpia, y renovable que adquirirá una importancia muy elevada.

1.3 ENERGIA EÓLICA.

1.3.1 Introducción a la energía eólica.

La energía eólica busca la producción de electricidad aprovechando la energía natural del viento para impulsar un generador. Si revisamos los antecedentes históricos podría decirse que el aprovechamiento de la energía eólica ha acompañado prácticamente a lo largo de la historia de la humanidad. En los comienzos, el viento se utilizaba en los molinos de viento para diversos usos, tales como el bombeo de agua o la molienda de cereales. Con el paso de los años, y con la llegada de la electricidad, los aerogeneradores de producción de energía eléctrica comenzaron a aparecer con la misma base de funcionamiento de los antiguos molinos de viento. No obstante, la importancia de la energía eólica en el campo de la generación de energía no ha aparecido hasta hace relativamente poco. (1)

1.3.2 Ventajas y desventajas de la energía eólica.

Una de las ventajas respecto a otras fuentes de producción de energía, tales como energía termoeléctrica y atómica, es que se trata de una energía limpia, ya que no produce residuos contaminantes o peligrosos. Además es renovable, ya que su materia prima para la producción de energía es prácticamente inagotable.

Por otro lado, uno de los principales inconvenientes es el alto coste de producción, frente al bajo coste que supone de producción de otras energías (p.e. energías fósiles), a lo hay que sumar la falta de optimización de los procesos de mantenimiento debido a que es una energía relativamente novedosa.

Asimismo, también suponen sendas desventajas en tanto que el proceso de generación de la energía eólica sea intermitente, pues depende de la variabilidad de los flujos de viento, como la incapacidad de almacenaje, ya que debe ser consumida de manera inmediata. Este tipo de energías, denominado energías no gestionables, quedan subordinadas a otras fuentes de producción, como las llamadas energías termoeléctricas. (2)

1.3.3 Clasificación de la energía eólica y su importancia para el futuro.

Existen diferentes criterios de clasificación de la energía eólica, el más importante depende de dónde se produce esta energía. (3)

Energía eólica on-shore: Es la que comúnmente se observa en los parques eólicos asentados en tierra firme, que sin embargo tienen la desventaja de requerir condiciones óptimas del espacio y terreno donde son instaladas, además debido a que toda actividad humana genera impacto ambiental, la extracción, el asentamiento, y cimentación del terreno, para elevar las torres, pueden generar una futura erosión.

Otro inconveniente que normalmente se presenta es la afectación a la fauna silvestre, específicamente a las bandadas de aves que usan las corrientes de vientos para desplazarse, lo cual tiene trágicas consecuencias para las aves. Otro factor no menos importante es el impacto visual, aunque esto puede ser subjetivo, pero por regla general, el romper con el paisaje natural es algo que normalmente no resulta agradable para la mayoría de las personas. Finalmente, se puede señalar la contaminación acústica producto del movimiento de los conjuntos de elementos mecánicos que constituyen el aerogenerador.



Figura. 1. Ejemplo de un parque eólico on shore.

A manera de minimizar estos inconvenientes se buscan nuevos métodos de aprovechar esta energía, es éste el origen de la energía eólica off shore.

Energía eólica off-shore. Se basa en el montaje de parques eólicos en medio del mar. Esta solución presenta numerosas ventajas con respecto a la energía eólica on-shore, ya que no posee restricciones de espacio, contaminación acústica, ni impacto visual, por lo que pueden construirse estructuras de mayor tamaño, y producir más energía ya que en el mar la velocidad del viento es mayor y constante.



Figura. 2. Ejemplo de un parque eólico Offshore.

El principal inconveniente es su elevado coste. Los costes de instalación, operación y mantenimiento de la energía eólica off-shore son mayores que los de la on-shore. Como podemos ver en la **Figura. 3.**

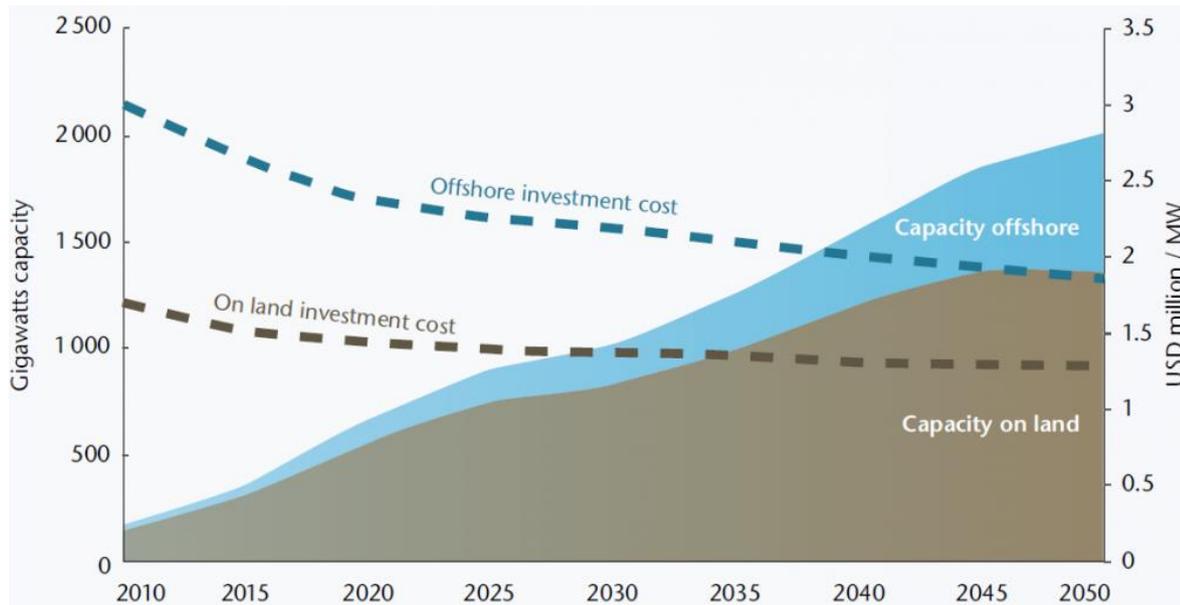


Figura. 3. Capacidad instalada 2010- 2050. (3)

Se estima que actualmente resulta un 20% más caro producir electricidad en el mar que en tierra, y a diferencia de la on-shore, no se considera competitiva. Sin embargo, hay que tener en cuenta que se trata de una tecnología reciente y con un gran potencial respecto a la reducción de costes. Al igual que pasó con la energía eólica on-shore, el apoyo económico de los gobiernos resultará clave para hacerla competitiva.

Podemos destacar la gran importancia que tendrá durante los próximos años la energía eólica, en un análisis se observa que la capacidad instalada a nivel mundial, a finales de 2011 era de 240 GW, se prevé que alcance los 500 GW a finales de 2016 con un crecimiento anual del 15% aproximadamente. El objetivo marcado por las políticas energéticas es superar los 1000 GW en 2035. En cuanto a la cantidad de electricidad producida, que en 2011 fue un 3% del consumo mundial, se espera que aumente hasta un 8% en 2035.

En cuanto a la importancia de la energía eólica offshore dentro de la energía eólica total, actualmente sólo representa un 2% de la capacidad instalada a nivel mundial, con apenas 4 GW, pero se espera que su contribución aumente mucho durante los próximos años. Se **confía** alcanzar una capacidad de 75GW en 2020 y de 180GW en 2035, para aportar aproximadamente un 20% de la energía eólica global. (3)

1.3.4 Funcionamiento de un aerogenerador.

El principio de funcionamiento de los aerogeneradores está basado en el aprovechamiento de la energía cinética del viento para convertirla en electricidad. De este modo cuando el viento sopla, las palas transmiten un movimiento giratorio por medio de un eje a un grupo de engranajes denominados multiplicadora, la cual tiene por función aumentar el régimen de giro, lo cual nos sirve para sincronizar la energía eléctrica producida con la que existe en la red. A continuación, dicho movimiento es transmitido a un alternador que transforma la energía mecánica en energía eléctrica, y un transformador situado en la góndola o en la torre aumenta el voltaje de la corriente para transportarla más eficientemente a través de las líneas de la red eléctrica. (4)

1.3.5 Partes de un aerogenerador.

Los aerogeneradores en su gran mayoría están constituidos por los elementos que podemos apreciar en la **Figura. 4**.

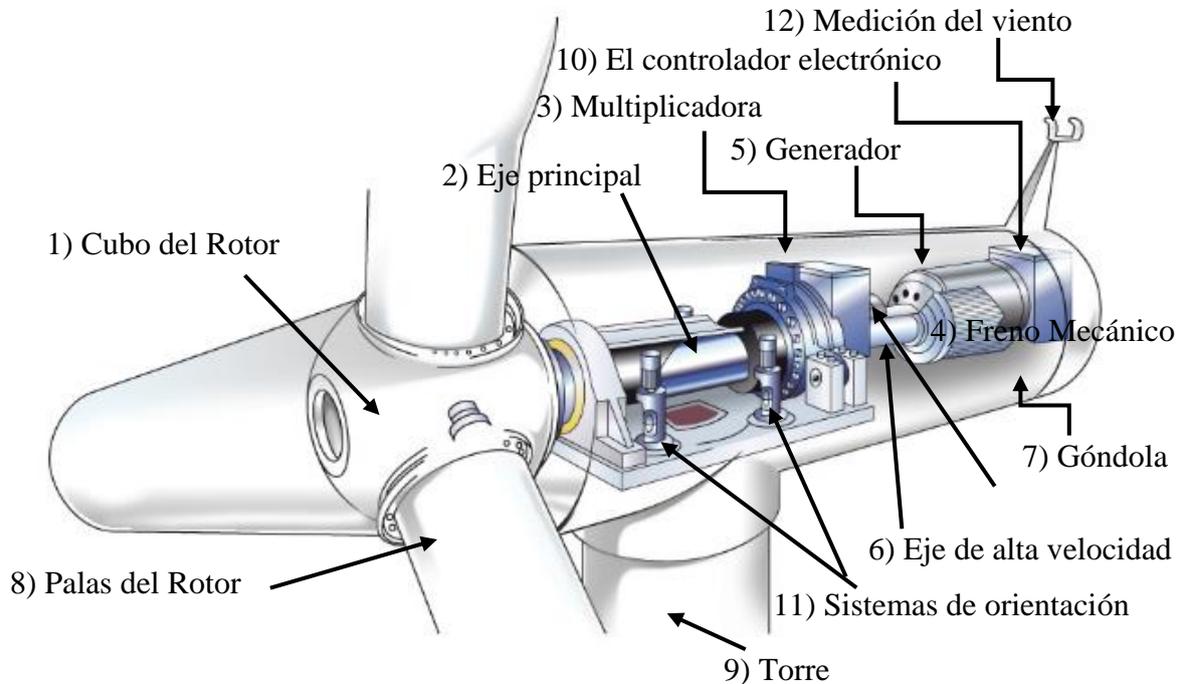


Figura. 4. Partes de un aerogenerador. (5)

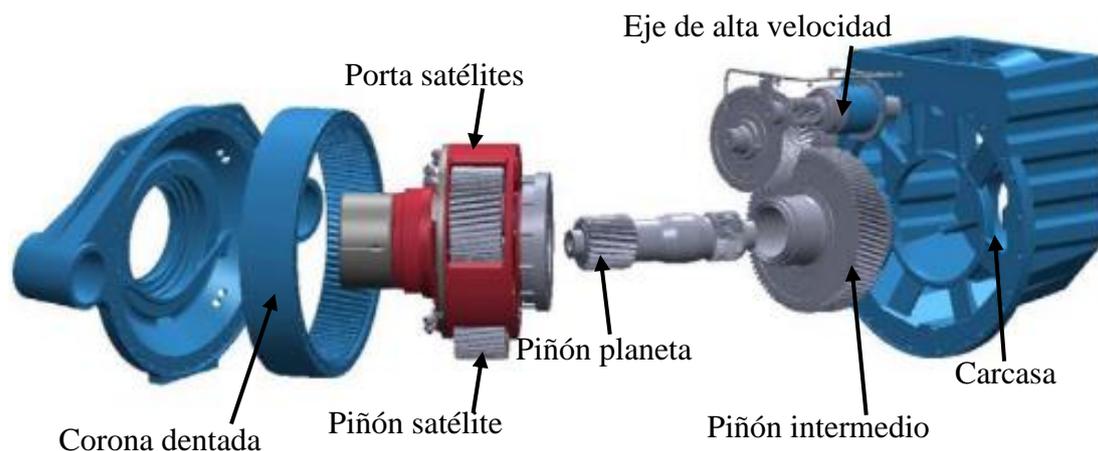
A continuación se detallan las partes características de un aerogenerador: (6)

- 1) **Cubo del rotor.** Es el elemento que une las palas del aerogenerador con el eje principal, consiste en una esfera hueca cortada por tres planos en los que conforman las bridas de unión a los rodamientos de las palas.
- 2) **Eje principal.** Es el elemento que conecta el buje del rotor al multiplicador. Se caracteriza por una velocidad de giro muy lenta.
- 3) **Multiplicadora.** Es un conjunto de engranajes helicoidales y planetarios que mediante su configuración y relación de transmisión permiten que el eje a la salida de la multiplicadora, o eje de alta velocidad, gire mucho más rápido que el eje principal, de 22-64 rpm a aproximadamente 1500 rpm.
- 4) **Freno mecánico.** El sistema de freno mecánico consiste en un disco de freno unido a la multiplicadora mediante el cual por medio de unas mordazas podemos impedir el giro del aerogenerador. Elemento imprescindible ya sea por razones de seguridad, durante fuertes vientos o reparaciones.
- 5) **El generador eléctrico.** Es la parte del aerogenerador que transforma la energía mecánica en energía eléctrica, este puede ser síncrono y asíncrono. Los últimos se emplean más, ya que pueden conectarse directamente a la red, son robustos y de menor mantenimiento.
- 6) **Eje de alta velocidad.** El eje de alta velocidad gira aproximadamente a 1500 rpm, lo que permite el funcionamiento del generador eléctrico.
- 7) **Góndola.** Es la carcasa que cubre todas las partes principales del aerogenerador, incluyendo el multiplicador y el generador eléctrico.

- 8) **Palas del rotor.** Son las partes del aerogenerador que transmiten la potencia del viento hacía el cubo del rotor, cada pala mide alrededor de 20 metros de longitud y sus diseños siguen una complejas técnicas aerodinámicas.
- 9) **Torre.** Es la parte del aerogenerador que soporta la góndola, las palas y el cubo, generalmente es una ventaja disponer de una torre alta ya que la velocidad del viento aumenta a medida que nos alejamos del suelo. Una turbina moderna de 2 Mw presenta una torre de entre 67 y 100 metros
- 10) **El controlador electrónico.** Consiste en un autómatas que continuamente monitoriza las condiciones del aerogenerador y que controla el mecanismo de orientación. en caso de cualquier difusión (por ejemplo, un sobrecalentamiento en el multiplicador o en el generador), automáticamente para el aerogenerador y llama al ordenador del operario encargado de la turbina a través de un enlace telefónico.
- 11) **Sistemas de orientación.** Activado por el controlador electrónico, cuyo objetivo es el de mantener al aerogenerador en un plano perpendicular a la dirección del viento, con el objeto de extraer de él la máxima energía.
- 12) **Sistemas de medición del viento.** Sensores o instrumentos de medición que constantemente están midiendo los parámetros críticos del viento: velocidad (anemómetro) y dirección del viento (veleta), velocidad del rotor y del generador, temperatura ambiente y de los componentes, presión del aceite, ángulo de paso y acimut (ángulo del mecanismo de orientación basado en la dirección del viento), magnitudes eléctricas y vibraciones en la góndola.

1.3.6 Partes de una multiplicadora.

Una multiplicadora está compuesta por varios componentes utilizados en muy diversos ámbitos de la ingeniería, pero el principal reto de este tipo de multiplicadoras es la fiabilidad, con un objetivo de poder trabajar durante un largo período de tiempo. Para ello, es necesario que los componentes de estas multiplicadoras también tengan esta duración. (7)



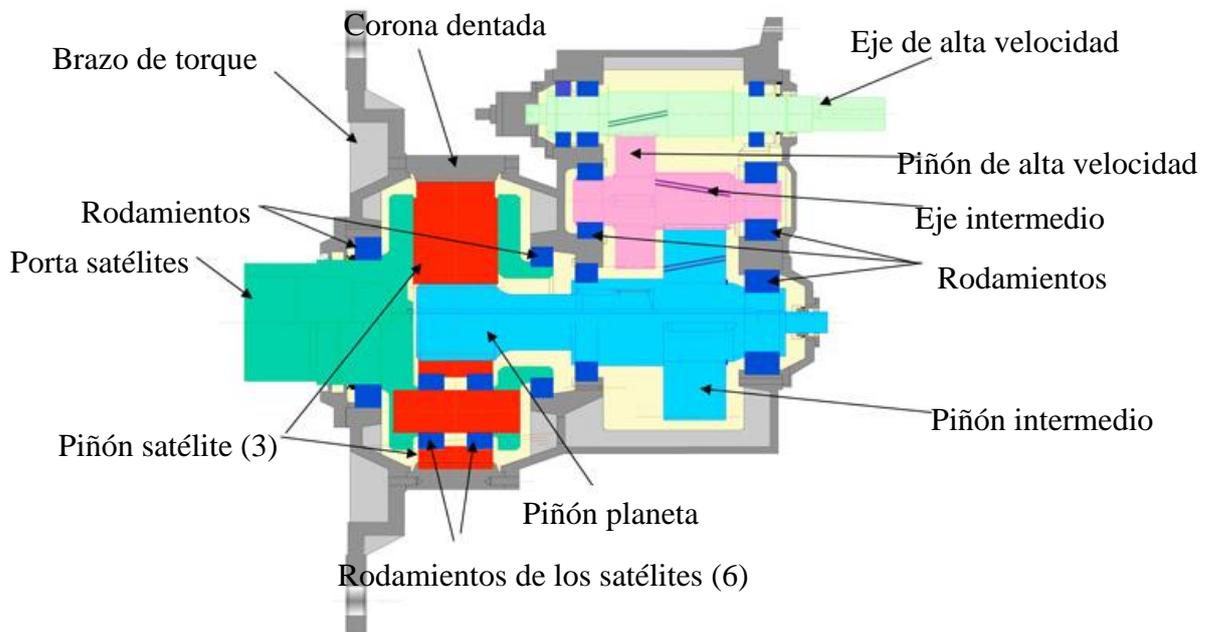


Figura. 5. Multiplicadora de un aerogenerador. (8)

1.3.7 Importancia del monitorizado de las multiplicadoras de aerogenerador.

Como se puede apreciar en la siguiente figura los datos representan unas 27.000 aerogeneradores, que van desde 500 kW a 5 MW, en aplicaciones on- shore y off-shore. Tres elementos que componen el tren motriz del aerogenerador, La multiplicadora, el generador, y el eje principal producen la mayoría del tiempo de inactividad del aerogenerador, de allí la importancia para el monitorizado de este componente. (8)

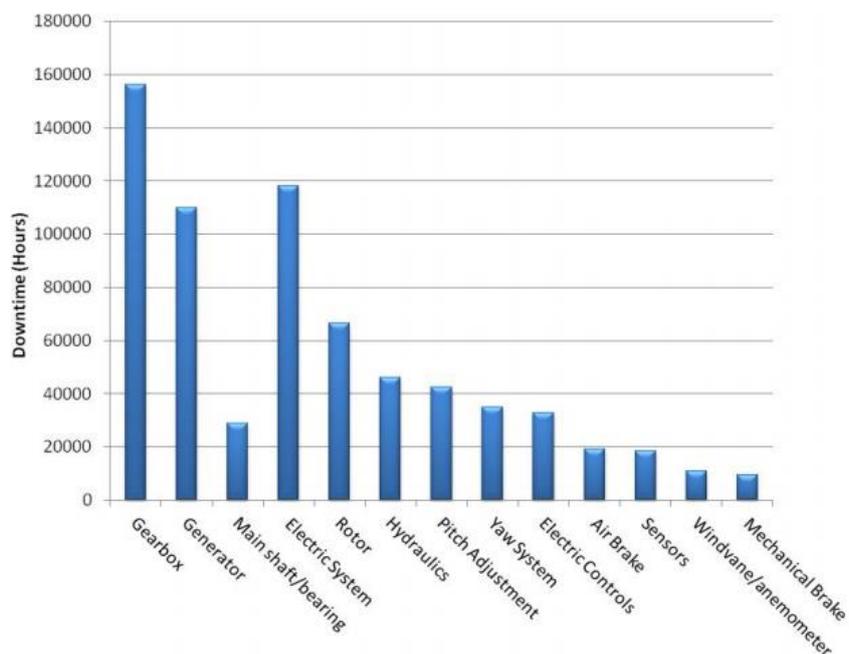


Figura. 6. Inactividad originada por los componentes del aerogenerador. (8)

1.3.8 Desarrollo de la energía eólica en el Ecuador.

En Ecuador, la energía eólica está presente de manera testimonial, tomando un inusual empuje los últimos años. El aprovechamiento de la energía eólica en Ecuador inició en octubre del 2007 con los trabajos en la isla San Cristóbal perteneciente a las Islas Galápagos, con una capacidad de 2,4MW y en la provincia de Loja, con el desarrollo del Proyecto Eólico Villonaco, lugar que cuenta con una velocidad promedio del viento de 12 m/s, con una potencia instalada de 16,5 MW. Además está en construcción un proyecto en la isla Baltra con una capacidad de 2,25 MW. El equivalente de la energía proporcionada por estos proyectos puede abastecer los hogares de 150 mil ecuatorianos. (9)

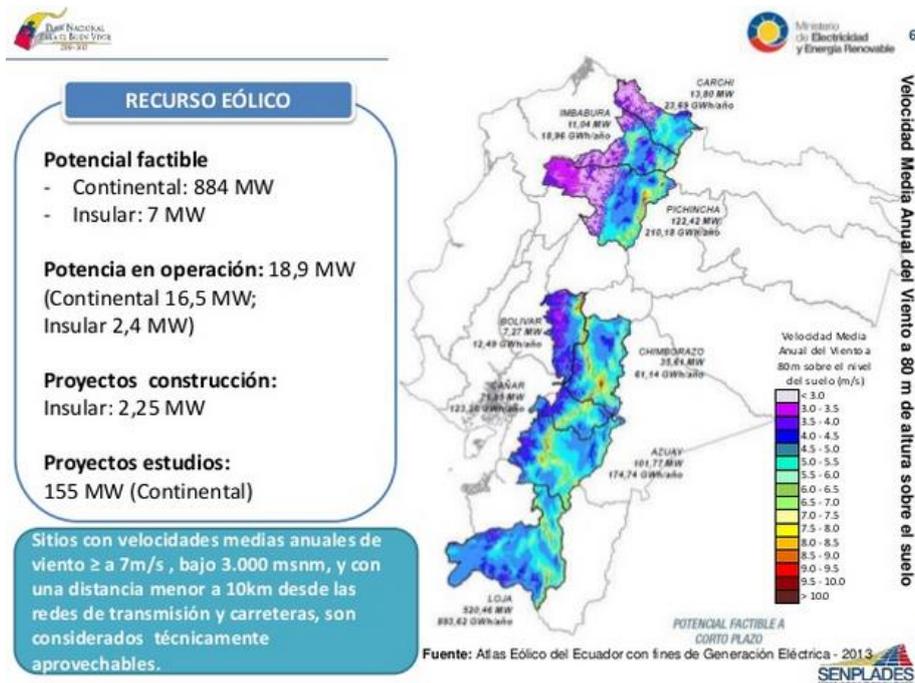


Figura. 7. Potencial de recursos eólicos en Ecuador (10)

El aprovechamiento de la energía eólica en Ecuador actualmente se encuentra en sus inicios, la capacidad eólica actual instalada llegará a 21,15 MW, superando a varios países latinoamericanos. Un estudio preliminar identificó la existencia de viento suficiente para generar unos 884MW de electricidad diaria en Ecuador, con proyectos que pudieran aprovecharse en el corto plazo, para lo cual se plantea el aprovechamiento de todo el potencial eólico del país mediante el estudio de viabilidad de nuevos proyectos.

El futuro parque eólico Minas de Huascachaca, estará compuesto por 20 aerogeneradores de 1,5 MW situados a 84 kilómetros al suroeste de la ciudad de Cuenca, en un área que se extiende por las provincias de Azuay y Loja. La velocidad promedio del viento es de 5,9 m/s, mientras que las velocidades mayores se registran entre julio y septiembre. La electricidad generada se despachará a la red nacional a través de una subestación operada por Empresa Eléctrica Regional Centro Sur.

En la provincia de Imbabura existe un proyecto para instalar un parque eólico en la parroquia Salinas, cuenta con el respaldo de la Empresa Eléctrica Regional Norte y la empresa operadora electro viento, quienes ya cuentan con los estudios de viabilidad, conexión eléctrica e impacto ambiental definitivo. El proyecto supondrá una inversión de 22 millones de dólares y tendrá una potencia eólica inicial de 10 MW entre otros. (10)

1.4 TRIBOLOGÍA DEL SISTEMA AEROGENERADOR

1.4.1 Introducción a la Tribología.

La palabra tribología proviene del griego y significa “estudio del frotamiento”, pero no fue hasta 1966 con la publicación del informe de Jost, cuando realmente se hizo popular este término. Dicho informe relacionó todos los beneficios al PIB que representaba tener un buen conocimiento de este fenómeno.

La tribología es la ciencia y tecnología que se encarga del estudio de los sistemas en movimiento y en contacto mutuo. Comprende fricción, lubricación y desgaste con otros aspectos relacionados con la ingeniería, física, química, metalurgia, etc. (11)

1.4.2 Lubricantes y sistemas de lubricación.

Un lubricante es una sustancia cuya función es la de formar una película protectora entre la superficie de dos cuerpos en movimiento relativo, cuyo contacto directo conllevaría a pérdidas de energía y desgaste por calentamiento y fricción. El estudio de los tipos de lubricación líquida presentó dos funcionamientos diferentes:

Lubricación hidrostática. Se produce cuando el espesor de la película separadora de aceite se garantiza por la utilización de un sistema de lubricación de alta presión, la cual es siempre mayor que la suma de las rugosidades de las superficies en movimiento relativo. (12)

Lubricación hidrodinámica: Ocurre cuando la película de lubricante se produce debido a la velocidad relativa de las superficies que provocan el arrastre del fluido entre las superficies. (12)

Como se puede ver en la **Figura. 8**, dicha lubricación se analiza en tres zonas definidas por la curva de Stribeck, que relaciona el coeficiente de fricción con el parámetro de Hersey, incluyendo:

Lubricación límite. Debido a una inadecuada velocidad o viscosidad, la película de lubricante es muy delgada por lo que aumenta progresivamente tanto el coeficiente de fricción como el desgaste por contactos puntuales o micro soldaduras, en este punto actúan los aditivos de extrema presión EP los cuales aumentan el coeficiente de fricción y por ende reducen el desgaste. (13)

Lubricación mixta. Es una transición entre la lubricación hidrodinámica y la límite, generalmente observada en el arranque o en la parada de maquinaria. Las condiciones más desfavorables para la lubricación van a ser las de cargas elevadas, velocidades lentas y temperaturas altas (viscosidad). La transición entre ambos regímenes no se produce obviamente de manera instantánea. En la lubricación mixta las características del contacto son determinadas por las diversas combinaciones de los efectos de la lubricación límite y la lubricación fluida. (14)

Lubricación elastohidrodinámica. Esta situación ocurre como resultado de las deformaciones elásticas locales de los materiales y se genera más rápidamente en pares altamente cargados. En esta situación, la viscosidad del lubricante aumenta de manera considerable debido a las altas presiones en los contactos y ello contribuye a la formación de una película fluida efectiva.

Por lo tanto, el modo de lubricación existe entre dos superficies en contacto deslizante puede cambiar de uno a otro dependiendo de variables tales como: carga velocidad, viscosidad del lubricante, geometría del contacto o rugosidad superficial de ambas superficies. (14)

Como se puede ver en la **Figura. 8**, la lubricación ideal es la que se encuentra en el límite comprendido entre la lubricación mixta e hidrodinámica, el espesor de película es medianamente elevado. En esa zona, el coeficiente de fricción como el desgaste es relativamente bajo.

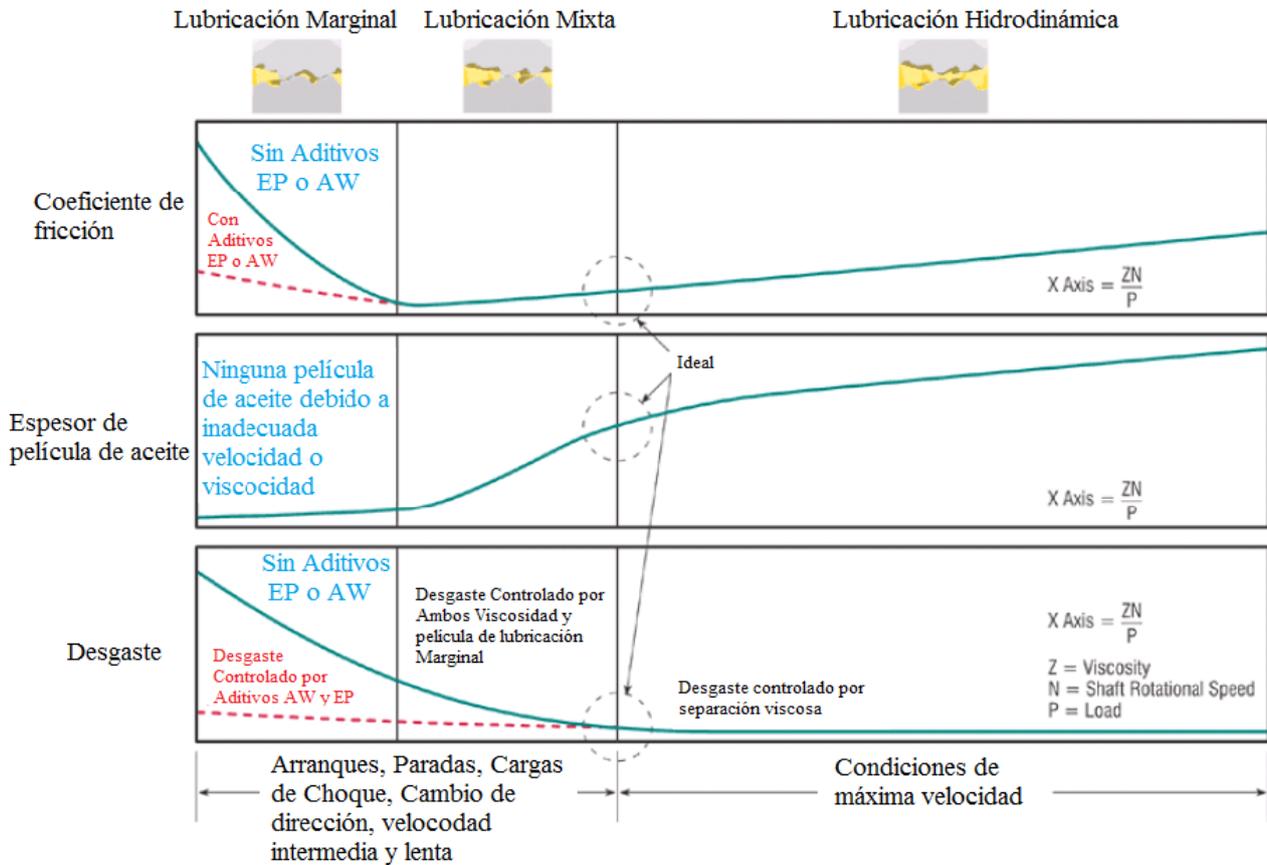


Figura. 8. Coeficiente de fricción, espesor de película de aceite y desgaste (13)

1.4.2.1 Selección de aceite para multiplicadoras

La selección del aceite adecuado y su cuidado es uno de los principales objetivos que se debe conseguir para que el sistema trabaje en condiciones óptimas durante su vida útil. La selección del lubricante adecuado debe ser una responsabilidad compartida entre el usuario, el fabricante de la máquina, el fabricante de los componentes mecánicos (rodamientos, etc.), el suministrador del aceite y el suministrador de los filtros. Las multiplicadoras de los aerogeneradores se caracterizan por las bajas y las altas velocidades y las alternativas cargas a las que están sometidas, lo que lleva a que se utilicen aceites con aditivos de extrema presión (EP). Los fluidos base utilizados pueden ser minerales o sintéticos. Los fluidos minerales son productos que se obtienen del petróleo, mientras que los aceites sintéticos provienen de síntesis química. Los aceites sintéticos más comunes pueden ser: Polialfaolefina (PAO), Esteres (E) o Poliglicoles (PAG). Los requerimientos de un aceite nuevo para las multiplicadoras de aerogeneradores deben estar de acuerdo con la especificación alemana DIN 51517 parte 3 y con los siguientes requerimientos: (15)

Parámetro	Metodología	Criterio
Índice de viscosidad	ISO 2909	Mínimo 90
Estabilidad oxidación	ASTM-D2893-Modificada	Aumento de la viscosidad a 121°C < 6%
Corrosión al acero	ISO7120	Negativo
Corrosión al cobre	ISO2160	<1B
Espuma	ASTM-D892	75/10 75/10 75/10
FZG Scuffing	ISO 14635-1	>=12
Micropitting	FVA nº54	>=10
Filtrabilidad	AFNOR NF E48690 5 Micras	Pasa
Limpieza	ISO 4406/99	16/14/11
FE 8	DIN 51819	<30 mgr /80 h
Brugger	DIN 51347	> 50 N/mm ²
Aire retenido a 90°C	ASTM-D 3427	< 15 minutos
Carga de soldadura	ASTM-D 2783	>250 Kg
Desgaste 1800rpm/20kg/54°C/60min		< 0,35 mm
Desemulsinabilidad 82°C	ASTM-D1401	< 15 Min.

Tabla 1. Propiedades de un aceite nuevo para las multiplicadoras de aerogeneradores DIN 51517. (15)

1.4.2.2 Desgaste

El desgaste es un término general que describe la pérdida de material de las superficies de contacto (15). Los niveles de desgaste se podrían clasificar en: Ligero, Normal, moderado y grave / destructivo. El desgaste es parte del proceso de envejecimiento del sistema mecánico y, mientras la pérdida de metal se produce a una velocidad que no afecta a las presentaciones en la vida esperada de los engranajes de desgaste, no representan un problema.

1.4.2.3 Desgaste en multiplicadoras

El fenómeno de desgaste en multiplicadoras de aerogenerador presenta varios fenómenos diferenciados:

Micropitting: Es un daño superficial que se da en sistemas de alta rodadura y se caracteriza por la presencia de pequeños agujeros en la superficie mostrando una superficie interior con grietas. Una técnica para eliminar el micropitting consiste en el pulido durante el proceso de rodadura de los engranajes. (7)

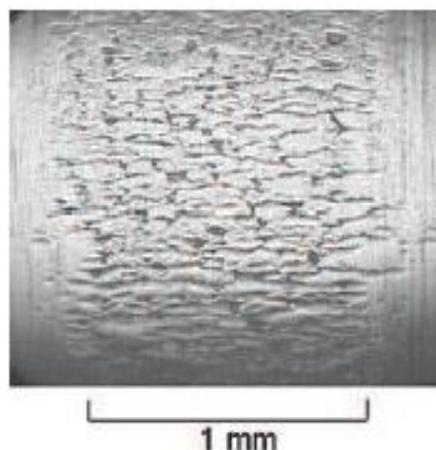


Figura. 9. Fenómeno del micropitting.

Pitting: Se trata de un fenómeno de fatiga que tiene lugar cuando aparece una fisura de fatiga debido a cizallamiento en la parte interna de la superficie. Esta fisura se propagará una corta distancia, para luego bifurcarse hacia la superficie. (7)



Figura. 10. Fenómeno del pitting.

Bending: Tiene lugar cuando la tensión excede el límite elástico del material, y puede darse en la superficie o más internamente. (7)

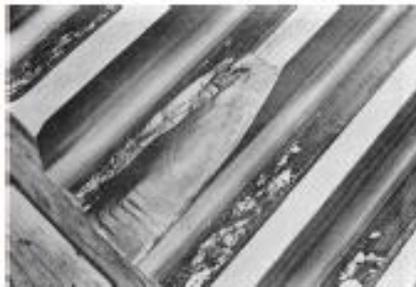


Figura. 11. Fenómeno del bending.

Scuffing: Adhesión severa que provoca transferencia de material de la superficie de un diente a otro, debido a un fenómeno de microsoldadura y arrancamiento. (7)

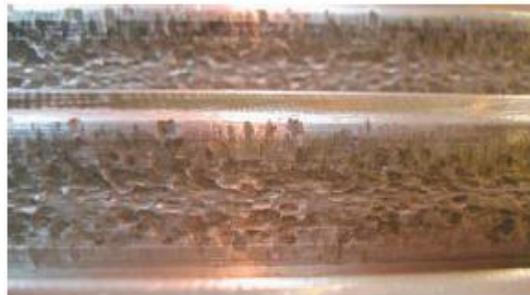


Figura. 12. Fenómeno del scuffing.

Spalling: Despedimiento de porciones superficiales del diente por fatiga. Puede estar generado por una excesiva fragilidad del material. Solo ocurre en engranajes cementados y templados. Se puede iniciar en un efecto menor como un picado. (16)



Figura. 13. Desconchado a la altura de la circunferencia primitiva.

Rotura por fatiga: Rotura del diente por un golpe o sobrecarga. (16)

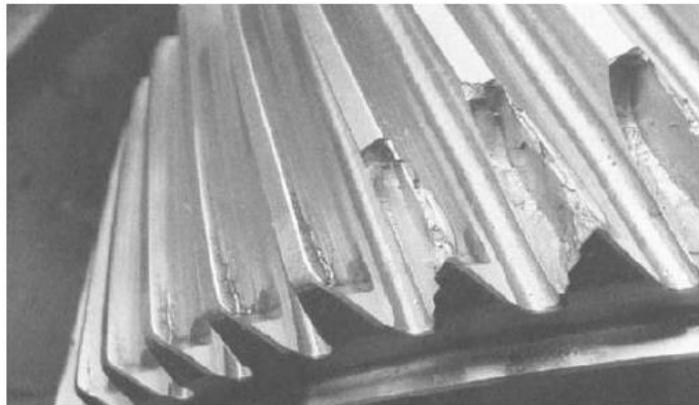


Figura. 14. Rotura de dientes generada por la sobrecarga local que produce una desalineación.

Todos los fenómenos mencionados anteriormente, en realidad, se traducen en la generación de una cantidad de partículas que finalmente aparecerán en el aceite. De estas partículas, es interesante mencionar varios aspectos que las caracterizan y las engloban dentro de un tipo de desgaste determinado. Por regla general, es interesante mencionar su tamaño, su forma, el material del que están hechas y la cantidad de partículas existentes.

Por último, el paso del tiempo provoca la aparición de diferentes tamaños de partículas y concentración de éstas, por lo que es posible inferir los regímenes de desgaste en una multiplicadora a partir de la presencia de partículas de desgaste, como se muestra en la **Figura. 15**.

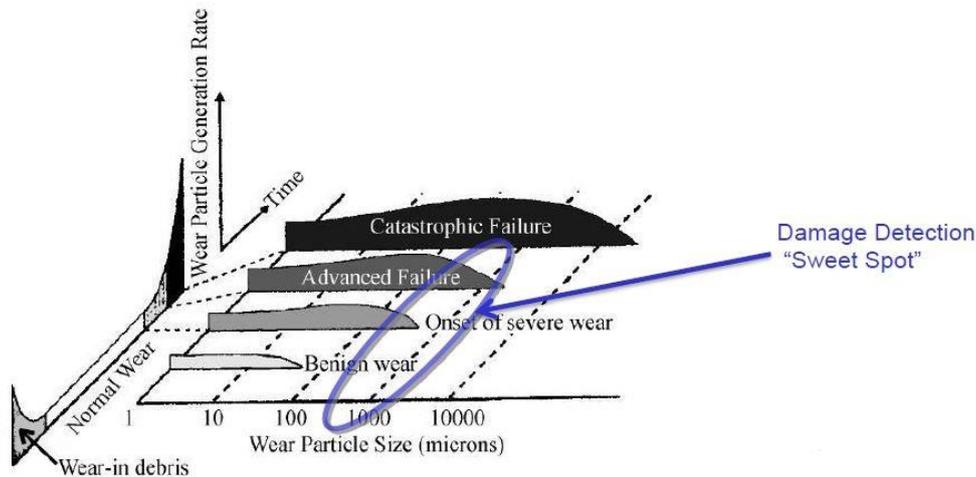


Figura. 15. Regímenes de desgaste en una multiplicadora. (17)

Así pues, conforme va pasando el tiempo, los engranajes de la multiplicadora comienzan a funcionar, produciéndose un desgaste inicial, conocido como desgaste benigno o desgaste normal. Llega un punto en el que, las partículas van haciéndose más grandes y numerosas, donde el tamaño de las partículas oscila entre las 100 μm y las 1000 μm . Este rango es de gran interés para el mantenimiento, pues a partir de las 1000 μm , las probabilidades de fallo de la máquina ya son muy elevadas. Es aquí precisamente donde reside el interés de este proyecto, en la monitorización de la cantidad de partículas presente en un lubricante para saber cómo está el sistema lubricado en lo que a su nivel de desgaste se refiere. (18)

Se puede concluir que el gran interés reside en el binomio tamaño de partículas y cantidad de partículas. En un primer momento, las partículas son pequeñas y la cantidad es poca. Con el paso del tiempo, las partículas que se forman van siendo más grandes y la cantidad de partículas remanentes en el aceite es mucho mayor. La combinación de ambos factores es lo que produce que las probabilidades de fallo sean mucho más elevadas. (19) (20)

2 Desarrollo del trabajo

En julio de 2015, se acuerda la colaboración entre una reputada compañía eléctrica y CMT-Motores Térmicos para realizar una propuesta enfocada al estudio de la caracterización de la respuesta del sensor, diseñado para evaluar la presencia y cantidad de partículas ferromagnéticas en el aceite lubricante de multiplicadoras de aerogenerador.

En este trabajo se presentó la evaluación del sensor para monitorizado on-line del desgaste en multiplicadoras, es el producto ya terminado y puesto en el mercado para su comercialización.

La prueba se realizó en el laboratorio de Lubricantes y Combustibles del Departamento de Máquinas y Motores Térmicos de la Universitat Politècnica de València, utilizando el sensor y materiales proporcionados por el cliente.

Las pruebas se realizaron en dos fases, primero se desarrolló la caracterización de la respuesta del sensor con su límite de sensibilidad, grado de interferencia, y reacción al cobre; para finalmente, realizar una segunda prueba, esta vez tratando de caracterizar el funcionamiento del sensor sumergido en aceite típico de multiplicadoras de aerogenerador y simulando condiciones de trabajo normal, mediante el diseño de un banco de ensayos con un sistema de agitación.

Para el desarrollo de las pruebas mencionadas anteriormente, se realizó la puesta en marcha del sensor, mediante la conexión de las diferentes salidas del mismo y su chequeo, usando una de las salidas del módulo del sensor para conectar nuestro sistema al PC. Así, mediante software se consiguió descargar toda la información que arrojaron los dos canales, para su estudio posterior.

3 Evaluación del sensor Gill 2.

3.1 Características del Sensor Gill 2.

El Gill 2 es un sensor de detección y cuantificación de partículas ferromagnéticas en aceites lubricantes. El sistema provee una monitorización en tiempo real de las partículas de desgaste, provee información de la temperatura y el potencial dieléctrico del aceite con el objetivo de detectar cambios, presencia significativa de agua convirtiéndose en una clave para implementar un mantenimiento preventivo efectivo.



Figura. 16. Sensor “Oil Condition Monitoring” de Gill Instruments.

El módulo del control electrónico de Gill 2 viene en dos modalidades comerciales.

- Versión industrial: Indica de manera visual, mediante el encendido de luces de alarma cuando ocurre la saturación de alguno de los canales del sensor.



Figura. 17. Módulo del control electrónico versión industrial.

- Versión estándar: es un modelo mucho más compacto que no tiene la facilidad visual de las luces de alarma.



Figura. 18. Módulo de control electrónico versión estándar.

A continuación se puede ver la tabla de especificaciones eléctricas y mecánicas del sensor y módulo de control electrónico versión industrial:

Electrical (Industrial Voltage)	
Supply Voltage	+5V DC to +32V DC
Power Consumption	<2,8 W
Resolution	10 bit
Sample Rate	10Hz
Mechanical	
Sensor Size	57mm x ø24,5mm
Industrial Junction	105,5mm x 105,5mm x 66mm
Box Size	
Mounting sensor	2 off M6 Socket cap screws
industrial	(not supplied)
Weight industrial	0,70kg

Tabla 2. Especificaciones eléctricas.

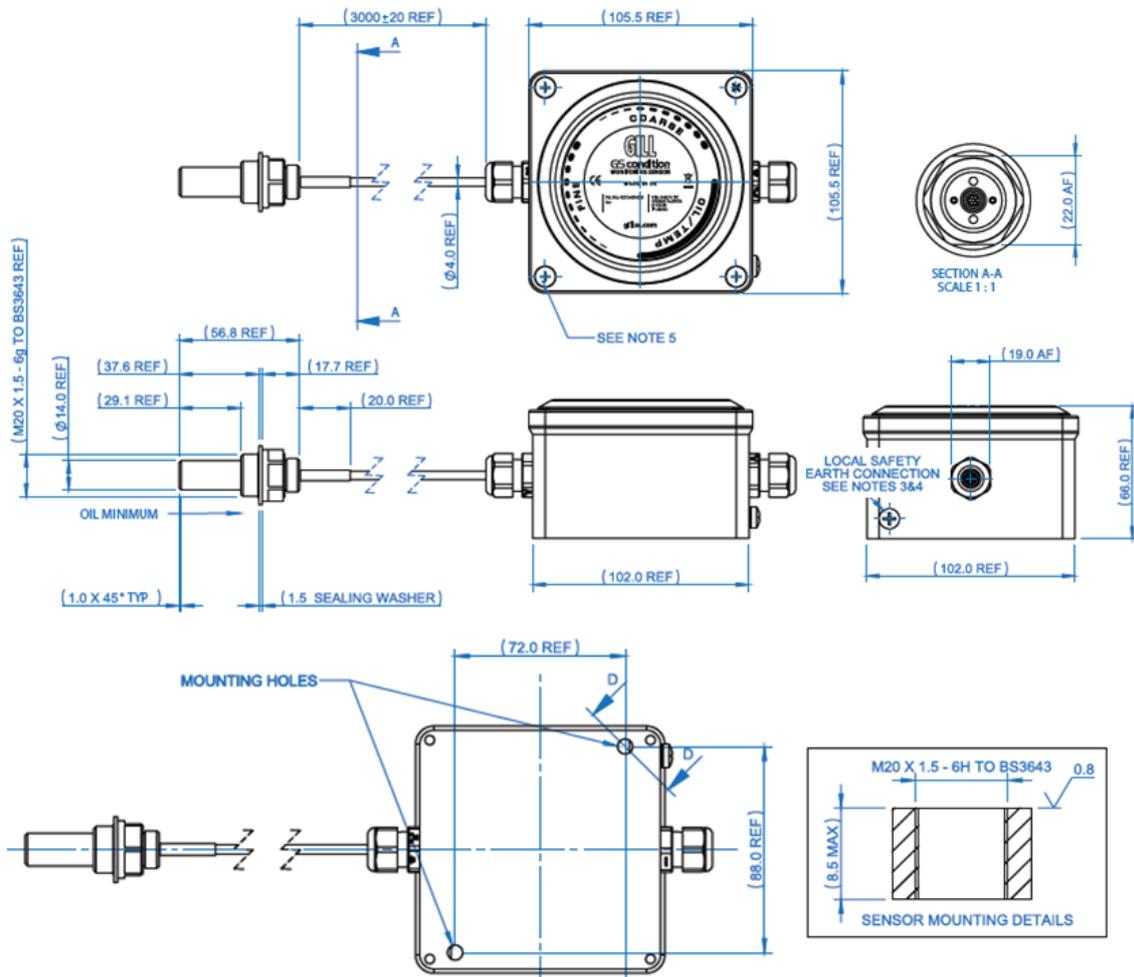


Figura. 19. Especificaciones mecánicas del sensor Gill 2.

En la siguiente **Figura. 20** se pueden apreciar tanto los canales de entrada como de salida del módulo del control electrónico.

Sensor connections		
	Clear	Screen
	Red	Power (V+)
	Blue	(Not Connected)
	Green	Course
	White	Fine
	Orange	Oil/Temp
	Black	Power Gnd (V-)

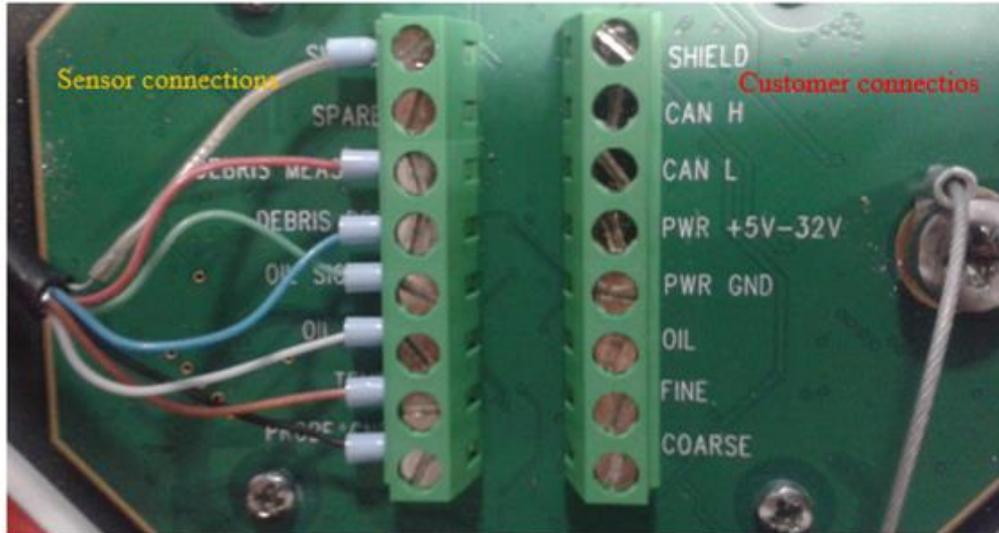


Figura. 20. Puertos de entrada y salida del módulo de control electrónico.

3.1.1 Definición de la prueba.

El objetivo general de este ensayo fue validar el comportamiento del sensor con diferentes tamaños y masas de material ferromagnético, con el cual se trató de recrear desde un desgaste inicial hasta la ocurrencia de un desgaste severo. De esta manera se pudo llegar a hacer una aproximación de la utilidad de este sensor, para optimizar el mantenimiento predictivo con todos los beneficios que esto conlleva.

3.1.1.1 Montaje del banco de simulación de vaso abierto.

Para tratar de recrear las condiciones normales de funcionamiento en las cuales opera el lubricante de las multiplicadoras en aerogeneradores, se necesitó recurrir a un método de agitación externo, evitando en lo posible que se generara una turbulencia y emulsionara el aceite.

La opción valorada para este sistema fue la aplicación de un agitador comercial con regulación de régimen de giro, con el que fácilmente se pudo realizar el trabajo de batir dicho fluido, considerando los niveles de viscosidad del aceite tipo en estas aplicaciones.



Figura. 21. Agitador comercial.

Tratando de recrear de una manera simple la turbulencia a la que se encontraría el fluido lubricante dentro de una multiplicadora de aerogenerador, se diseñó un sistema de vaso abierto, éste consistió en un recipiente de vidrio de preferencia alargado y resistente, que se llenó de aceite lubricante y en cuyo interior se sumergieron tanto el sensor como el agitador comercial por medio de sendos brazos de sujeción. Se utilizó un recipiente para contener un volumen equivalente a 2 litros de aceite, el

cual se mantuvo con una turbulencia constante. Una vez alimentado todo el sistema se procedió a agitar el fluido lubricante para iniciar las pruebas con las diferentes tipologías de partículas y proceder a tomar las medidas pertinentes.

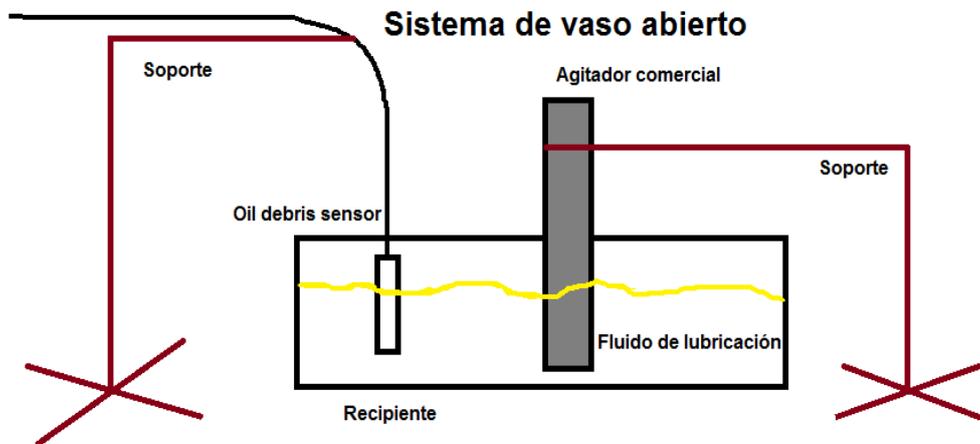


Figura. 22. Diseño del sistema de prueba vaso abierto.

3.1.1.2 Enumeración de los diferentes test.

Las pruebas se realizaron en dos fases, primero se realizó la caracterización de la respuesta del sensor con su límite de sensibilidad, grado de interferencia y reacción a otros materiales “en vacío”, es decir, exponiendo el sensor a material sin entrar en contacto con el aceite; para finalmente, realizar una segunda prueba, esta vez tratando de caracterizar el funcionamiento del sensor sumergido en aceite típico de multiplicadoras de los aerogeneradores y emulando condiciones de trabajo normal. Un resumen de este proceso se muestra en la **Tabla 3**.

Tabla de Pruebas	
En vacío	Con aceite
1. Caracterización de la respuesta y sensibilidad	4. Pruebas en aceite
2. Verificación de la interferencia entre canales	5. Prueba de sensibilidad
3. Prueba con Cu	

Tabla 3. Tabla de pruebas a realizar en el laboratorio.

3.1.2 Puesta en marcha del sensor.

El procedimiento de puesta en marcha del sensor Gill 2 comprendió los siguientes pasos:

Se alimentó el sistema conectando de acuerdo a las especificaciones, como se puede apreciar en la **Figura 23**.



Customer connections	
SCREEN	
CAN H	
CAN L	
POWER	V(+)
GROUND	V(-)
OIL / TEMP	0-10 V DC
FINE	0-10 V DC
COARSE	0-10 V DC

Figura 23. Alimentación del módulo del control electrónico.

Con el fin de adquirir de manera rápida la información que arrojó el sensor por sus tres canales, como opción de almacenamiento se utilizaron dos “data logger”, los cuales, conectados mediante un circuito eléctrico, recopilaban la información mediante USB al PC. El esquema de montaje se muestra en la **Figura 24**.

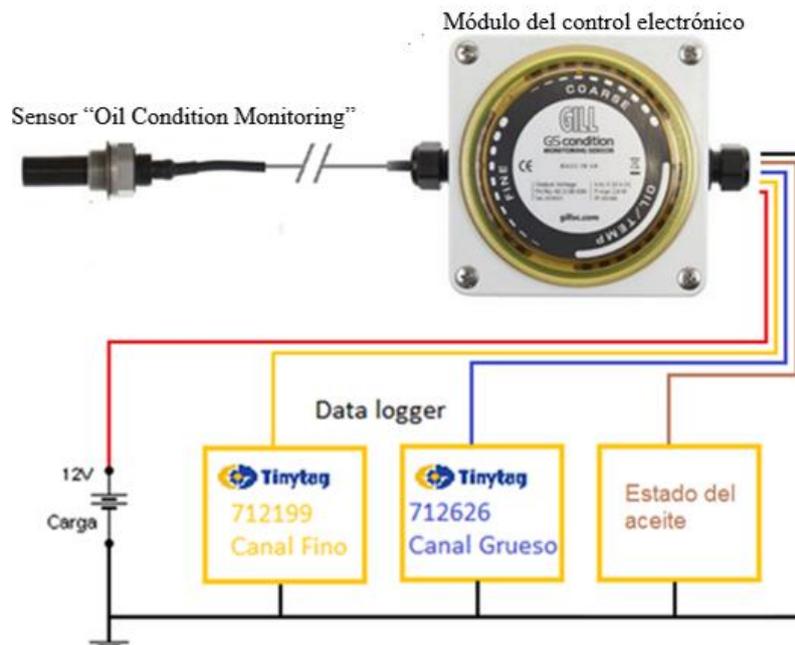


Figura 24. Circuito para la conexión de los data logger.

Se conectó el módulo del control electrónico al PC mediante el cable de montaje USB tal como se puede apreciar en la **Figura 25**.

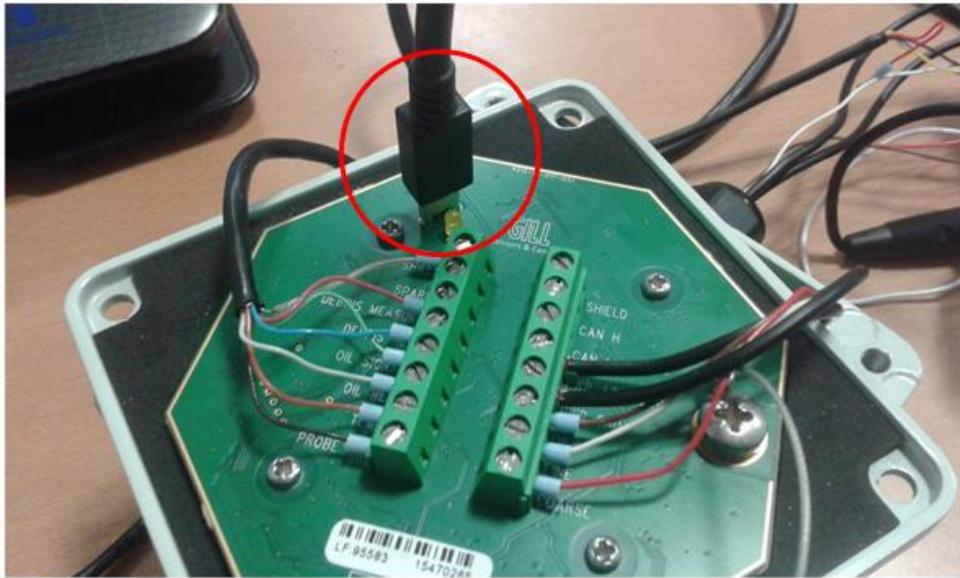


Figura 25. Conexión del módulo del control electrónico al PC.

Se instaló el software de configuración para el sensor Gill 2.



Figura. 26. Software del sensor Gill 2.

3.1.2.1 Pestaña tipo de sensor

Se seleccionó Sensor > Configure, desplegándose la siguiente ventana **Figura. 27.**

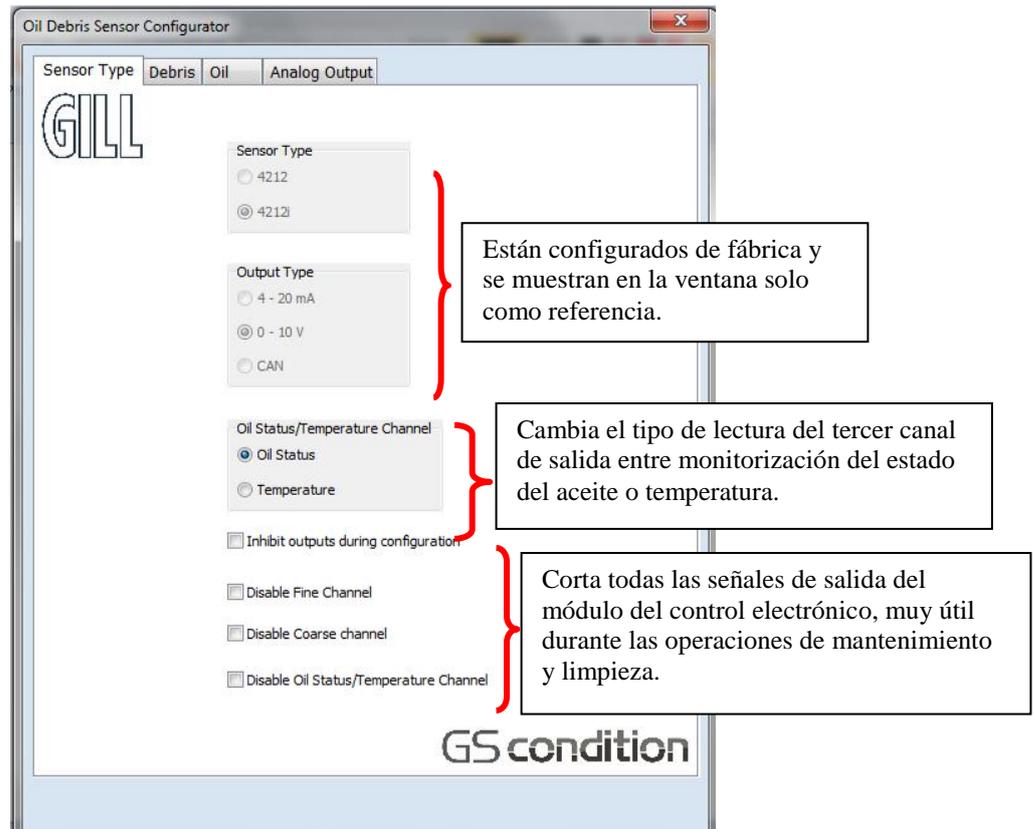


Figura. 27. Despliegue de pestaña “Sensor type”.

3.1.2.2 Pestaña partículas de desgaste

A continuación se desplegó la pestaña “Debris”.

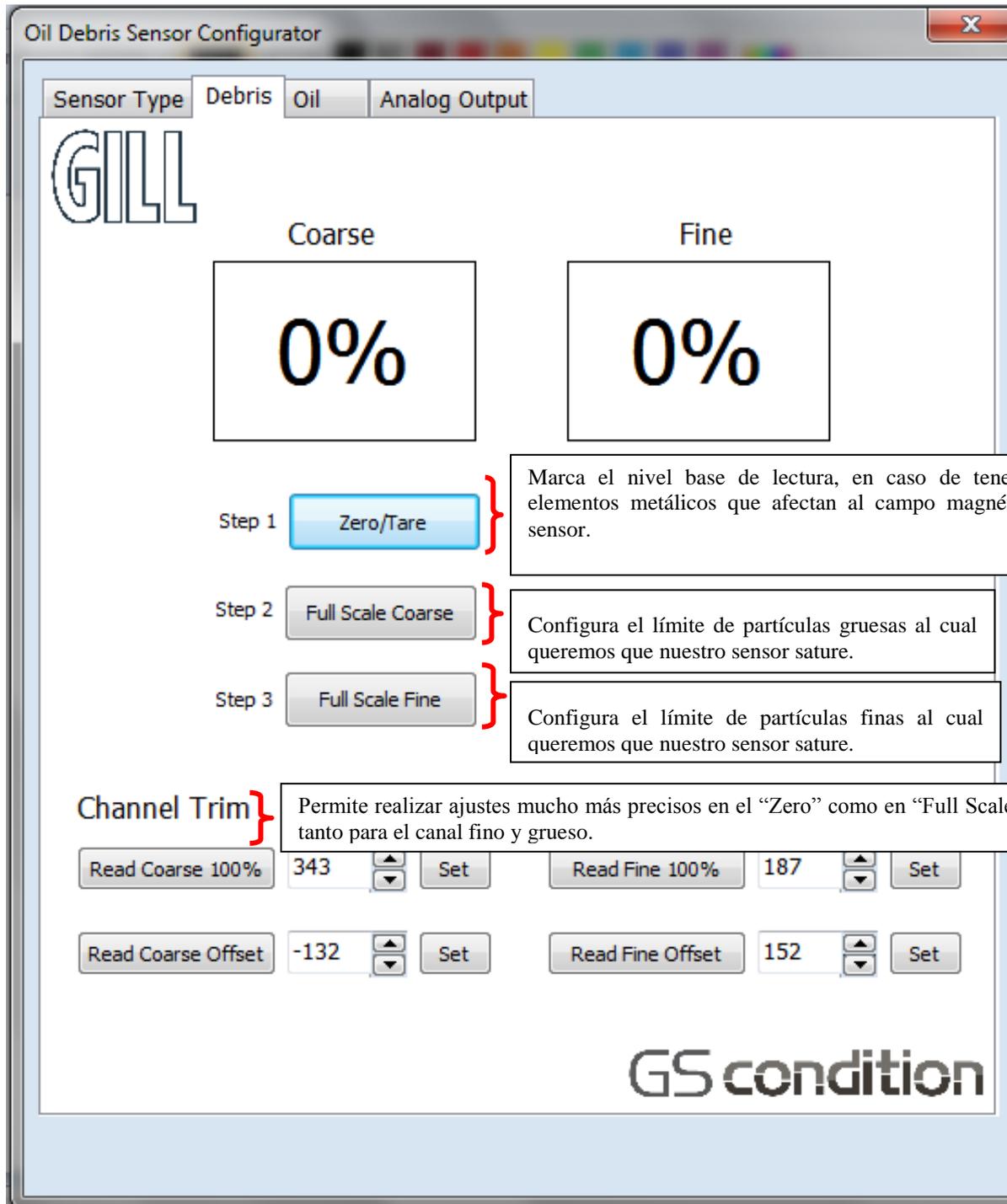


Figura 28. Despliegue de la pestaña “Debris”.

3.1.2.2.1 Calibración del canal fino y grueso

Para realizar la calibración del sensor Gill 2, con respecto a las partículas:

- Primero se mantuvo al sensor alejado de cualquier elemento metálico y se presionó Zero/Tare.

Nota: Este procedimiento es recomendado hacerlo al empezar y culminar cada configuración.



Figura. 29. Tarado o Acerado del sensor.

- Segundo se colocó el sensor sobre la última escala de la regleta de calibración proporcionada por la empresa fabricante del sensor “Coarse iron ball bearing- 2mm” y luego se presionó “Full Scale Coarse”.

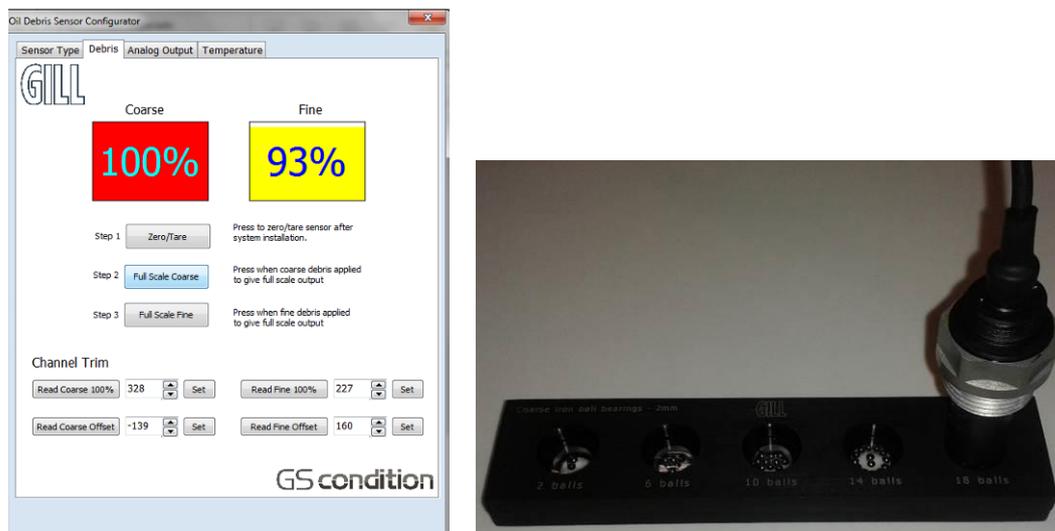


Figura. 30. Calibración del canal grueso.

Nota: El canal fino se ve afectado por las partículas esféricas de la regleta.

- Tercero se colocó el sensor sobre la última escala de la regleta de calibración proporcionada por Gill “Fine iron fillings – 0,125 to 0,3 mm” y luego se presionó “Full Scale Fine”.

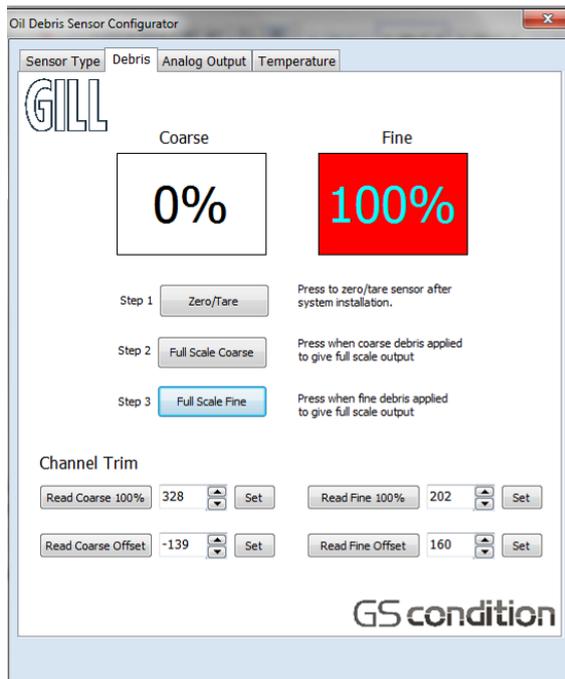


Figura. 31. Calibración del canal fino.

Nota: El canal grueso no se ve afectado por las partículas finas de la regleta.

- Cuarto: finalmente se presionó “Zero/Tare” quedando de esta manera calibrado el sensor “Oil Condition Monitoring”.

3.1.2.3 Pestaña estado del aceite

Se desplegó la pestaña “Oil”, donde se miden las propiedades dieléctricas de los líquidos que rodean al elemento del sensor. Esta señal es usada para proveer información acerca de cambios dieléctricos ocasionados al quedarse sin aceite debido a fugas, al fin de la vida útil del lubricante, o a la contaminación por agua.

Oil Debris Sensor Configurator

Sensor Type | Debris | **Oil** | Analog Output

GILL

Oil Upper threshold	1015	Set	Establece en el sensor la condición sin aceite
Oil Lower threshold	985	Set	
Oil Filter time (seconds)	1.00	Set	Establece el fin de la vida de un aceite lubricante o determinar la presencia de contaminación por agua.
Oil Reference	1083	Set	

Previene falsas alarmas por salpicadura, por funcionamiento propio de la máquina donde el elemento no se encuentre completamente en contacto con el aceite.

Oil Status
1007
Set Oil Status Reference

GS condition

Figura. 32. Despliegue de la pestaña “Oil”.

A continuación se pueden apreciar algunos números de referencia que se encuentran en el manual de Gill, resaltado en rojo el número de referencia para el aceite más similar al utilizado en la prueba.

<i>Reference Media</i>	<i>Approximate Raw Oil Reference number</i>
Hydraulic Oil, mineral based, Comma LIC10	1815
Gear Oil, Hypoid EP, Castrol EP80W	1808
Mineral Oil, engine lubricant, Total Quartz 5000 15W-40	1807
Semi-synthetic Oil, mineral blend, Mobil Super 2000 X1 10W-40	1808
Synthetic ester oil, fully synthetic, Mobil 1 0W-40	1811
PAO Oil, fully synthetic, Behr Hella PAO Oil 68	1815
PAG Oil, fully synthetic, Behr Hella PAG Oil	1780
Air	1846
Tap Water	1696

Tabla 4. Números de referencia para algunos aceites comerciales.

Nota: Los números de los aceites de referencia son sólo proporcionados como una guía, éstos deberán ser confirmados con las muestras actuales de aceite.

3.1.2.3.1 Calibración del canal estado del aceite

Para realizar la calibración del sensor Gill 2, con respecto a las condiciones del aceite:

- Primero se estableció el valor de referencia sumergiendo el sensor completamente sobre aceite nuevo. Una vez estabilizada la lectura del sensor se presionó “Set Oil Status Reference” quedando el aceite nuevo normalizado a 1000.

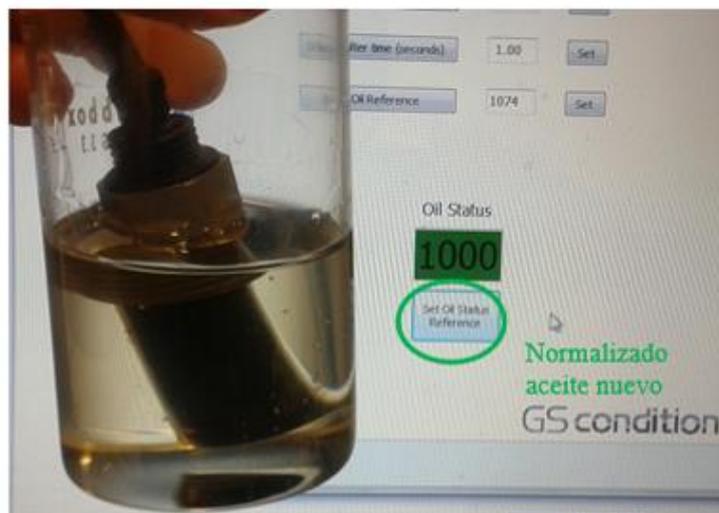


Figura. 33. Normalización del aceite nuevo Renolin.

- Segundo se retiró el sensor del baño de aceite dejándolo suspendido un tiempo prudencial, para escurrir el aceite.



Figura. 34. Sensor suspendido.

- Tercero se anotó por teclado en el casillero “Oil Upper Threshold” el valor intermedio entre sensor seco y sensor sumergido en aceite nuevo.

Nota: el valor debe estar entre aceite nuevo (1000) y el valor sensor seco (>1000).



Figura. 35. Número de referencia para establecer la condición sensor sin aceite.

- Cuarto para establecer la condición presencia de agua, se sumergió el sensor sobre una muestra contaminada, y se ingresó por teclado el valor que marcó “Oil status”.

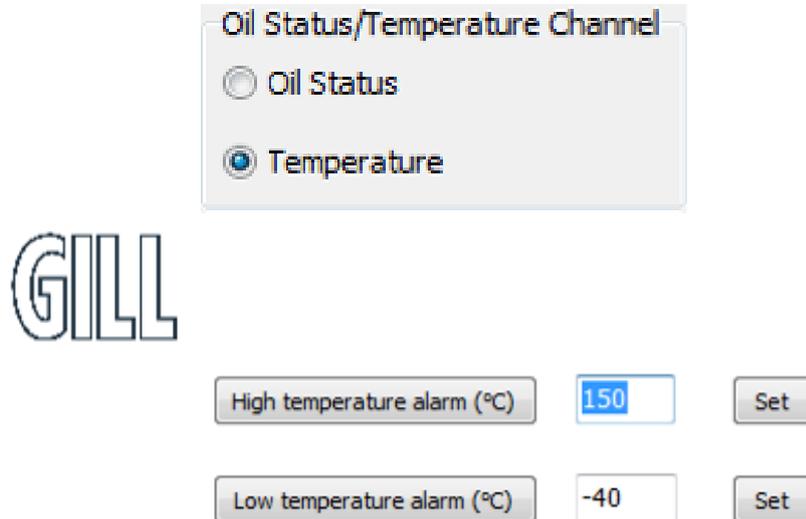
Nota: el valor debe estar entre la normalización del aceite nuevo (1000) y la condición fin de la vida del aceite o presencia de agua (<1000).



Figura. 36 Establecimiento de la condición aceite contaminado por agua.

3.1.2.3.2 Calibracion del canal estado del aceite respecto a la temperatura

Otra opción de medida que nos ofrece este sensor es la temperatura, una señal de alarma puede ser ajustada para identificar los límites altos y bajos de temperatura según se requiera, solamente se tiene que ingresar el valor deseado y pulsar “set”.



The screenshot shows the 'Oil Status/Temperature Channel' configuration window. It has two radio buttons: 'Oil Status' (unselected) and 'Temperature' (selected). Below this is the 'GILL' logo. There are two rows of controls for temperature alarms. The first row is for the 'High temperature alarm (°C)', with a text input field containing '150' and a 'Set' button. The second row is for the 'Low temperature alarm (°C)', with a text input field containing '-40' and a 'Set' button.

Figura. 37. Establecimiento de los límites de temperatura.

Nota: La temperatura de salida no entrega una respuesta lineal es decir sólo muestra dos valores de voltaje Zero y Full.

3.1.2.4 Apartado salidas analógicas

Se abrió la última pestaña “Analog Outputs”

Sensor Type | **Debris** | **Oil** | **Analog Output**

GILL

Error Level	0.00	El nivel del canal de salida en estado de error puede ser ajustado, por el usuario, para identificar un fallo del mismo. Esto se aplica para los tres canales.
Zero Level	1.00	El nivel de los canales de salida pueden ser ajustados por el usuario para identificar 0 % presencia de partículas.
Full Scale Level	10.00	El nivel de los canales de salida puede ser ajustado por el usuario para identificar 100 % de saturación por presencia de partículas.
Inhibit Level	0.48	El “Inhibit Level” puede ser ajustado por el usuario para cortar la señal de los canales de salida, durante operaciones de mantenimiento y limpieza.

GS condition

Figura. 38. Despliegue de la pestaña “Analog Outputs”.

3.1.3 Caracterización de la respuesta del sensor en vacío.

Para realizar la caracterización de la respuesta y sensibilidad del sistema en vacío, se probó el sensor haciendo incidir sobre él un intervalo de masas de 0,01 hasta 0,4 gramos de partículas de diferentes tamaños. Este trabajo se ha realizado partiendo de partículas muy pequeñas, representativas de un desgaste inicial, hasta llegar a partículas de mayor tamaño que serían producidas por un fallo avanzado, lo cual originaría daños severos al equipo.



Figura 39. Diferentes tipologías de muestras a usar.

3.1.3.1 Análisis de partículas metálicas

Para partir de una base fiel, con respecto a las formas y tamaños de las partículas, se realizó un muestreo representativo de las mismas analizándolas en el microscopio.

3.1.3.1.1 Iron powder, spherical shaped, <math><10\mu\text{m}</math>.

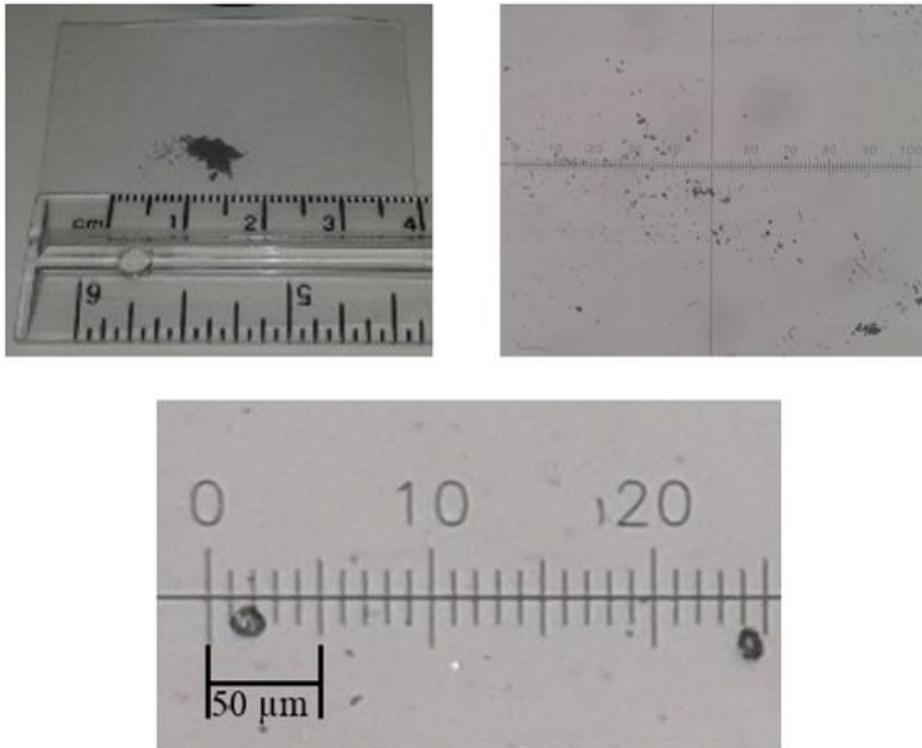


Figura 40. Partículas <math><10\mu\text{m}</math> de forma esférica.

3.1.3.1.2 Iron powder, spherical shaped, <math><44 \mu\text{m}</math>.

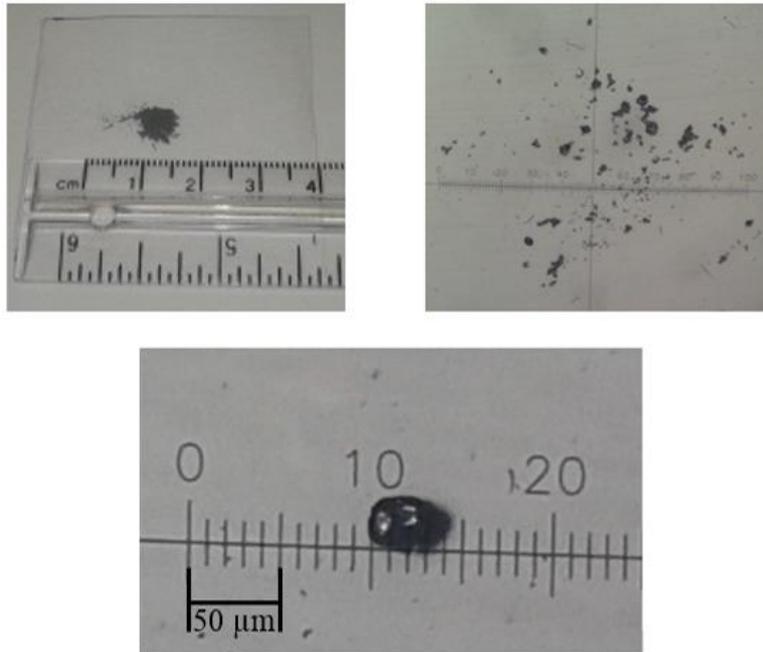


Figura 41. Partícules <math><44 \mu\text{m}</math> de forma esfèrica.

3.1.3.1.3 Iron sponge, spherical shaped, 149-290 μm .

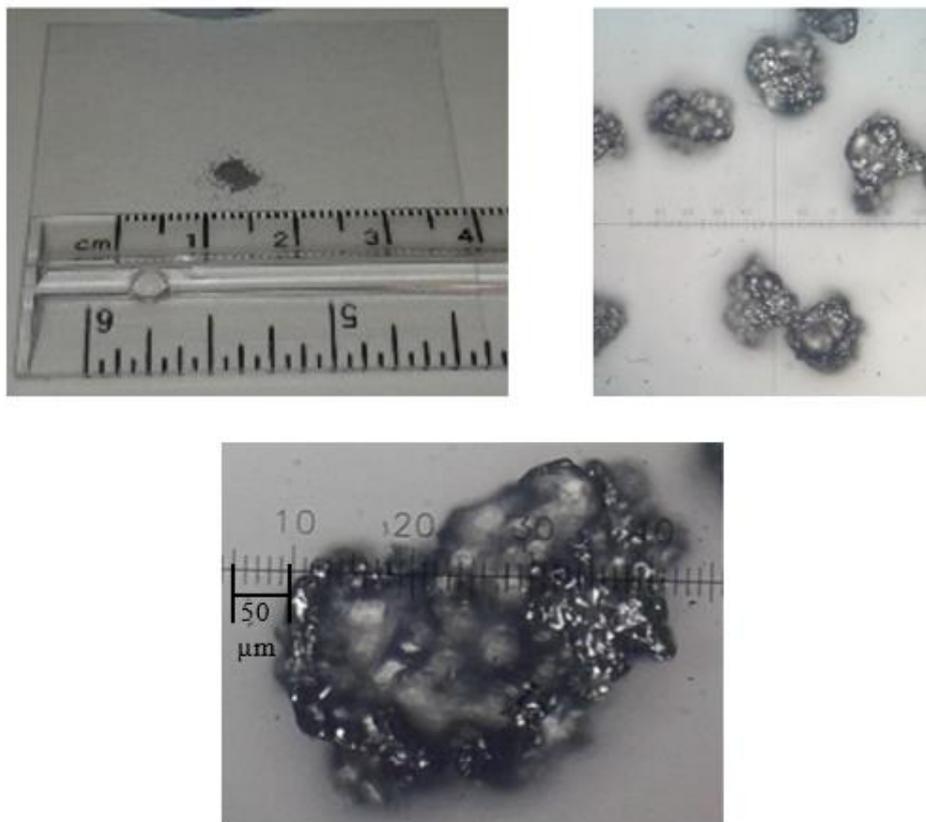


Figura 42. Partícules de 149-290 μm de forma esfèrica irregular.

3.1.3.1.4 Iron powder, irregularly shaped, 125-250 μm .

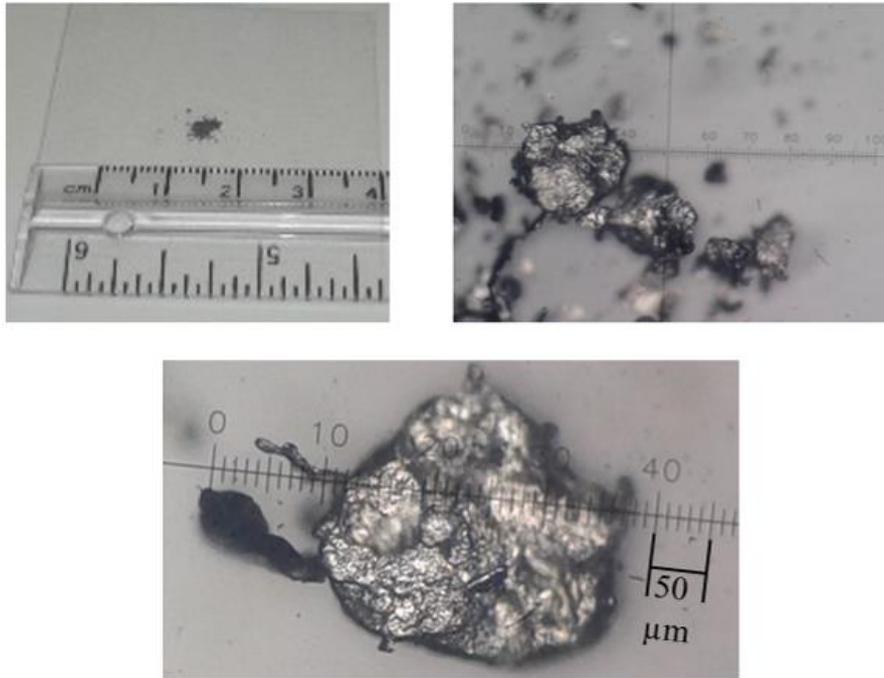


Figura 43. Partícules de 125-250 μm de forma irregular.

3.1.3.1.5 Iron powder, irregularly shaped, 250-315 μm .

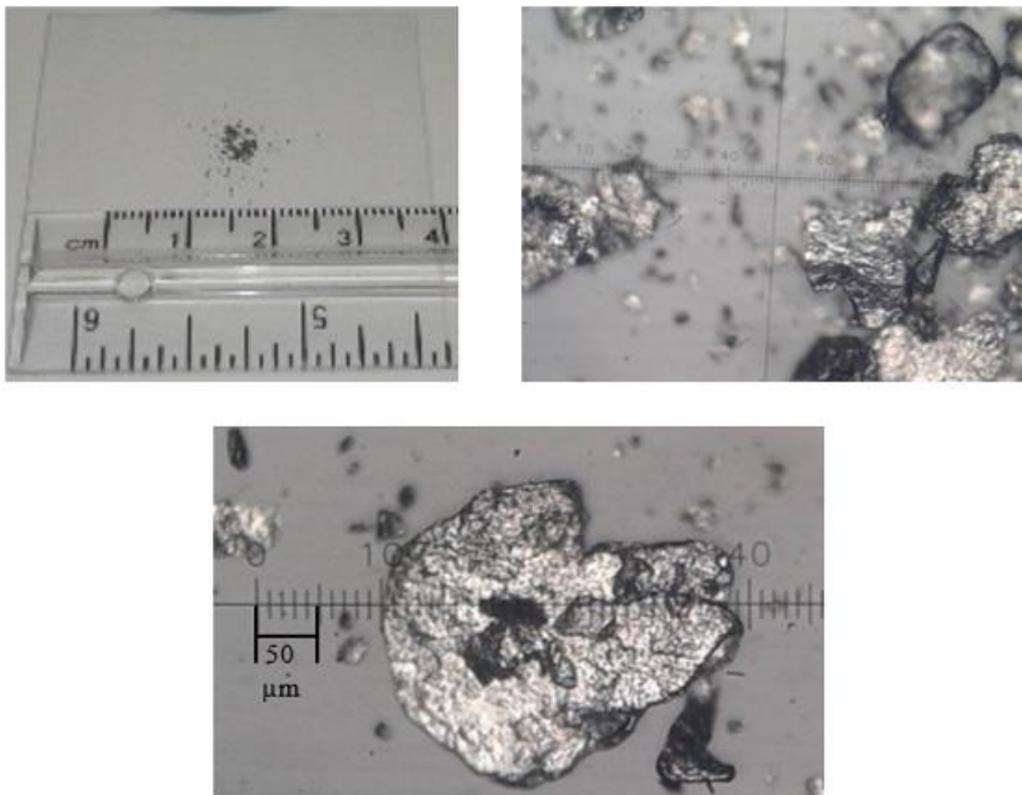


Figura 44. Partícules de 250-315 μm de forma irregular.

3.1.3.1.6 Iron powder, spherical shaped, 125-250 μm E.

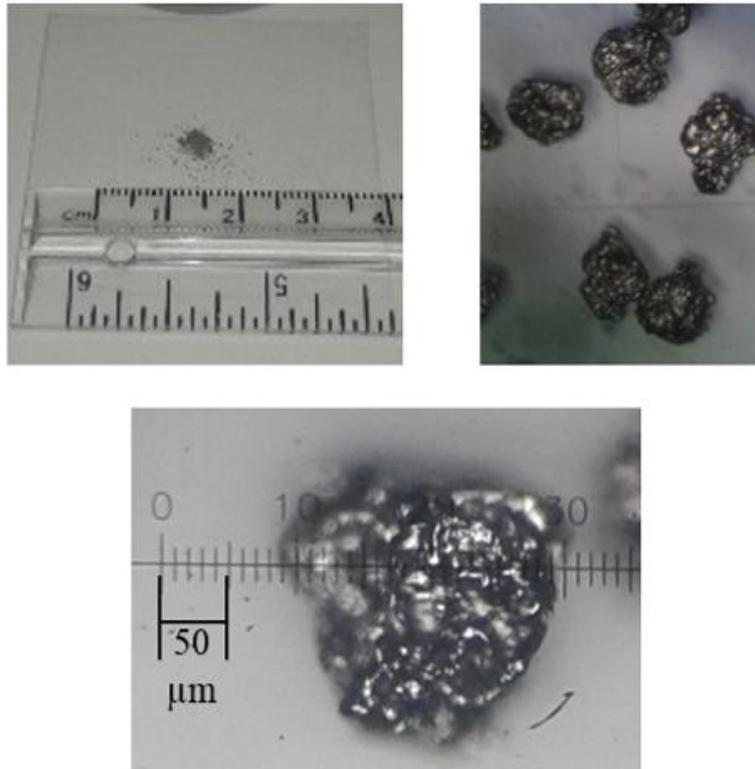


Figura 45. Partícula de 125-250 μm de forma esférica.

3.1.3.1.7 Iron powder, spherical shaped, 250-315 μm E.

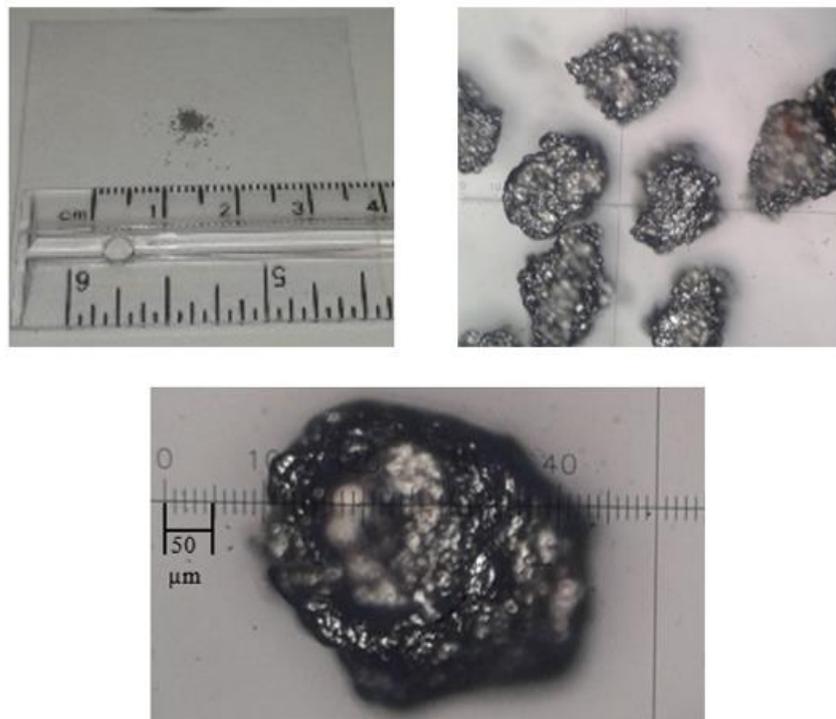


Figura 46. Partículas de 250-315 μm esférica.

3.1.3.1.8 Iron powder, spherical shaped, 315-630 μm .

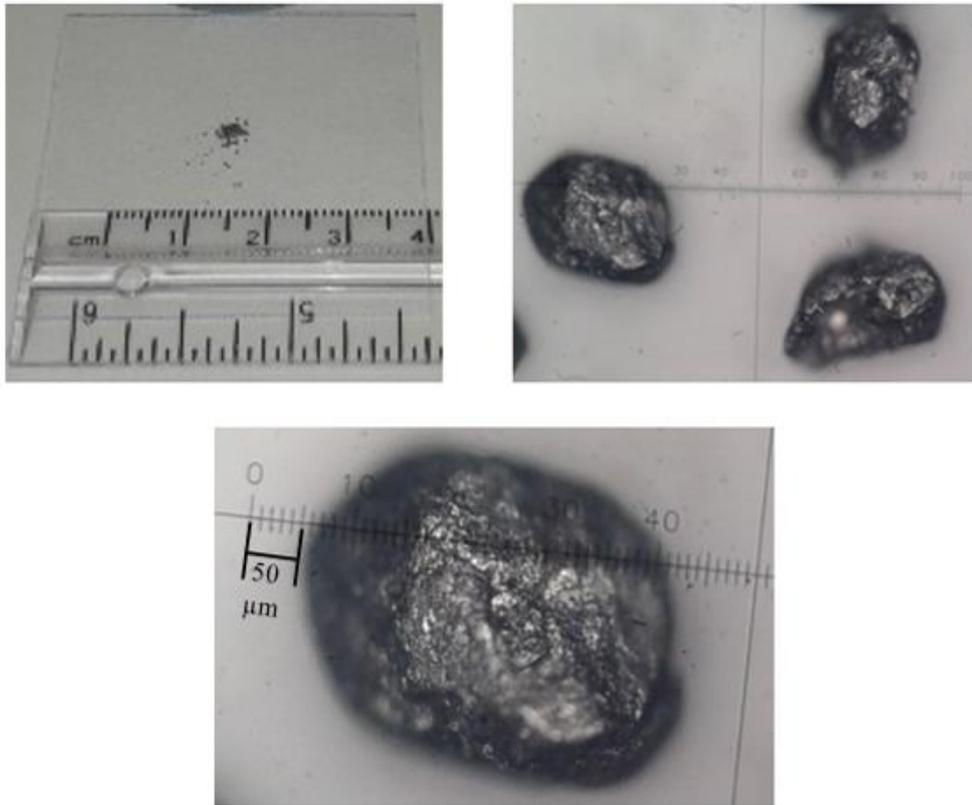


Figura 47. Partículas de 315-630 μm de forma esférica.

3.1.3.1.9 Iron granules, amorphous shaped, 1-2 mm.

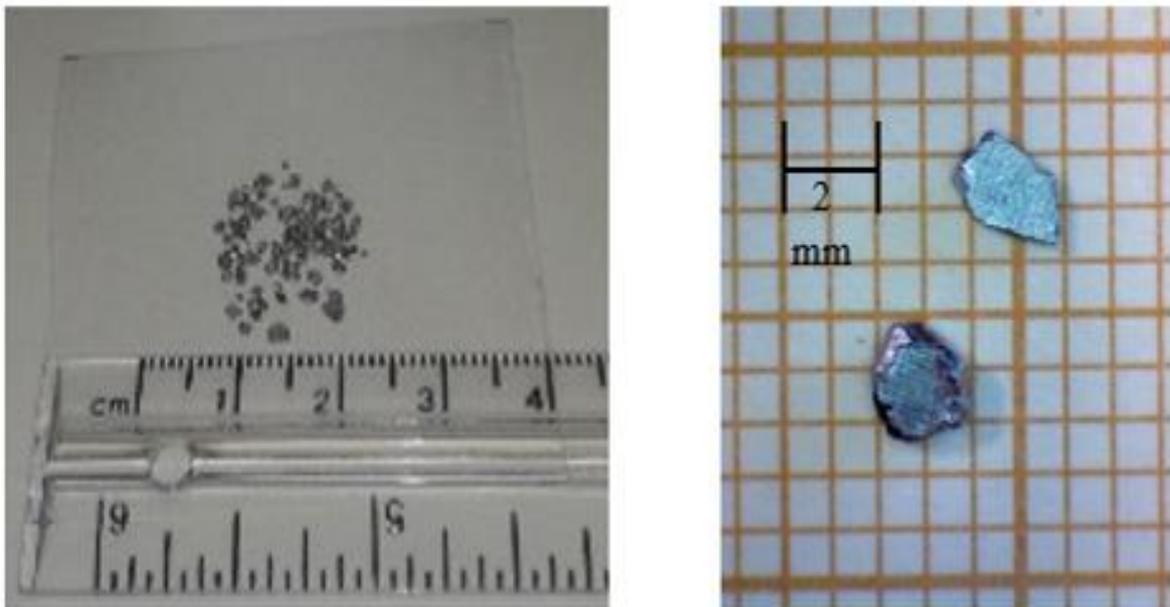


Figura 48. Partículas de 1-2 mm de forma amorfa.

3.1.3.1.10 Iron slug, cylindrical shaped, 3.175 mm x 3.175 mm.

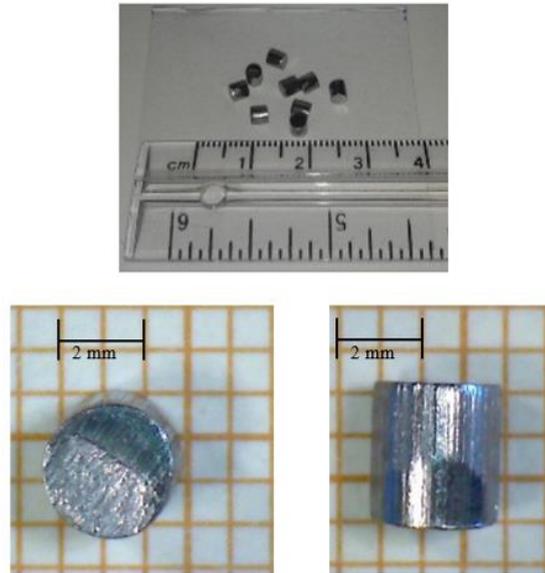


Figura 49. Partícula de 3,175 mm de forma cilíndrica.

3.1.3.1.11 Iron pieces, irregularly shaped, <12mm.

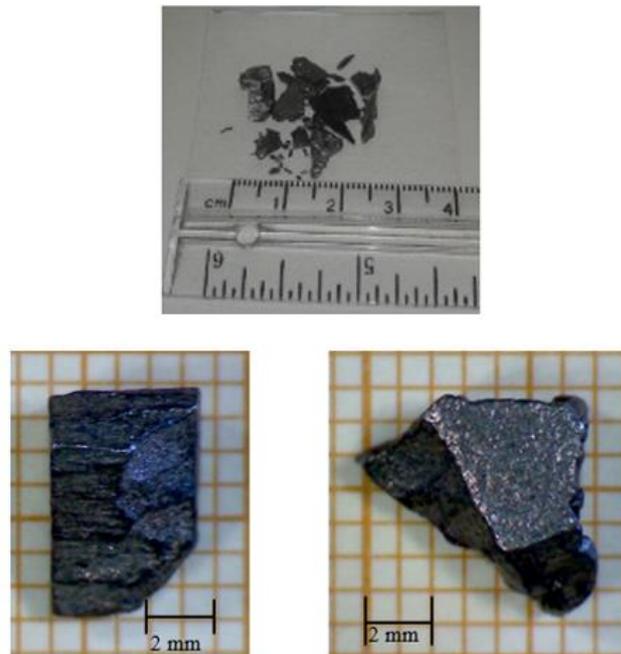


Figura. 50. Partículas < 12 mm de forma irregular.

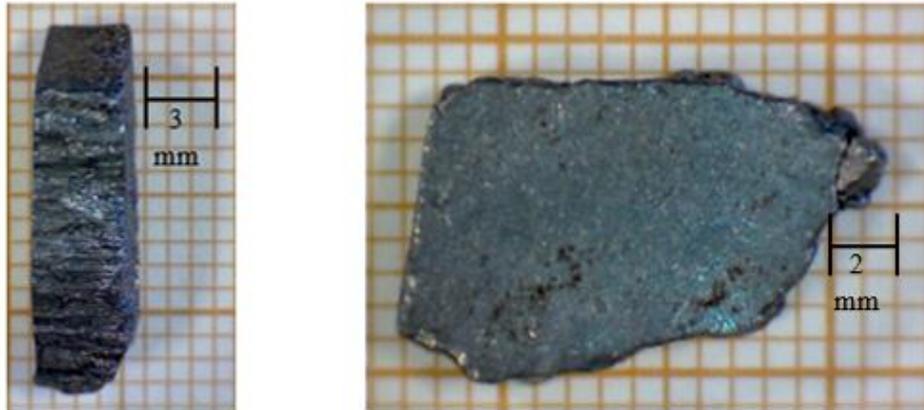


Figura 51. Partículas <12 mm de forma irregular.

Finalmente quedó constituido el listado de los diferentes tamaños y formas de partículas a utilizar, mostrado en la **Tabla 5**.

Número	Tipología de partículas de (Fe)
1	<10 μ m
2	<44 μ m
3	149-297 μ m
4	125-250 μ m
5	250-315 μ m
6	125-250 μ m E
7	250-315 μ m E
8	315-630 μ m
9	1-2 mm
10	3.175 mm
11	<12 mm

Tabla 5. Partículas a utilizar.

3.1.3.2 Preparación de las muestras para las pruebas en vacío.

Habiendo comprobado todos los tamaños y tipologías a usar, se procedió a preparar las distintas masas, para lo cual se cortaron unos pequeños recuadros de papel de cinco por cinco centímetros, para ahí colocar la muestra pesada de cada una de las distintas tipologías mencionadas.



Figura 52. Preparación de las muestras.

Seguidamente, se pesaron las distintas partículas, realizando nueve procedimientos por cada muestra de partículas. Las masas a tomar fueron de: 0,01-0,03-0,05-0,07-0,09-0,1-0,2-0,3-0,4 gramos, exceptuando las dos últimas tipologías, 3,175 mm y <12 mm, ya que por su tamaño no fue posible partir de masas tan pequeñas, con lo que para dichas muestras se tuvo en cuenta otra escala.



Figura 53. Pesado de las distintas muestras.

Se plegó el papel de tal manera que las partículas quedaran encerradas en un recuadro.



Figura 54. Plegado de los sobres.

Finalmente se rotuló la información correspondiente al: número, peso, tamaño y tipología de la muestra.

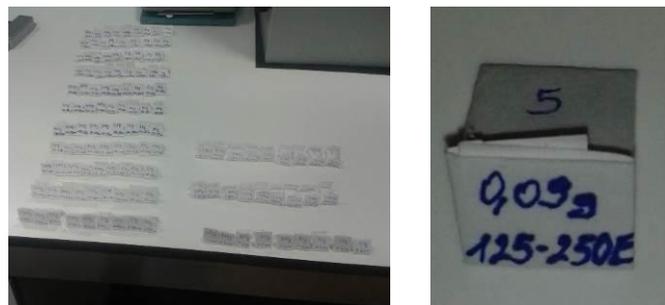


Figura 55. Rotulado de las muestras.

3.1.3.2.1 Verificación de la influencia en la señal del sensor por usar papel.

En otra prueba se revisó el grado de error en la señal del sensor, que puede ocurrir por usar papel para contener la masa de muestra.

Se midió la señal del canal fino con una masa de 0,16 de gramos usando la tipología 1-2 mm, colocando papel entre la masa de partículas y el sensor, y luego haciendo incidir la masa de partículas directamente contra el sensor.



Figura 56. Verificación de la señal por interponer una lámina de papel.

- Como se puede apreciar en la **Figura 56**, a la luz de los resultados no existió una diferencia significativa al colocar una lámina de papel entre la masa de muestra y el sensor.
- Se percibió una variación en la medida cuando las partículas eran ordenadas en diferentes posiciones, pues como se observa en la **Figura 56**, siendo la misma muestra, simplemente al ser ordenada en otra posición ésta afecta a la medida del sensor.
- Dicho fenómeno se tomó en cuenta a la hora de realizar las siguientes pruebas.

3.1.3.3 Toma de datos mediante la utilización de los data logger.

Se abrió el programa Tinytag Explorer, para seguidamente conectar mediante puerto USB al primer data logger y proceder con su configuración de almacenaje.



Figura 57. Conexión a PC para la configuración de los data logger.

La configuración del muestreo quedó determinada de la siguiente manera, como se muestra en la **Figura 58**.

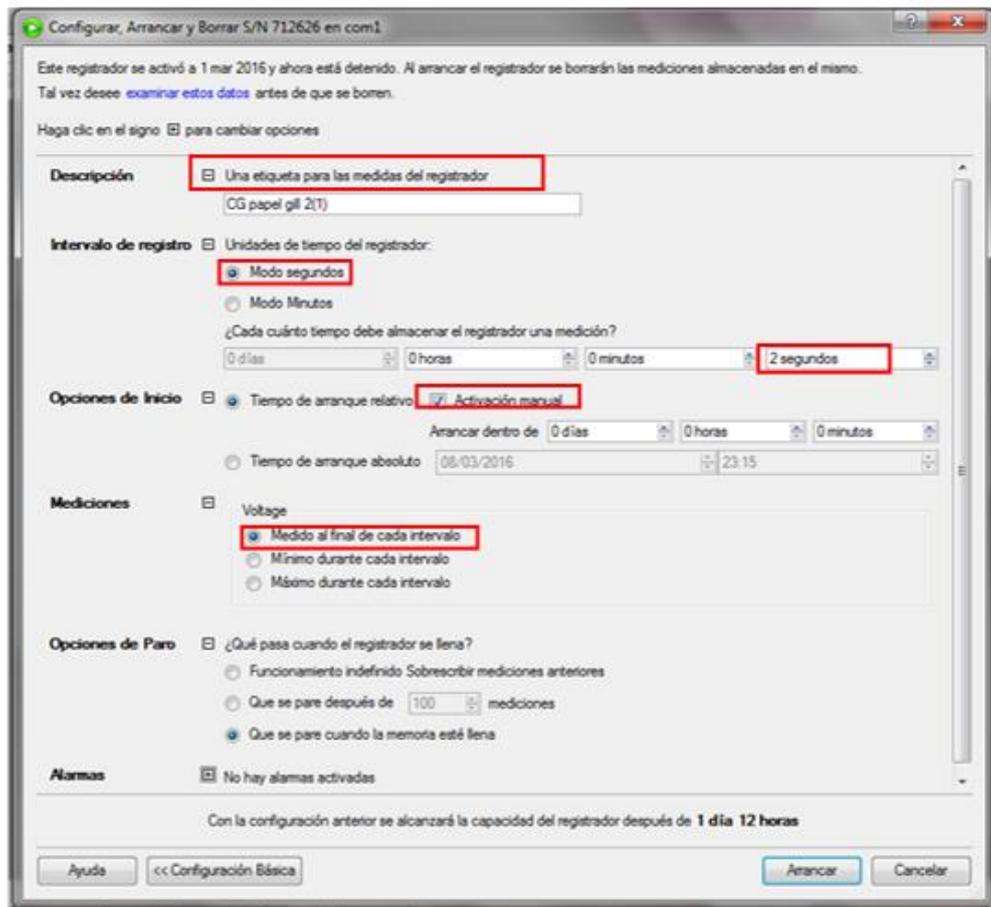


Figura 58. Configuración del muestreo.

De igual manera, se configuró el segundo data logger cambiando el nombre de registro para diferenciar el canal del cual obtiene la información.

3.1.3.4 Resultados de los ensayos con papel.

Una vez lista la configuración de los data logger se inició la lectura de las diferentes señales, haciendo incidir la muestra en el sensor por un tiempo de 40 segundos. Después de haber hecho algunos ensayos, dicho tiempo pareció prudente para obtener una lectura estable en la que se pudiera obviar las fluctuaciones, producto del cambio de muestra entre lectura y lectura.



Figura 59. Toma de lectura de las muestras.

Una vez finalizada la lectura de todas las muestras, se exportó toda la información de ambos canales a un fichero Excel cuyos valores fueron procesados. A continuación se puede observar los datos del canal fino en la **Tabla 6**.

Canal Fino											
masa	CF <10µm	CF <44 µm	CF 149-297 µm	CF 125-250 µm	CF 250-315 µm	CF 125-250 µm E	CF 250-315 µm E	CF 315-630 µm	CF 1-2 mm	CF(3.175 mm)	CF(<12 mm)
0.01	1.42	1.14	1.18	1.11	1.24	1.18	1.34	1.20	1.36		
0.03	1.69	1.76	1.49	2.82	1.20	1.34	1.96	2.23	2.10		
0.05	1.96	1.84	1.70	3.20	2.20	1.94	2.51	2.60	2.87		
0.07	2.27	2.31	2.70	3.61	3.53	3.20	3.50	4.30	3.91		
0.09	2.50	2.80	3.37	4.48	4.20	4.16	5.20	5.08	4.75		
0.1	2.70	3.30	3.76	5.20	4.80	4.80	5.50	5.50	5.20		
0.2	6.34	7.65	7.02	7.53	6.00	7.15	8.34	7.20	7.84		
0.3	7.90	9.30	9.50	8.50	8.43	10.00	10.00	10.00	10.00		
0.4	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00		
0.181										2.47	
0.357										3.65	
0.54										3.76	
0.574											5.29
0.725										4.24	
0.907										4.82	
0.972											6.00
1.077										5.69	
1.259										6.53	
1.352											8.53
1.441										7.20	
1.636										8.30	
2.324											7.78
2.315											10.00
2.972											10.00
3.298											10.00
3.639											10.00
4.741											10.00

Tabla 6. Caracterización de la respuesta del sensor en vacío para el canal fino.

A continuación se graficó la caracterización de la respuesta del sensor en vacío para el canal fino.

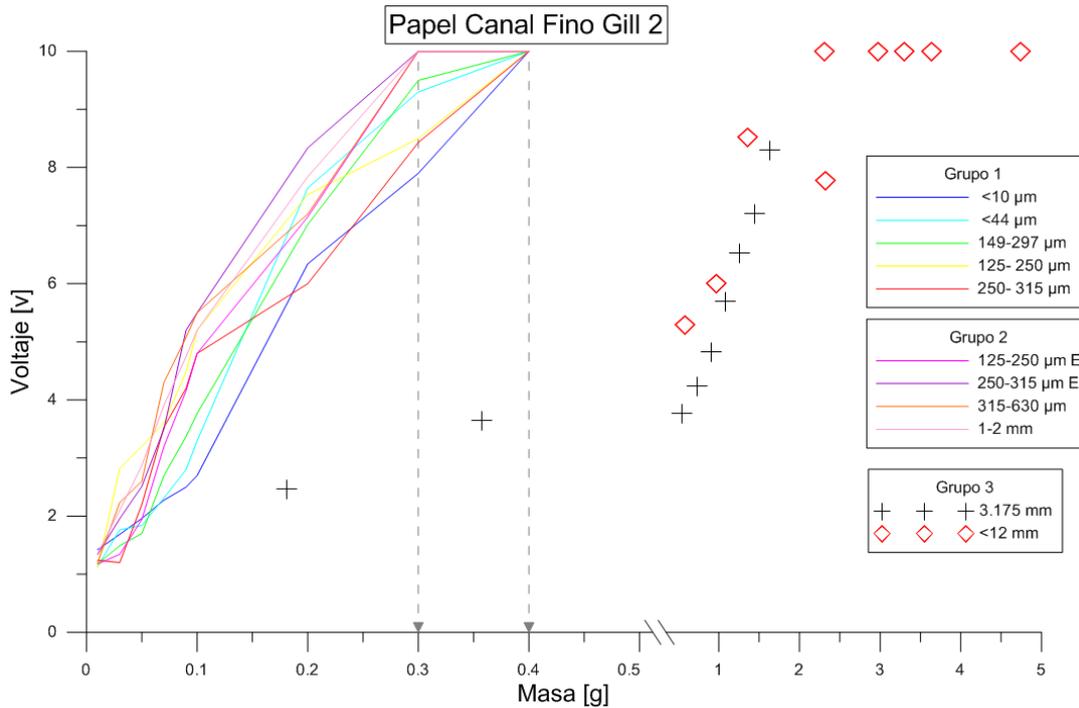


Figura 60. Lectura del canal fino metodología sobre de papel.

- Como se puede apreciar en la **Figura 60**, el canal fino no genera un orden de las partículas en función de su tamaño.
- Se puede distinguir principalmente tres grupos.
 - El primer grupo, muestras cuyos tamaños de partículas son: <10 µm, <44 µm, 149-297 µm, 125-250 µm y, 250-315 µm saturan al canal fino en 0,4 gramos.

- El segundo grupo cuyos tamaños de partículas son: 125 250 μm E, 250-315 μm E, 315-630 μm , 1-2 mm, son partículas que necesitan menor cantidad de masa para saturar al canal fino, 0,3 gramos.
- Finalmente, tenemos un tercer grupo, las partículas gruesas: 3,175 mm y, <12 mm que necesitan estar en gran cantidad para llegar a saturar el canal fino.

A continuación se pueden apreciar los datos procesados del canal grueso.

Canal grueso											
masa	CG <10 μm	CG <44 μm	CG 149-297 μm	CG 125-250 μm	CG 250-315 μm	CG 125-250 μm E	CG 250-315 μm E	CG 315-630 μm	CG 1-2 mm	CG (3.175 mm)	CG (<12 mm)
0.01	1.02	1.03	1.03	1.04	1.06	1.05	1.09	1.09	1.09	1.28	
0.03	1.02	1.02	1.02	1.08	1.09	1.08	1.13	1.21	1.50		
0.05	1.02	1.02	1.02	1.05	1.08	1.10	1.17	1.09	1.86		
0.07	1.02	1.02	1.02	1.10	1.13	1.09	1.11	1.23	2.33		
0.09	1.02	1.02	1.02	1.14	1.10	1.18	1.11	1.25	2.40		
0.1	1.02	1.02	1.02	1.11	1.21	1.14	1.16	1.31	2.52		
0.2	1.02	1.02	1.02	1.14	1.34	1.28	1.48	1.39	3.74		
0.3	1.02	1.02	1.02	1.18	1.44	1.33	1.66	1.56	5.31		
0.4	1.02	1.02	1.02	1.21	1.48	1.33	1.62	1.86	5.95		
0.161										4.65	
0.357										3.06	
0.54										3.98	
0.574											10.00
0.725										9.99	
0.907										10.00	
0.972											10.00
1.077										10.00	
1.259										10.00	
1.352											10.00
1.441										10.00	
1.636										10.00	
2.324											10.00
2.315											10.00
2.972											10.00
3.298											10.00
3.639											10.00
4.741											10.00

Tabla 7. Caracterización de la respuesta del sensor en vacío canal grueso.

A continuación se graficó la caracterización de la respuesta del sensor en vacío para el canal grueso.

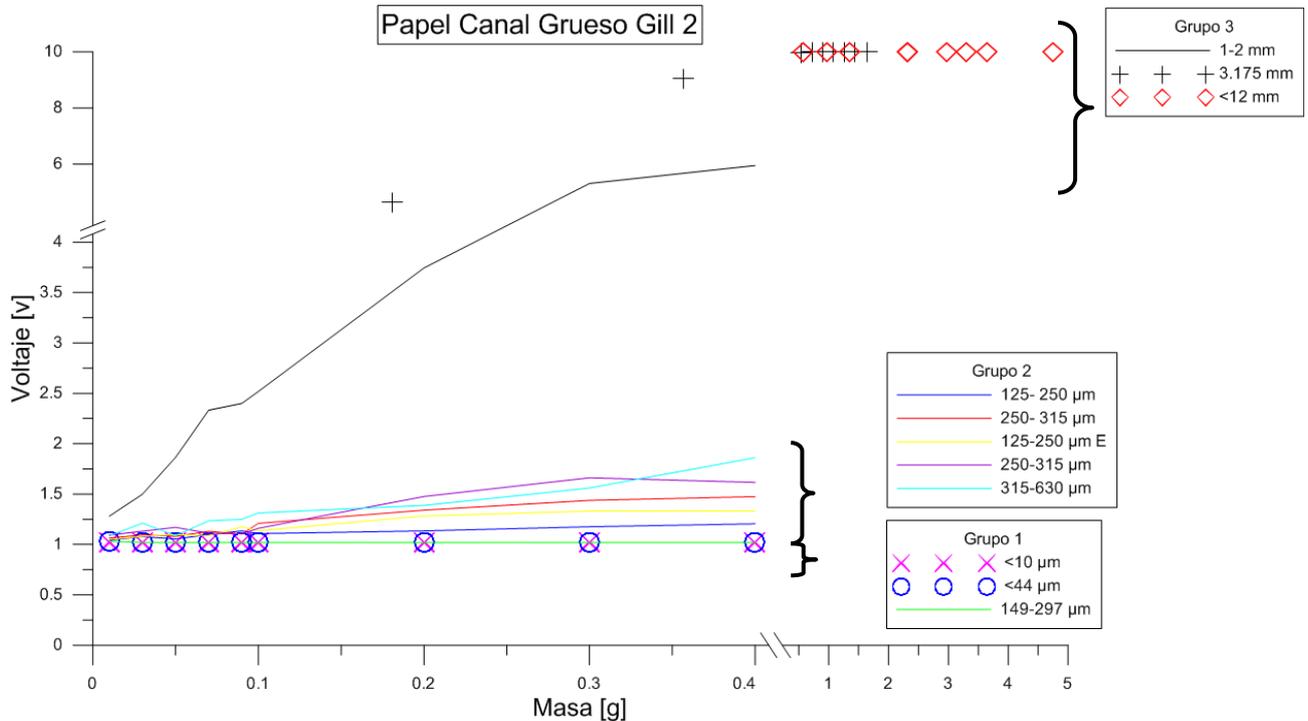


Figura 61. Lectura del canal grueso metodología sobre de papel.

- Como se puede apreciar en la **Figura 61** el resultado se puede dividir en tres grupos:
 - El primer grupo, las muestras cuyos tamaños de partículas son: $<10\ \mu\text{m}$, $<44\ \mu\text{m}$, 149-297 μm . Estas muestras no tuvieron ninguna influencia en el canal grueso, sin importar la masa, se mantuvieron en el “ZERO” de calibración.
 - El segundo grupo, cuyos tamaños de partículas son: 125-250 μm , 250-315 μm , 125 250 $\mu\text{m E}$, 250-315 $\mu\text{m E}$, 315-630 μm , en este caso la masa si comienza a influenciar en la lectura del canal grueso teniendo una tendencia ascendente.
 - Finalmente, el tercer grupo lo conforman las muestras de partículas de: 1-2 mm, 3,175 mm y $<12\ \text{mm}$, al igual que el grupo anterior se observa como la masa influencia la señal de este canal, que en el caso las dos tipologías más grandes (3,175 mm y $<12\ \text{mm}$) éste llega a saturar.

Las principales conclusiones de esta prueba fueron que se constató que era un sensor de detección másico, es decir, aumenta su valor dependiendo de la masa detectada por el sensor, no tanto por el número de partículas.

El canal fino, aparte de la limitación que tiene al censar partículas grandes, tiene una influencia en el desempeño del mismo, tanto respecto a la distribución de las masas, como a la forma en que éstas se ordenan al adherirse al sensor.

El canal grueso tiene mejor desempeño debido a que se puede diferenciar de mejor manera el comportamiento de las diferentes tipologías. Así, esta prueba dispuso una hoja de ruta con la cual poder analizar con mayor precisión los rangos donde se observan cambios en el comportamiento de la señal del sensor.

3.1.3.5 Medida con el método recipiente de vidrio

En vista de la influencia que tiene el orden de las partículas sobre la señal de los canales, se realizó un nuevo ensayo mucho más preciso denominado “método de recipiente de vidrio”, el cual permite que las partículas se ordenen libres al incidir sobre el sensor.

Dicho método consistió en colocar muestras pesadas de partículas en pequeños recipientes de vidrio y se hizo incidir sobre el sensor separando con una lámina de plástico, como se puede apreciar en la **Figura. 62**.

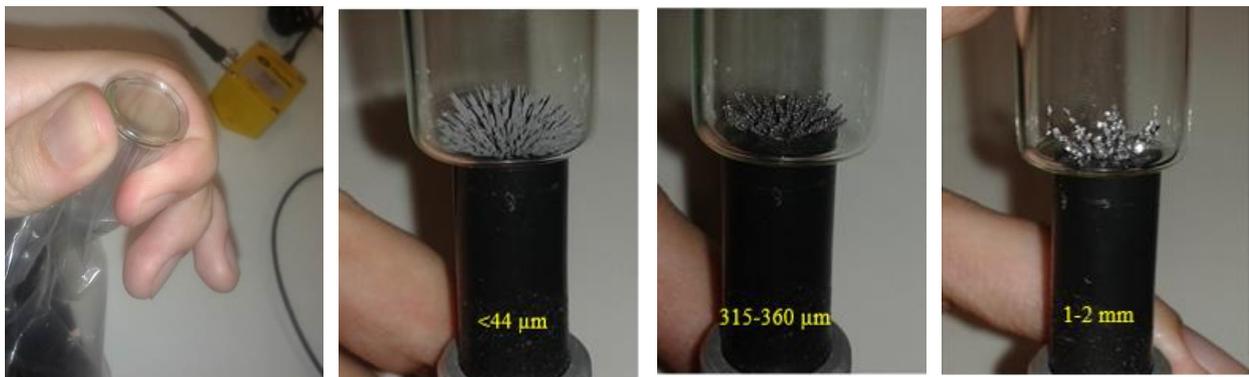


Figura. 62. Lectura de las distintas partículas usando el método del recipiente de vidrio.



Figura. 63. Muestras a usar el método del recipiente de vidrio

3.1.3.5.1 Lectura del canal fino

Para comprobar si la saturación del canal fino cambia respecto a la masa de las diferentes tipologías se realizó este método para las muestras que se pueden observar en la **Tabla 8**.

Se dispuso como límite superior 5 gramos debido a que ésta es la máxima masa que el imán puede atraer.

Previamente, como se observó en el apartado puesta en marcha del sensor, este fue calibrado con las regletas de calibración proporcionada por la empresa fabricante en la máxima posición.

	10	40	150	175	200	225	275	450	1000	1500	2000	2500	3530	5100
masa	<10 µm	<44 µm	149-297 µm	125-250 µm	250-315 µm	125-250 µmE	250-315 µmE	315-630 µm	1-2 mm	1.5 mm	2 mm	2.5 mm	3.175 mm	<12 mm
0	1.013	1.013	1.013	1.013	1.013	1.013	1.013	1.013	1.013	1.013	1.013	1.013	1.013	1.013
0.006	1.414	1.33	1.46	1.555	1.64	1.56	1.74	1.76	1.766	1.707				
0.016	1.744	1.82	1.96	2.115	2.03	2.21	2.31	2.26	2.272	1.827	1.917			
0.03	2.676	2.64	2.68	2.838	2.74	3.01	2.92	2.76	3.296	3.307	3.641	2.557		
0.1	5.186	4.62	5.04	5.576	6.23	6.13	6.34	6.41	5.771	5.402	5.244	4.975		
0.181													3.31	
0.2	6.91	6.673	7.068	8.218	8.720	9.406	9.405	9.222	8.546	8.428	7.422	7.338		
0.3	8.611	8.518	9.357	9.673	9.899	10.014	9.899	9.814	9.998	9.836	8.908	7.766		
0.357													4.53	
0.4	10.080	10.080	10.080	10.080	10.080	10.080	10.080	10.080	10.080	10.080	10.023	9.454		
0.54													5.13	
0.635														5.72
0.725														5.79
0.907														6.71
1	10.080	10.080	10.080	10.080	10.080	10.080	10.080	10.080	10.080	10.080	10.080	10.080		
1.077													7.36	
1.11														9.72
1.259													8.63	
1.441													8.89	
1.636													10.08	
1.697														10.08
2.196														10.08
2.852														10.08
3.339														10.08
3.831														10.08
4.32														10.08
4.953														10.08
5	10.080	10.080	10.080	10.080	10.080	10.080	10.080	10.080	10.080	10.080	10.080	10.080	10.080	10.08

Tabla 8. Lecturas con el método de recipientes de vidrio para el canal fino.

- Como se puede apreciar en la **Tabla 8**, resaltado de color rojo se muestra el punto donde satura el canal fino.
- El sensor satura con 0,4 gramos hasta alcanzar la tipología 1-2 mm, punto en el cual se observa que a medida que aumenta el diámetro se necesita mayor masa para llevarlo hasta el punto de saturación.

A continuación con los datos obtenidos en la metodología del recipiente de vidrio se graficó las curvas de comportamiento de las diferentes tipologías para el canal fino.

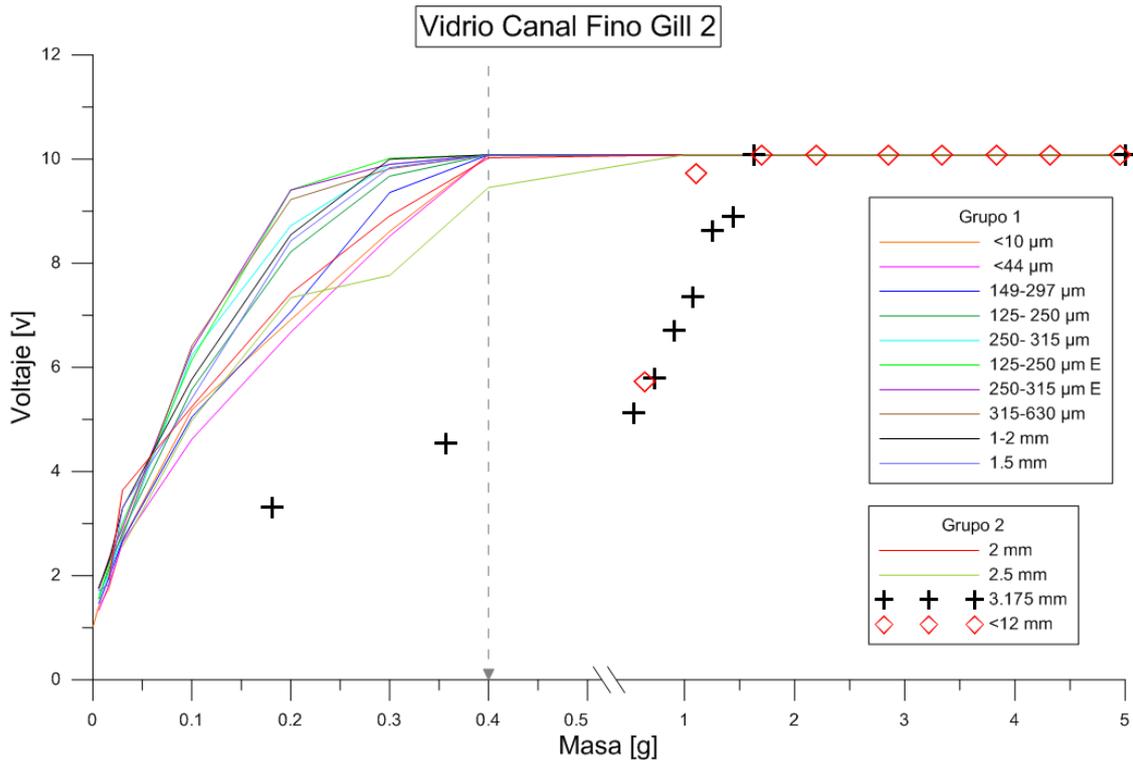


Figura. 64. Gráfica de la señal del canal fino mediante el método del recipiente de vidrio.

- Como se puede observar en la **Figura. 64**, para su análisis se distinguieron principalmente dos grupos.
- Para las tipologías: <10 μm , <44 μm , 149-297 μm , 125-250 μm , 250-315 μm , 125-250 μm E, 250-315 μm E, 315-630 μm , 1-2 mm y, 1,5 mm el punto de saturación se produce a 0,4 de gramos. Finalmente las tipologías: 2 mm, 2,5 mm, 3,175 mm, y <12mm, se observa como conforme va aumentando el tamaño de la tipología el sensor se necesita mayor masa para llegar a saturar el canal fino.

Para determinar qué clase de relación existe entre la señal del canal fino y las tipologías se tomó un valor fijo de masa y se hizo variar el diámetro de las tipologías.

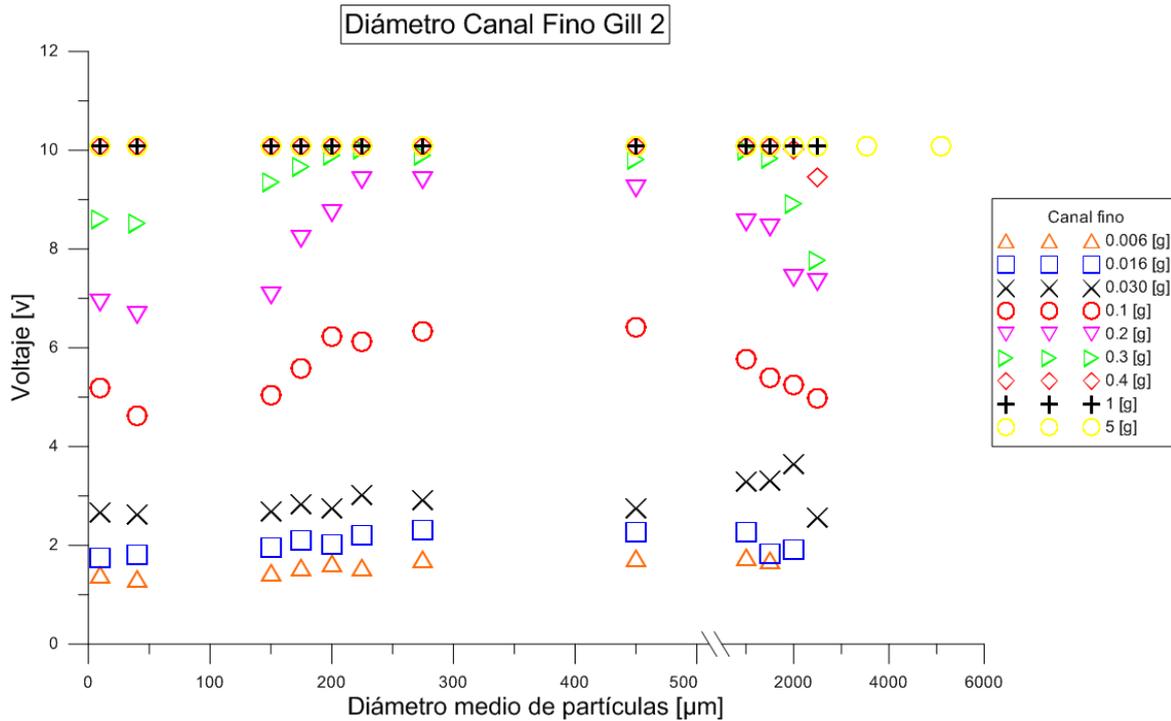
De la tipología 1-2 mm, se escogieron las partículas para representar los diámetros medios de partículas 1000 μm , 1500 μm y 2000 μm , mientras que de la tipología <12 mm se obtuvo el diámetro 2500 mm.

diámetro	0.006	0.016	0.030	0.1	0.2	0.3	0.4	1	5
0	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01
10	1.414	1.744	2.676	5.186	6.31	8.611	10.080	10.080	10.080
40	1.33	1.82	2.64	4.62	6.673	8.518	10.080	10.080	10.080
150	1.46	1.96	2.68	5.04	7.068	9.357	10.080	10.080	10.080
175	1.555	2.115	2.838	5.576	8.218	9.673	10.080	10.080	10.080
200	1.64	2.03	2.74	6.23	8.720	9.899	10.080	10.080	10.080
225	1.56	2.21	3.01	6.13	9.406	10.014	10.080	10.080	10.080
275	1.74	2.31	2.92	6.34	9.405	9.899	10.080	10.080	10.080
450	1.76	2.26	2.76	6.41	9.222	9.814	10.080	10.080	10.080
1000	1.766	2.272	3.296	5.771	8.546	9.998	10.080	10.080	10.080
1500	1.707	1.827	3.307	5.402	8.428	9.836	10.080	10.080	10.080
2000		1.917	3.641	5.244	7.422	8.908	10.023	10.080	10.080
2500			2.557	4.975	7.338	7.766	9.454	10.080	10.080
3530									10.08
5100									10.08

Tabla 9. Sensibilidad del canal fino para todas las tipologías “método recipiente de vidrio”.

- Por lo que se puede apreciar en la **Tabla 9**, existe un descenso de voltaje, alrededor de las 1000 a 1500 μm de diámetro medio de partículas hasta los 0,4 gramos, masa que en el apartado calibración del canal fino y grueso, se dispuso como límite de saturación para el canal fino.
- Existe un aumento del voltaje conforme aumenta la masa de las tipologías.
- A 0,4 gramos el canal fino llega al punto de saturación en casi todos los diámetros medios de partículas.

A continuación se graficó la señal del canal fino respecto al diámetro medio de partículas.



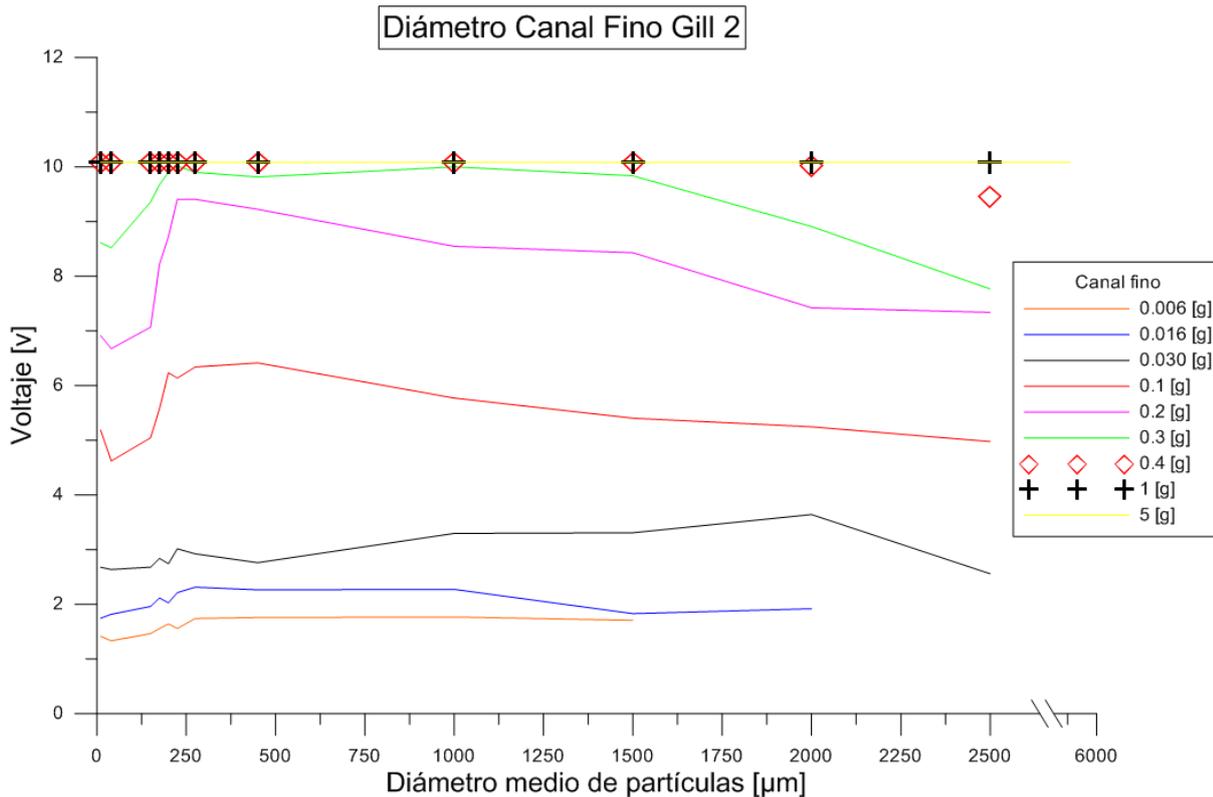


Figura 65. Relación entre diámetro y la señal del canal fino

- Por lo que se puede apreciar en la **Figura 65** existe una relación directamente proporcional entre la masa de las partículas y el voltaje de salida del canal fino.
- Con 0,3 gramos de masa mientras se aumenta el diámetro de las partículas, la señal del canal fino se acerca mucho al voltaje de saturación en 1000 µm, para luego comenzar a descender.
- Con 0,4 gramos el sensor saturó casi en todos los diámetros, hasta 2500 µm donde se ve un descenso.
- Con 1 y 5 gramos el sensor se encuentra completamente saturado aun cuando se sobrepasa los diámetros de 2500 µm lo que corresponderían a partículas gruesas.

3.1.3.5.2 Lectura del canal grueso.

Tomando las lecturas del método del recipiente de vidrio, para el canal grueso se obtuvieron los siguientes datos.

masa	<10 μm	<44 μm	149-297 μm	125-250 μm	250-315 μm	125-250 μm E	250-315 μm E	315-630 μm	1-2 mm	1.5 mm	2 mm	2.5 mm	3.175 mm	<12 mm
0	1.018	1.018	1.018	1.018	1.018	1.018	1.018	1.018	1.018	1.018	1.018	1.018	1.018	1.018
0.006	1.018	1.018	1.018	1.018	1.05	1.05	1.05	1.08	1.21	1.350				
0.016	1.018	1.018	1.018	1.018	1.05	1.05	1.08	1.16	1.47	1.466	1.610			
0.03	1.018	1.018	1.018	1.050	1.12	1.07	1.10	1.23	1.75	2.205	2.468	2.497		
0.1	1.019	1.018	1.019	1.118	1.28	1.15	1.28	1.61	3.23	3.396	3.870	4.752		
0.181													7.238	
0.2	1.019	1.019	1.019	1.118	1.312	1.237	1.486	1.869	3.657	5.092	4.757	5.021		
0.3	1.019	1.019	1.019	1.173	1.434	1.305	1.588	2.101	4.455	5.791	6.549	7.516		
0.357													10.046	
0.4	1.019	1.019	1.019	1.151	1.516	1.351	1.644	2.183	5.382	7.638	8.862	9.400		
0.54													10.046	
0.635														10.046
0.725													10.046	
0.907													10.046	
1	1.019	1.019	1.019	1.135	1.601	1.480	1.839	2.121	8.694	10.046	10.046	10.046		
1.077													10.046	
1.11														10.046
1.259													10.046	
1.441													10.046	
1.636													10.046	
1.697														10.046
2.196														10.046
2.852														10.046
3.339														10.046
3.831														10.046
4.32														10.046
4.953														10.046
5	1.019	1.019	1.019	1.019	1.492	1.446	1.901	1.937	9.585	10.046	10.046	10.046	10.046	

Tabla 10. Lecturas con el método del recipiente de vidrio canal grueso.

- Como se puede apreciar en la **Tabla 10**, resaltado de color rojo indica el punto donde satura el canal grueso.
- La señal de salida del canal grueso satura con las tipologías 1,5 mm en adelante.

A continuación, con los datos obtenidos en la metodología del recipiente de vidrio, se graficó las curvas de comportamiento de las diferentes tipologías para el canal grueso.

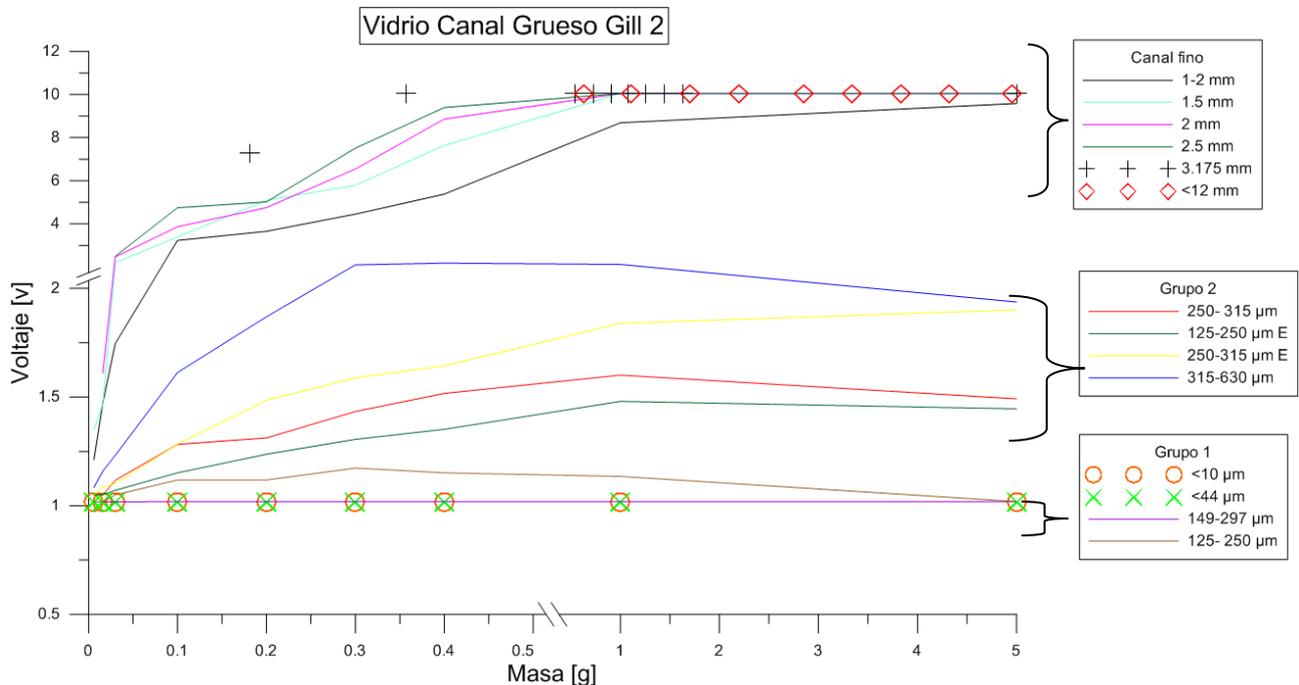


Figura. 66. Gráfica de la señal del canal grueso mediante el método del recipiente de vidrio.

- Como se puede apreciar en la **Figura. 66**, según el comportamiento del sensor las diferentes tipologías fueron agrupadas en tres grupos:

- Grupo 1: lo conforman las partículas: <math><10 \mu\text{m}</math>, <math><44 \mu\text{m}</math>, $149\text{-}297 \mu\text{m}$, y $125\text{-}250 \mu\text{m}$, estas tipologías son las más finas y mantiene el voltaje de salida del canal grueso en el “Zero” de calibración.
- Grupo 2: pertenecientes a $250\text{-}315 \mu\text{m}$, $125\text{-}250 \mu\text{m E}$, $250\text{-}315 \mu\text{m E}$, y $315\text{-}630 \mu\text{m}$, estas partículas producen un voltaje mayor al voltaje “Zero” de calibración, no importa cuánto se aumente la masa de las partículas estas nunca llegarán a saturar la señal del canal grueso.
- Grupo 3: con $1\text{-}2 \text{ mm}$, $1,5 \text{ mm}$, 2 mm, $2,5 \text{ mm}$, $3,175 \text{ mm}$, y <math><12 \text{ mm}</math>, estas partículas saturan al canal grueso.

Para determinar qué clase de relación existe entre la señal del canal grueso y el diámetro medio de partículas para dicha lectura, se tomó un valor fijo de masa, y se aumentó el diámetro estimado de las tipologías.

diámetro	0.006	0.016	0.030	0.1	0.2	0.3	0.4	1	5
10	1.018	1.018	1.018	1.019	1.019	1.019	1.019	1.019	1.019
40	1.018	1.018	1.018	1.018	1.019	1.019	1.019	1.019	1.019
150	1.018	1.018	1.018	1.019	1.019	1.019	1.019	1.019	1.019
175	1.018	1.018	1.050	1.118	1.118	1.173	1.151	1.135	1.019
200	1.05	1.05	1.12	1.28	1.312	1.434	1.516	1.601	1.492
225	1.05	1.05	1.07	1.15	1.237	1.305	1.351	1.480	1.446
275	1.05	1.08	1.10	1.28	1.486	1.588	1.644	1.839	1.901
450	1.08	1.16	1.23	1.61	1.869	2.101	2.183	2.121	1.937
1000	1.21	1.47	1.75	3.23	3.657	4.455	5.362	8.694	9.585
1500	1.350	1.466	2.205	3.396	5.092	5.791	7.638	10.046	10.046
2000		1.610	2.468	3.870	4.757	6.549	8.862	10.046	10.046
2500			2.497	4.752	5.021	7.516	9.400	10.046	10.046
3530									10.046
5100									10.046

Tabla 11. Grado de sensibilidad de canal grueso con respecto al tamaño de partículas.

- Como se puede apreciar en la **Tabla 11**, al incluir los nuevos diámetros medios de partículas la tendencia sigue igual aumentando el voltaje conforme aumenta el diámetro y la masa.
- Con estas masas de partículas podríamos decir que para el canal grueso el punto de saturación se encuentra desde 0,4 hasta 1 gramos

A continuación se graficó la señal del canal grueso respecto al diámetro medio de partículas.

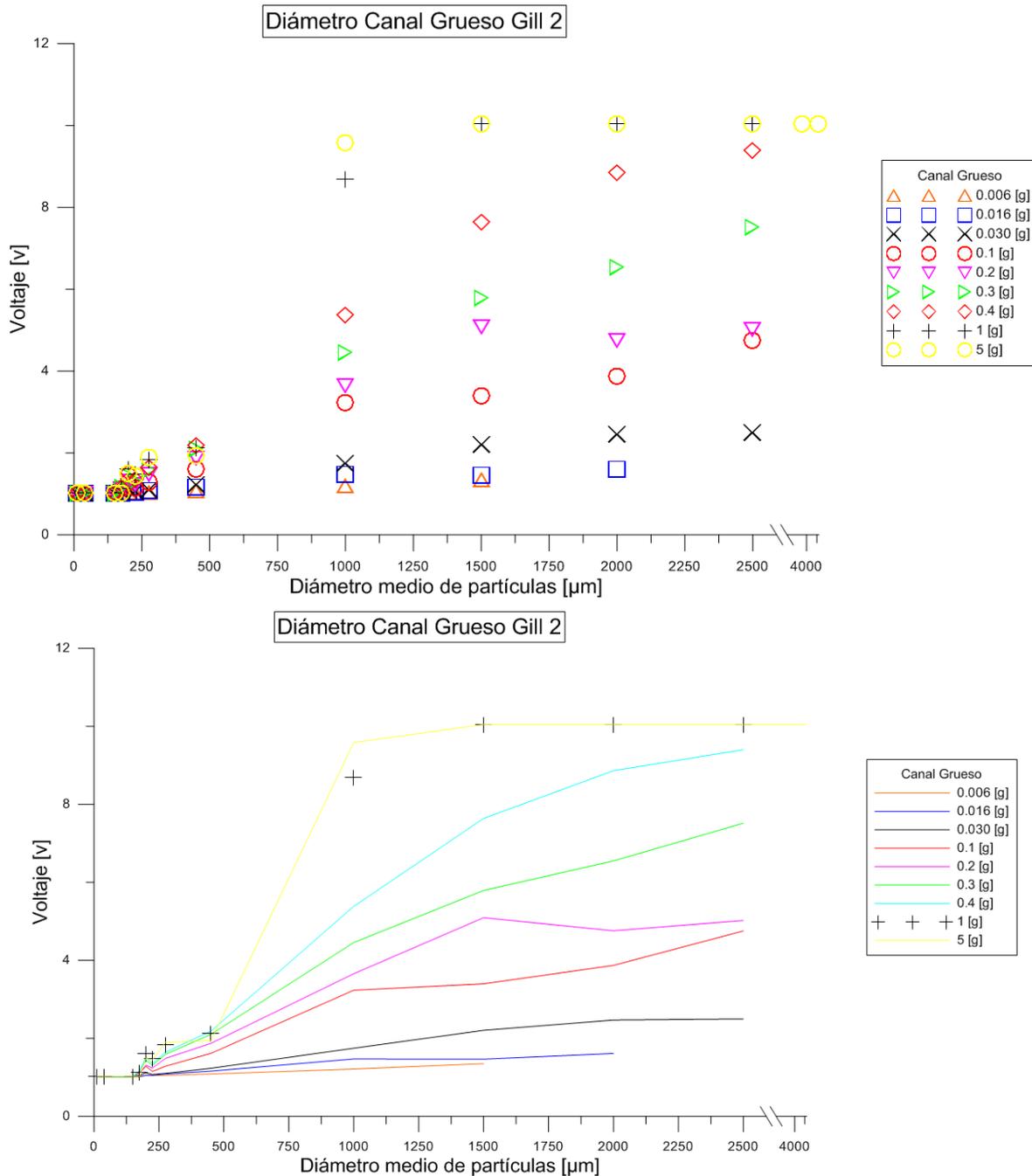


Figura. 67. Relación entre diámetro de las tipologías y la señal del canal grueso.

- Como se puede apreciar en la **Figura. 67.** existe una relación directamente proporcional entre el voltaje de salida del canal grueso y la masa.
- En la curva relativa a 1 gramo, a partir de 1500 µm de diámetro se observa la saturación del canal grueso. Esto se debe tanto la masa con que se calibró el sensor, 12 bolas equivalente a 0,56 gramos, como a la facilidad que presenta este canal para diferenciar partículas gruesas en detrimento de las finas.

3.1.3.6 Cálculo del número de partículas

Con el objetivo de realizar un análisis más cercano a la realidad, y para obtener una relación número de partículas con el voltaje de salida de los canales, se realizó el cálculo teórico del número de partículas medio presente en cada masa medida.

Para el cálculo del número de partículas, se tomó la densidad nominal del hierro $7,87 \text{ g/cm}^3$ y el diámetro medio de cada una de las tipologías del catálogo de la casa comercial, además, el diámetro fue comprobado mediante la medición en microscopio, como se puede apreciar en el apartado de caracterización de las partículas.

Con dicho diámetro se calculó el volumen de las partículas suponiendo un volumen semejante a una esfera.

$$V_p = \frac{3}{4} * \pi * r^3$$

Ecuación 1. Volumen de partículas.

Finalmente, reemplazando los datos en la siguiente ecuación se obtuvo el número de partículas correspondiente a cada masa medida.

$$N_p = \frac{\text{masa}}{V_p * \rho}$$

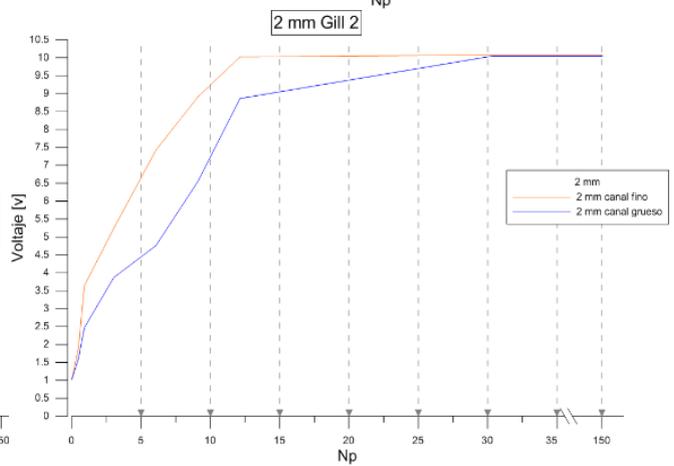
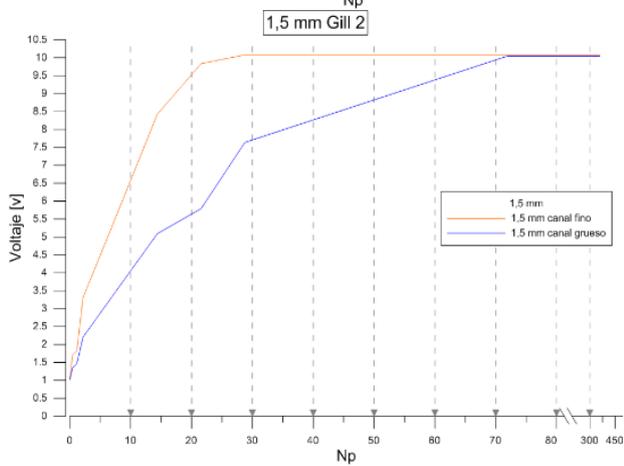
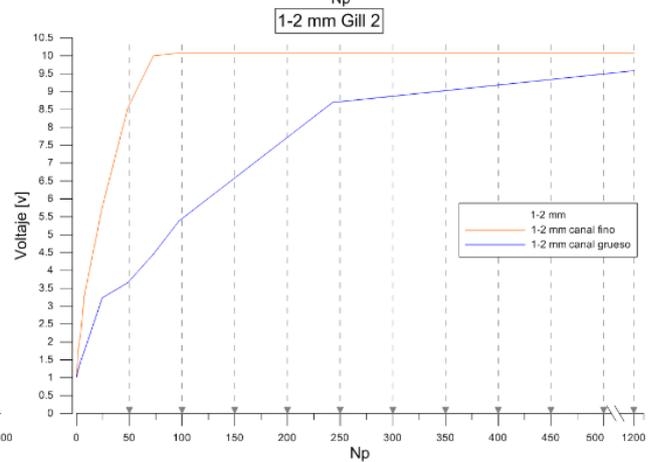
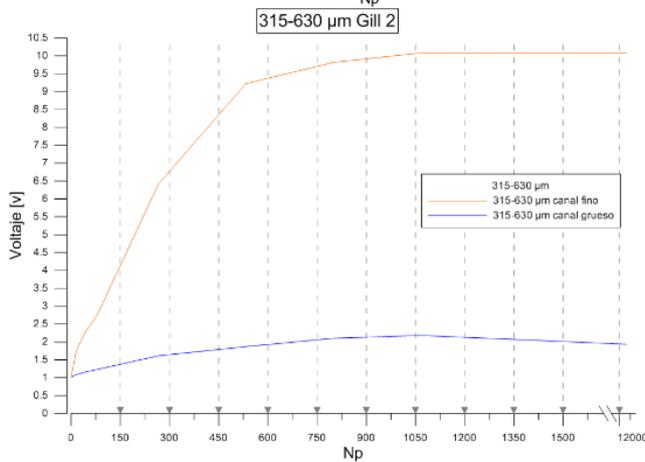
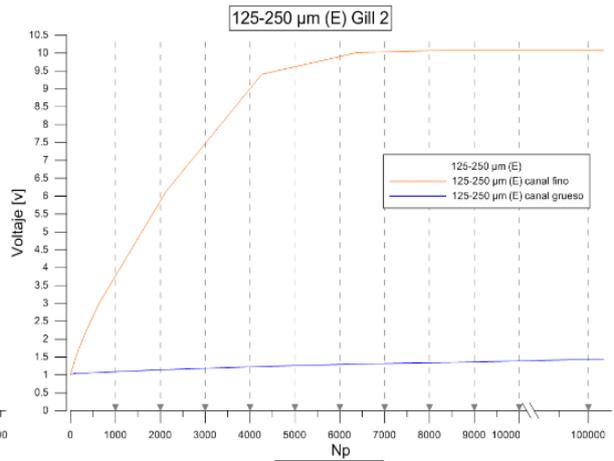
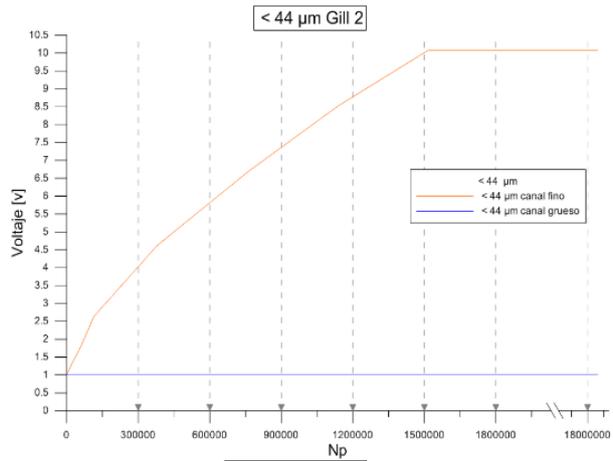
Ecuación 2. Número de partículas.

A continuación los números de partículas aproximados para cada masa usada en el método del recipiente de vidrio.

Diámetro	10	40	150	175	200	225	275	450	1000	1500	2000	2500	3530	5100
masa	Np <10 µm	Np <44 µm	Np 149-297 µm	Np 125-250 µm	Np 250-315 µm	Np 125-250 µm E	Np 250-315 µm E	Np 315-630 µm	Np 1-2 mm	Np 1.5 mm	Np 2 mm	Np 2.5 mm	Np 3.175 mm	Np <12 mm
0	0.00E+00	0E+00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
0.006	1.46E+06	2.28E+04	431.42	271.68	182.01	127.83	70.01	15.98	1.46	0.43				
0.016	3.88E+06	6.07E+04	1150.46	724.49	485.35	340.88	186.70	42.61	3.88	1.15	0.49			
0.03	7.28E+06	1.14E+05	2157.12	1358.42	910.03	639.15	350.07	79.89	7.28	2.16	0.91	0.47		
0.1	2.43E+07	3.79E+05	7190.40	4528.06	3033.45	2130.49	1166.89	266.31	24.27	7.19	3.03	1.55		
0.181													1.00	
0.2	4.85E+07	7.58E+05	14380.79	9056.13	6066.90	4260.98	2333.77	532.62	48.54	14.38	6.07	3.11		
0.3	7.28E+07	1.14E+06	21571.19	13584.19	9100.35	6391.46	3500.66	798.93	72.80	21.57	9.10	4.66		
0.357													1.97	
0.4	9.71E+07	1.52E+06	28761.59	18112.25	12133.79	8521.95	4667.55	1065.24	97.07	28.76	12.13	6.21		
0.54													2.98	
0.635														1.16
0.725													4.00	
0.907													5.00	
1	2.43E+08	3.79E+06	71903.97	45280.63	30334.49	21304.88	11668.86	2663.11	242.68	71.90	30.33	15.53		
1.077													5.94	
1.11														2.03
1.259													6.95	
1.441													7.95	
1.636													9.03	
1.697														3.10
2.196														4.02
2.852														5.22
3.339														6.11
3.831														7.01
4.32														7.90
4.953														9.06
5	1.21E+09	1.90E+07	359519.85	226403.17	151672.44	106524.40	58344.32	13315.55	1213.38	359.52	151.67	77.66	27.58	

Tabla 12. Cálculo del número de partículas.

Para observar el comportamiento de ambos canales con respecto al número de partículas, se graficó los datos obtenidos con la metodología recipiente de vidrio, para las siguientes tipologías.



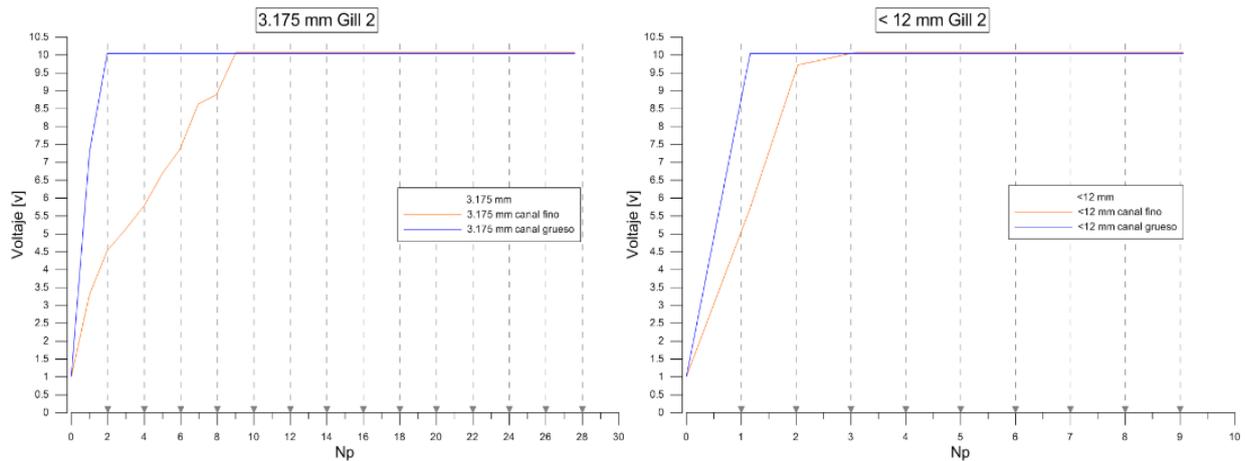


Figura. 68. Señal del canal fino y grueso con respecto al número de partículas.

- Como se puede observar en la **Figura. 68**, a medida que crece el tamaño de la tipología, menor es el número de partículas que se necesitan para saturar tanto el canal fino como el grueso.
- Para la tipología $<44 \mu\text{m}$ se puede observar una marcada diferencia entre canales, el canal fino va creciendo hasta llegar al punto de saturación, en el cual se mantiene constante, mientras el canal grueso se mantiene en su valor “ZERO de calibración” 1,018V.
- Para la tipología 125-250 μm E y 315-630 μm , el canal fino va creciendo hasta llegar al voltaje de saturación, manteniéndose constante, mientras que el canal grueso si bien va ascendiendo por encima de su valor “ZERO de calibración”, por más que se aumente el número de partículas, nunca va llegar al punto de saturación.
- Para la tipología de 1-2 mm, 1,5 mm, 2 mm, 3,175 mm, y $< 12\text{mm}$ el canal fino va creciendo hasta llegar al voltaje de saturación, manteniéndose constante, mientras que en el canal grueso se observa la tendencia que a mayor diámetro de partícula, menor es el número de partículas que necesita para llegar a alcanzar el punto de saturación.

A continuación se muestra el número de partículas de cada tipología en el que se alcanza el punto de saturación.

Tipología	masa (gramos)	Np en que satura canal fino	masa (gramos)	Np en que satura canal grueso
$<10 \mu\text{m}$	0.4	97070359.2	----	no satura
$<44 \mu\text{m}$	0.4	1516724.4	----	no satura
149-297 μm	0.4	28761.6	----	no satura
125-250 μm	0.4	18112.3	----	no satura
250-315 μm	0.4	12133.8	----	no satura
125-250 μm E	0.4	8522.0	----	no satura
250-315 μm E	0.4	4667.5	----	no satura
315-630 μm	0.4	1065.2	----	no satura
1-2 mm	0.4	97.1	----	no satura
1,5 mm	0.4	28.8	1	71.9
2 mm	1	30.3	1	30.3
2,5 mm	1	15.5	1	15.5
3,175 mm	1,636	9.0	0.357	2.0
$<12 \text{ mm}$	1,697	3.1	0.635	1.2

Tabla 13. Número de partículas de cada tipología y el punto de saturación.

- Como se puede apreciar en la **Tabla 13**, el canal fino es saturado por todas las tipologías.
- A mayor diámetro medio de partículas, menor es el número de partículas que se necesita para saturar la señal del canal fino.
- A partir de 2 mm en adelante se necesita mayor masa de la que fue calibrado el canal fino, para saturar dicho canal.
- Solo las tipologías de 1,5 mm en adelante saturan al canal grueso.

Tal y como se ha comentado en el apartado de calibración, el canal fino se ve afectado por las partículas gruesas, mientras que las partículas finas no interfieren en la señal del canal grueso. El método del recipiente de vidrio permitió observar de mejor manera la influencia de las diferentes tipologías y masas en el comportamiento de los dos canales, permitiendo ordenar de manera clara las diferentes tendencias.

Cabe destacar, que el comportamiento del sensor frente al número de partículas en este apartado corrobora que se trata de un sensor másico, ya que para una misma masa, el número de partículas que se necesita para que saturen los canales varían desde el orden de millones en el caso de tipologías pequeñas hasta unidades en el caso de tipologías grandes.

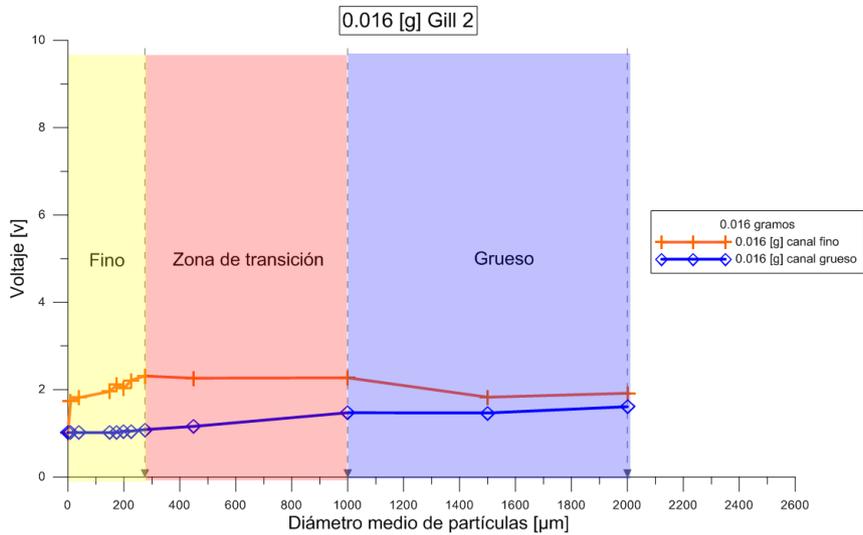
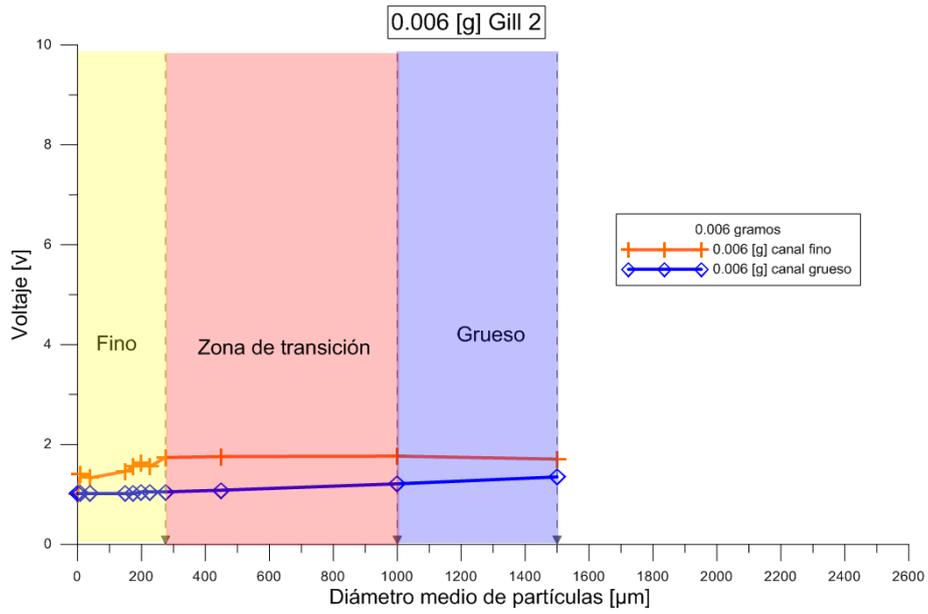
3.1.4 Validación de las zonas de transición entre canales.

Para la validación de las zonas de transición entre canales, se realizó un estudio para determinar el momento en que los diferentes tamaños de partículas de hierro producen un cambio de señal del canal de partículas finas al canal de partículas gruesas, intentando definir cuál es el valor de dicha transición, y de este modo determinar si éste genera algún tipo de interferencia en la señal del primer al segundo canal o viceversa.

Diámetro	10	40	150	175	200	225	275	450	1000	1500	2000	2500	3530	5100
Masa														
0.006 CF	1.414	1.33	1.46	1.555	1.64	1.56	1.74	1.76	1.766	1.707				
0.006 CG	1.018	1.018	1.018	1.018	1.05	1.05	1.05	1.08	1.21	1.350				
0.016 CF	1.744	1.82	1.96	2.115	2.03	2.21	2.31	2.26	2.272	1.827	1.917			
0.016 CG	1.018	1.018	1.018	1.018	1.05	1.05	1.08	1.16	1.47	1.466	1.610			
0.03 CF	2.676	2.64	2.68	2.838	2.74	3.01	2.92	2.76	3.296	3.307	3.641	2.557		
0.03 CG	1.018	1.018	1.018	1.050	1.12	1.07	1.10	1.23	1.75	2.205	2.468	2.497		
0.3 CF	8.611	8.518	9.357	9.673	9.899	10.014	9.899	9.814	9.998	9.836	8.908	7.766		
0.3 CG	1.019	1.019	1.019	1.173	1.434	1.305	1.588	2.101	4.455	5.791	6.549	7.516		
0.4 CF	10.080	10.080	10.080	10.080	10.080	10.080	10.080	10.080	10.080	10.080	10.023	9.454		
0.4 CG	1.019	1.019	1.019	1.151	1.516	1.351	1.644	2.183	5.382	7.638	8.862	9.400		
1 CF	10.080	10.080	10.080	10.080	10.080	10.080	10.080	10.080	10.080	10.080	10.080	10.080		
1 CG	1.019	1.019	1.019	1.135	1.601	1.480	1.839	2.121	8.694	10.046	10.046	10.046		
5 CF	10.080	10.080	10.080	10.080	10.080	10.080	10.080	10.080	10.080	10.080	10.080	10.080	10.08	10.08
5 CG	1.019	1.019	1.019	1.019	1.432	1.446	1.901	1.337	9.585	10.046	10.046	10.046	10.046	10.046

Tabla 14. Datos para el cálculo de las zonas de transición entre canales.

A continuación se muestran algunos ejemplos de la evolución para determinadas masas.



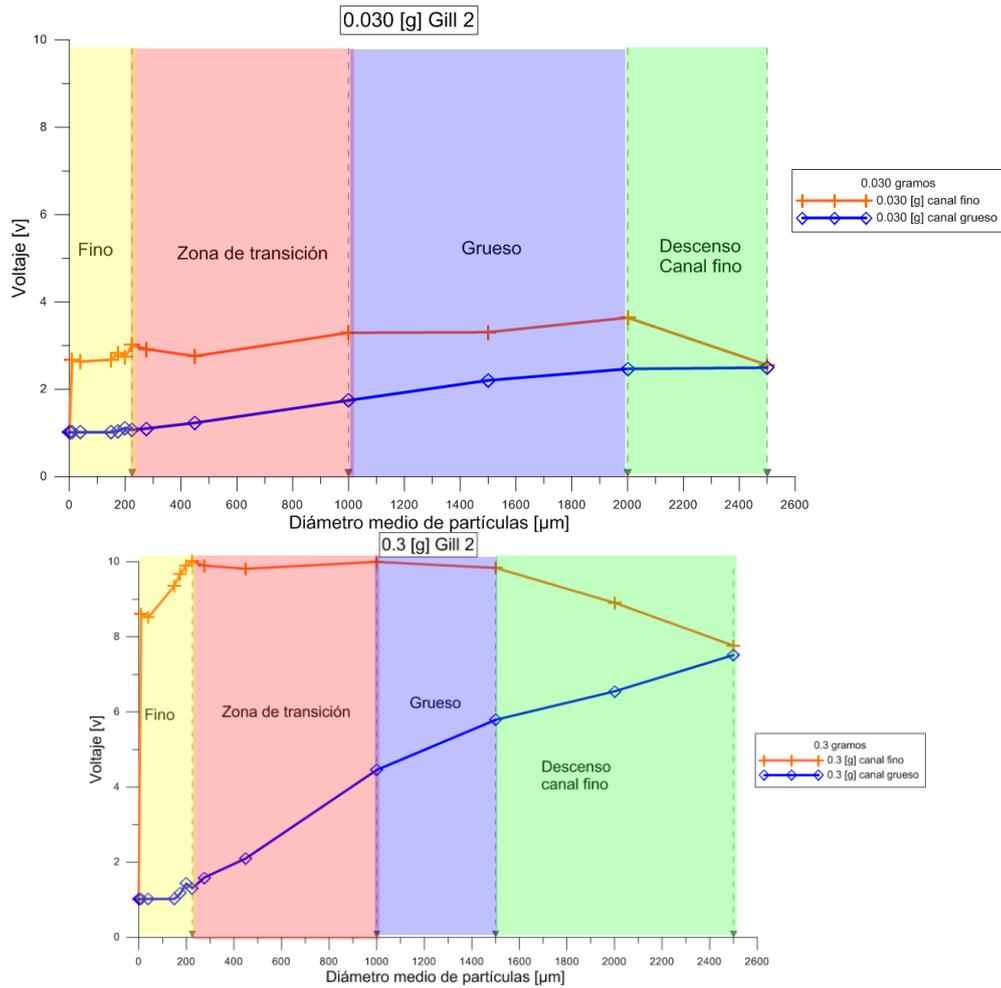


Figura. 69. Zona de transición entre canales para masas inferiores a los límites de calibración.

- Como se puede apreciar en la **Figura. 69**, para masas inferiores a los límites en los que se calibró el sensor, el comportamiento se vio marcado por las siguientes zonas:
- Con diámetros medio de partículas $< 200 \mu\text{m}$ sólo responde el canal fino.
- Desde $200 \mu\text{m}$ hasta $< 1000 \mu\text{m}$, responden ambos canales.
- Con diámetros medio de partículas $> 1000 \mu\text{m}$ el canal grueso responde mientras que el canal fino cae.

A continuación, se procedió a valorar masas por encima del límite de saturación.

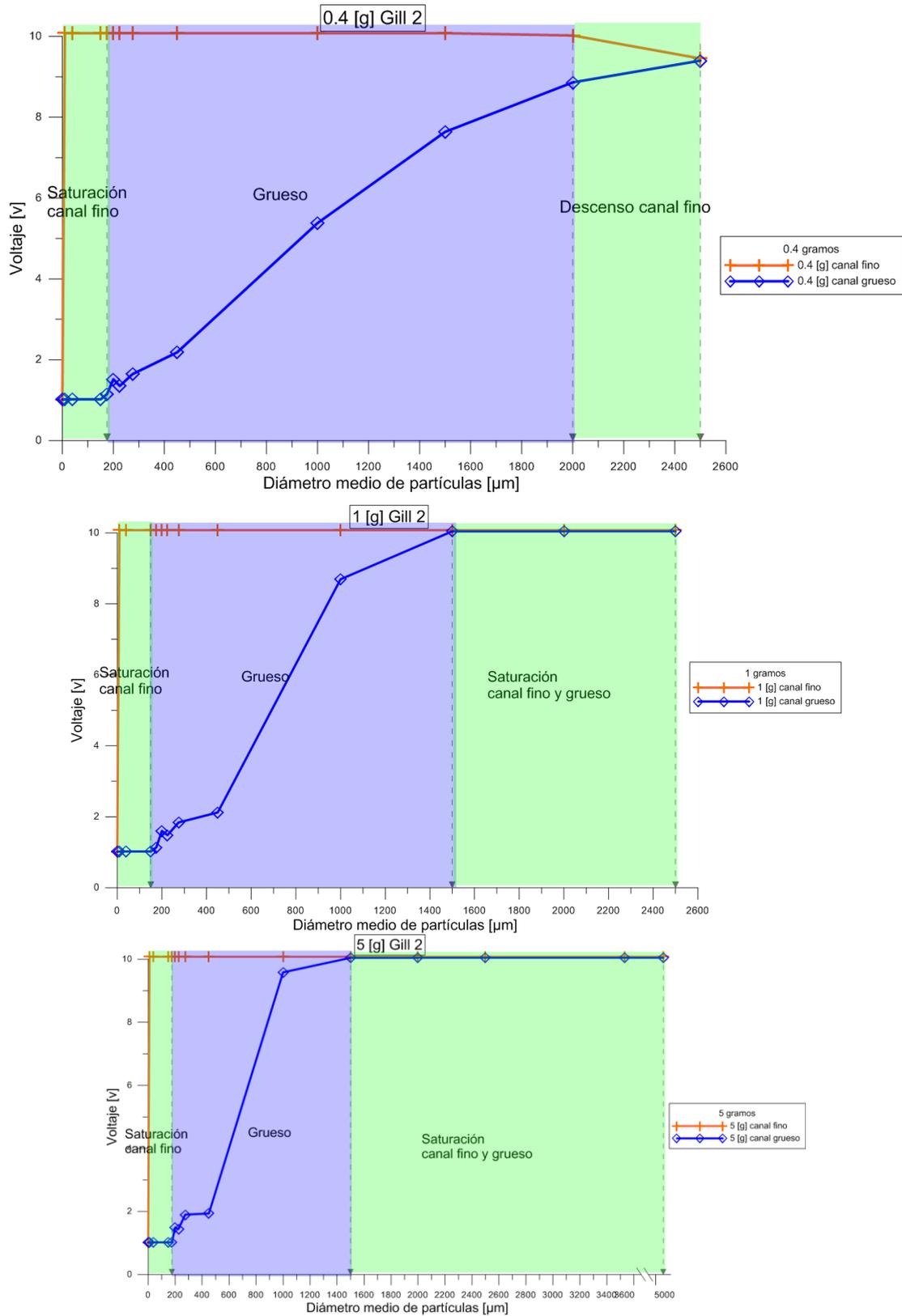


Figura. 70. Zona de transición entre canales para masas superiores a los límites de calibración.

- Como se puede observar en la **Figura. 70**, el comportamiento se vio delimitado por las siguientes zonas, con diámetros medios de partículas $<200 \mu\text{m}$ sólo responde el canal fino, este se encuentra saturado.
- De $200 \mu\text{m}$ a $<1000 \mu\text{m}$ dan señal los dos, canal grueso tendencia ascendente y canal fino saturado.
- -Con diámetro medio de partículas $>1500 \mu\text{m}$ ambos canales se encuentran saturados.

De este estudio se puede destacar, la clara diferenciación de las zonas de trabajo de los dos canales y cómo cambia su comportamiento al rebasar la masa límite de calibración.

Otra utilidad es saber los voltajes de salida de ambos canales y poder relacionarlos con los diferentes diámetros medios de partículas ya que, el tamaño, supedita el grado de severidad del desgaste, por lo que observando los valores de salida del sensor es posible estimar el tamaño de las partículas adheridas al mismo.

3.1.5 Prueba con cobre.

También se probó el sensor haciendo incidir sobre éste cobre, el cual está presente en muchos de los recubrimientos de cojinetes y bancadas, todo esto para comprobar si esta clase de material genera o interfiere la señal en dicho sensor.



Figura 71. Partículas de cobre.

Las partículas de cobre no son atraídas por el sensor por lo que se adhirieron manualmente, un grupo de partículas al sensor y se verificó las señales del canal fino y grueso, tal como se puede apreciar en la **Tabla 15**.

masa	Np	Cu 0.6-0.8 mm	Cu 0.6-0.8 mm
0.006	2.84	1.013	1.167
0.016	7.58	1.013	1.496
0.03	14.22	1.013	1.736
0.1	47.40	1.013	2.825
0.2	94.80	1.013	4.833
0.3	142.19	1.013	5.802
0.4	189.59	1.013	8.245
1	473.98	1.013	10.045
5	2369.88	1.013	10.045

Tabla 15. Influencia del cobre en el canal fino y grueso.

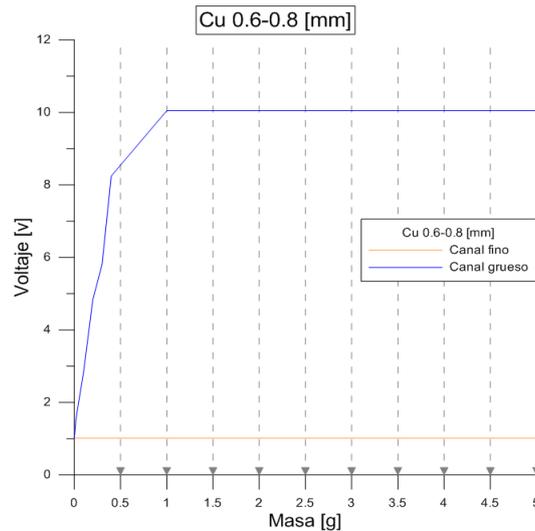


Figura. 72. Influencia del cobre sobre el canal fino y grueso.

Como se puede observar en la **Figura. 72**. El cobre genera un comportamiento opuesto a partículas de hierro:

- La señal de salida del canal grueso alcanza la saturación cuando esta llega a masa de 1 gramo.
- La masa del canal fino no sobrepasa la señal de “Zero” de calibración.

Este sensor da señal con un material diferente al hierro, pero al tratarse de un material no ferromagnético no se adhiere al sensor y no es viable su aplicación para la detección de esos materiales.

3.1.6 Diseño del sistema de agitación y prueba.

Para el diseño del sistema de agitación primero se llenó una fuente de vidrio con dos litros de aceite típico de multiplicadoras de los aerogeneradores.



Figura. 73 Medición del volumen de aceite a adicionar.

Con el objetivo de escoger el sistema más similar, se revolvió el fluido lubricante usando los diferentes accesorios del agitador comercial, siendo la segunda opción como se puede apreciar en la **Figura 74**, la que menor emulsión generó en el aceite.



Figura 74. Configuraciones del agitador comercial y estado del aceite.

Se dispuso de dos bases y soportes, para sostener al agitador comercial y a los diferentes elementos del sensor, tal como se puede apreciar en la **Figura. 75.**

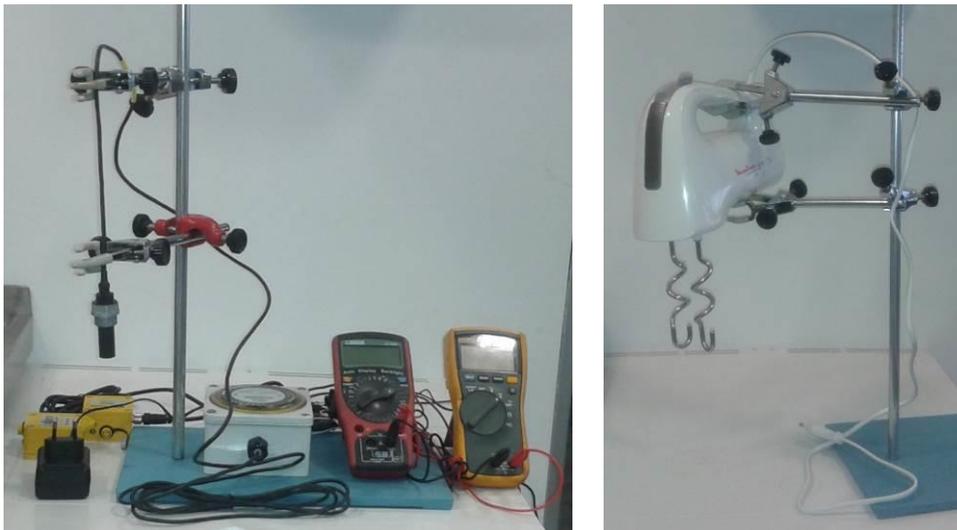


Figura. 75. Configuración de los distintos elementos.

Los soportes fueron marcados para garantizar un mismo posicionamiento del agitador comercial y el sensor, y así poder garantizar la repetitividad de la prueba como se puede ver en la **Figura. 76.**

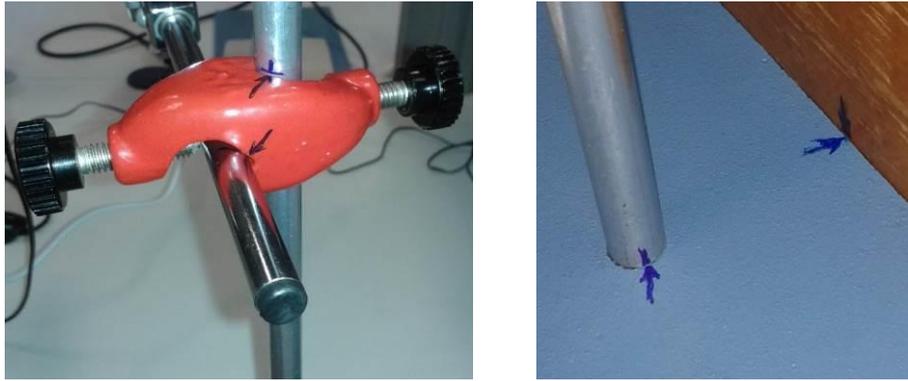


Figura. 76. Señales de los soportes.

Se posicionó al agitador comercial de tal manera que sus aspas se ubicaran en el centro del recipiente de vidrio como se puede apreciar en la **Figura. 77**.



Figura. 77. Centrado de las aspas del agitador comercial.

De esta manera se delimitó el lugar donde se colocaría el sensor y la zona donde se adicionaría las muestras como se puede apreciar en la **Figura. 78**.

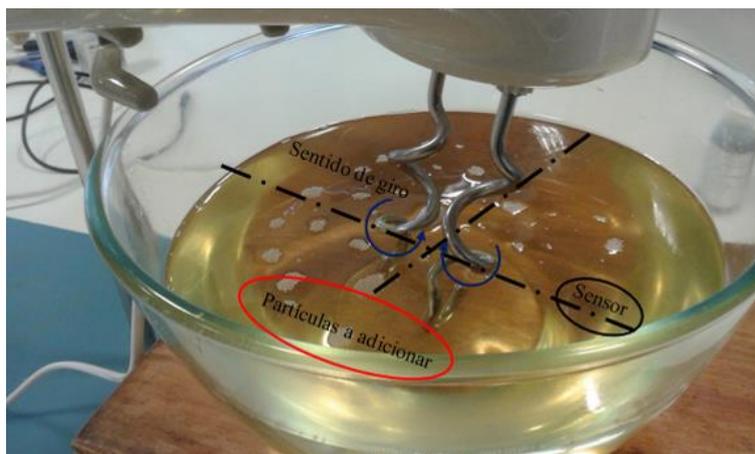


Figura. 78. Bosquejo del posicionamiento del sensor y las partículas a adicionar.

Se sumergió la punta del sensor en el fluido lubricante, hasta donde comienza la parte roscada, como se puede apreciar en la **Figura. 79**.



Figura. 79. Sensor en el fluido lubricante.

Quedando todo el sistema de agitación configurado de la siguiente manera, tal y como se muestra en la **Figura. 80.**

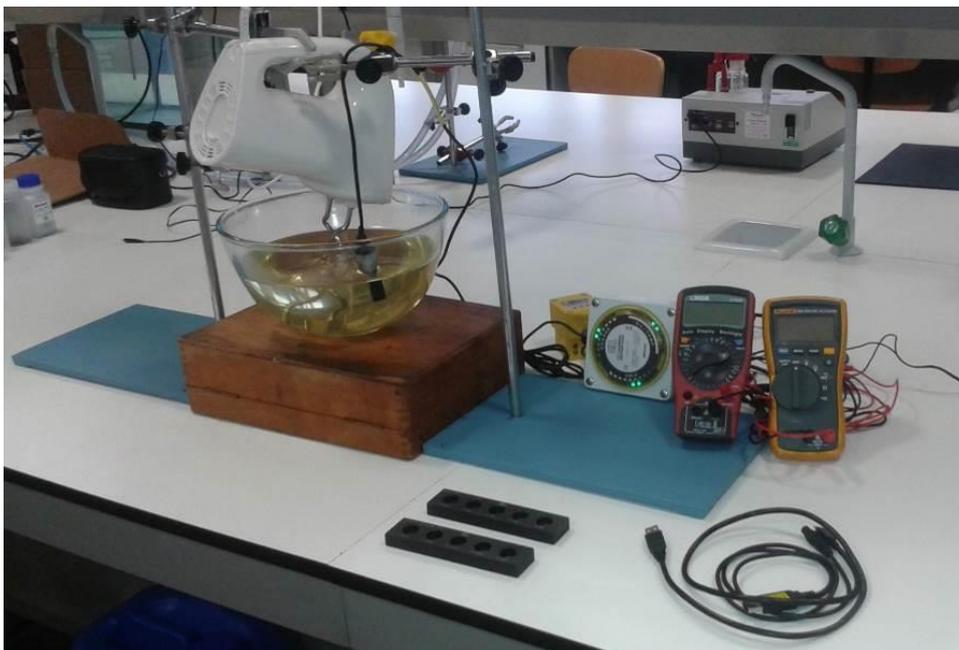


Figura. 80. Configuración sistema de muestreo.

Para el diseño previo de las pruebas se estudió una publicación de la revista “Gear Technology” en la cual se muestra el valor de la masa de partículas de desgaste presentes en los distintos niveles de daño, dichas masas servirán como un valor de referencia para realizar las distintas pruebas.

En el objetivo de esta investigación fue determinar qué masa acumulada predice daños por picadura en engranajes rectos e identificar un método para establecer, los límites de daño en engranajes **Figura. 81.**

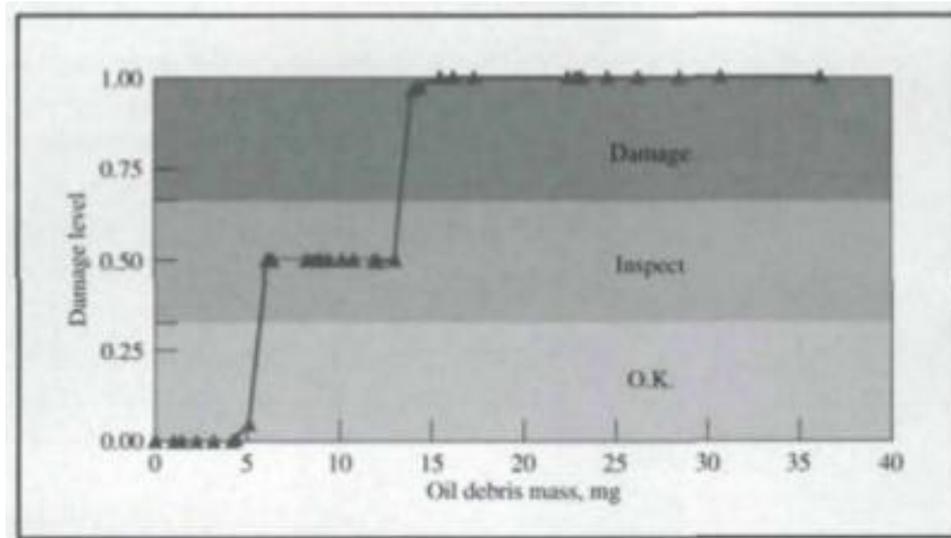


Figura. 81. Salida de modelo de lógica difusa.

Los resultados indicaron, que la masa acumulada es un buen predictor de daños por picadura de engranajes rectos siendo, la lógica difusa, una buena técnica para el establecimiento de límites que discriminan entre los estados de desgaste por picadura, a esto hay que sumarle, que elimina la necesidad de un experto en diagnóstico, para analizar e interpretar los datos, ya que la salida sería uno de los tres estados: OK, inspeccionar y daño.

Estado	Límites	Masa (mg)
Daño	Superior	∞
	Inferior	15,475
Inspeccionar	Superior	8,69
	Inferior	5,453
OK	Superior	3,159
	Inferior	0

Tabla 16. Límites de los diferentes estados en base a la masa.

Los límites que se aprecian en la **Tabla 16**, se usaron como referencia para hacer las pruebas en aceite.

3.1.7 Pruebas en aceite

Una vez diseñado el sistema de agitación y prueba, se realizó el test en aceite para validar este sensor. El procedimiento a seguir fue ir adicionando, en intervalos de 5 minutos, una cantidad de masa hasta llegar al equivalente a un nivel de daño severo. Al finalizar este ensayo el aceite se desechó, para evitar contaminaciones cruzadas. Tal y como se produce en condiciones normales de desgaste, se empezó agregando, poca cantidad de material fino de hierro de una misma tipología

(desgaste incipiente), hasta terminar con mucha cantidad de partículas de hierro de gran tamaño (desgaste severo), tal y como se muestra en la **Tabla 17**.

		Pruebas en aceites siempre la misma tipología								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
masa (gramos)		<10µm	<44 µm	149-297 µm	125-250 µm	250-315 µm	125-250 µmE	250-315 µmE	315-630 µm	1-2 mm
1	1.5	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
2		0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
3		0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
4		0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
5		0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
6	2.75	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55
7		0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55
8		0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55
9		0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55
10		0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55
11	5.75	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15
12		1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15
13		1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15
14		1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15
15		1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15
Total		10	10	10	10	10	10	10	10	10

Tabla 17. Partículas de hierro a adicionar para las pruebas en aceite

Se realizó el pesaje de las muestras a adicionar, a la cuales se dispuso en pequeñas bolsas de plástico, para su fácil manipulación, tal como se puede observar en la **Figura. 82**.



Figura. 82. Bolsa con muestra de la tipología 1-2 mm.

Se configuró y puso a punto los dos data logger como se puede apreciar en la **Figura. 83**.

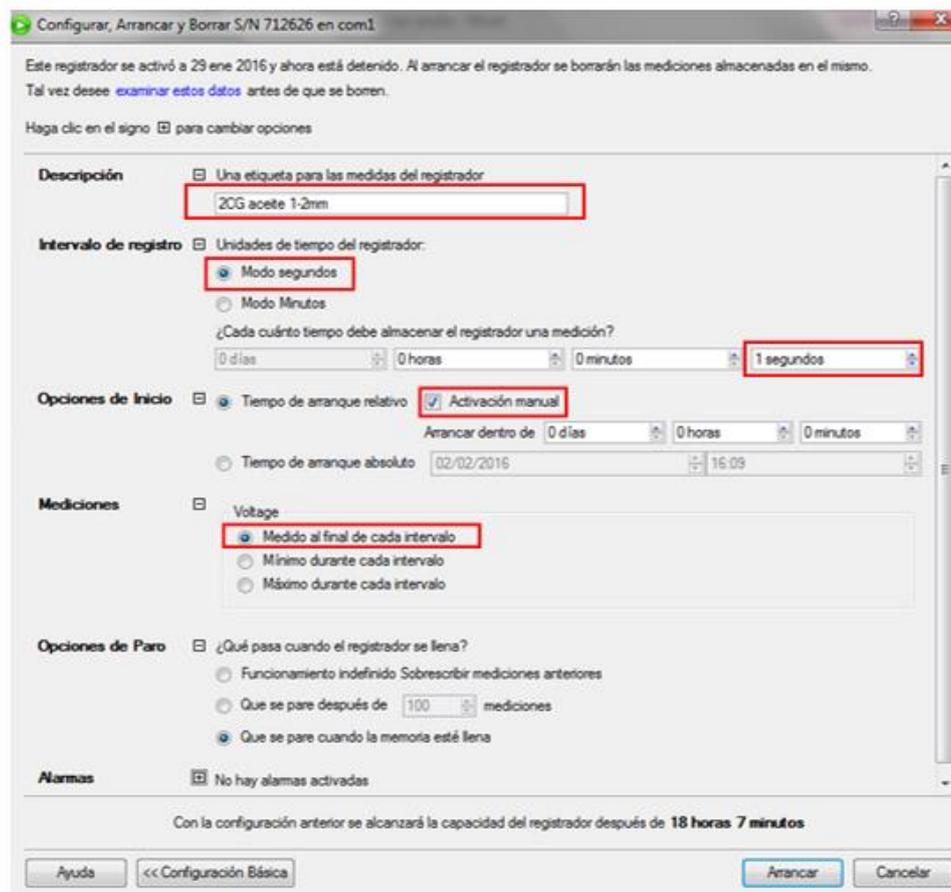


Figura. 83. Configuración del data logger para las pruebas en aceite.

Se encendió el agitador comercial colocándolo en la segunda velocidad, y se iniciaron manualmente los dos data logger, como se puede apreciar en la **Figura. 84**.



Figura. 84. Regulador del agitador comercial, e iniciación manual de un data logger mediante un imán.

Para poder centrar las dos señales en base al tiempo de respuesta y marcar un punto de inicio a la prueba se hizo incidir un objeto metálico grande.



Figura. 85. Referenciación del inicio de la prueba.

A continuación se muestra un ejemplo de los datos recopilados, en la **Figura. 86**. Se ha resaltado con amarillo los puntos donde se adhiere el objeto metálico grande, y se inicia el ensayo.

Tipo		TGPR-0704	Tipo		TGPR-0704
Descripción		CG 125-250 E gill2 (1)	Descripción		CF 125-250 E gill2 (1)
Propiedad		Voltage	Propiedad		Voltage
1	29/03/2016 05:30:09	1.02 V	1	29/03/2016 05:30:06	1.02 V
2	29/03/2016 05:30:10	1.02 V	2	29/03/2016 05:30:07	1.02 V
3	29/03/2016 05:30:11	1.02 V	3	29/03/2016 05:30:08	1.02 V
4	29/03/2016 05:30:12	3.80 V	4	29/03/2016 05:30:09	1.02 V
5	29/03/2016 05:30:13	4.55 V	5	29/03/2016 05:30:10	1.02 V
6	29/03/2016 05:30:14	4.63 V	6	29/03/2016 05:30:11	1.14 V
7	29/03/2016 05:30:15	4.67 V	7	29/03/2016 05:30:12	1.53 V
8	29/03/2016 05:30:16	4.51 V	8	29/03/2016 05:30:13	1.45 V
9	29/03/2016 05:30:17	2.08 V	9	29/03/2016 05:30:14	1.45 V
10	29/03/2016 05:30:18	1.02 V	10	29/03/2016 05:30:15	1.45 V
11	29/03/2016 05:30:19	1.02 V	11	29/03/2016 05:30:16	1.18 V
12	29/03/2016 05:30:20	1.02 V	12	29/03/2016 05:30:17	1.02 V
13	29/03/2016 05:30:21	1.02 V	13	29/03/2016 05:30:18	1.02 V
14	29/03/2016 05:30:22	1.02 V	14	29/03/2016 05:30:19	1.02 V
15	29/03/2016 05:30:23	1.02 V	15	29/03/2016 05:30:20	1.02 V
16	29/03/2016 05:30:24	1.02 V	16	29/03/2016 05:30:21	1.02 V

Figura. 86. Ejemplo de toma de datos de los data logger.

Seguidamente se adicionaron las distintas masas a intervalos de 5 min, la adición de partículas se realizó espolvoreando la muestra en el lugar delimitado procurando agregar todo, como se observa en la **Figura. 87**.



Figura. 87. Adición de partículas.

Una vez finalizada la prueba se extrajo la masa que el sensor logró retener, para lo cual se siguió el siguiente procedimiento:

- Se retiró el sensor mediante la ayuda de un crisol cerámico, para extraer toda la masa retenida por el sensor.
- Se separó cuidadosamente la masa atraída por el sensor, diluyendo el aceite con heptano.
- Secado el heptano, se pesó dicha masa y se guardaron los valores.



Figura. 88. Extracción de la muestra retenida por el sensor.

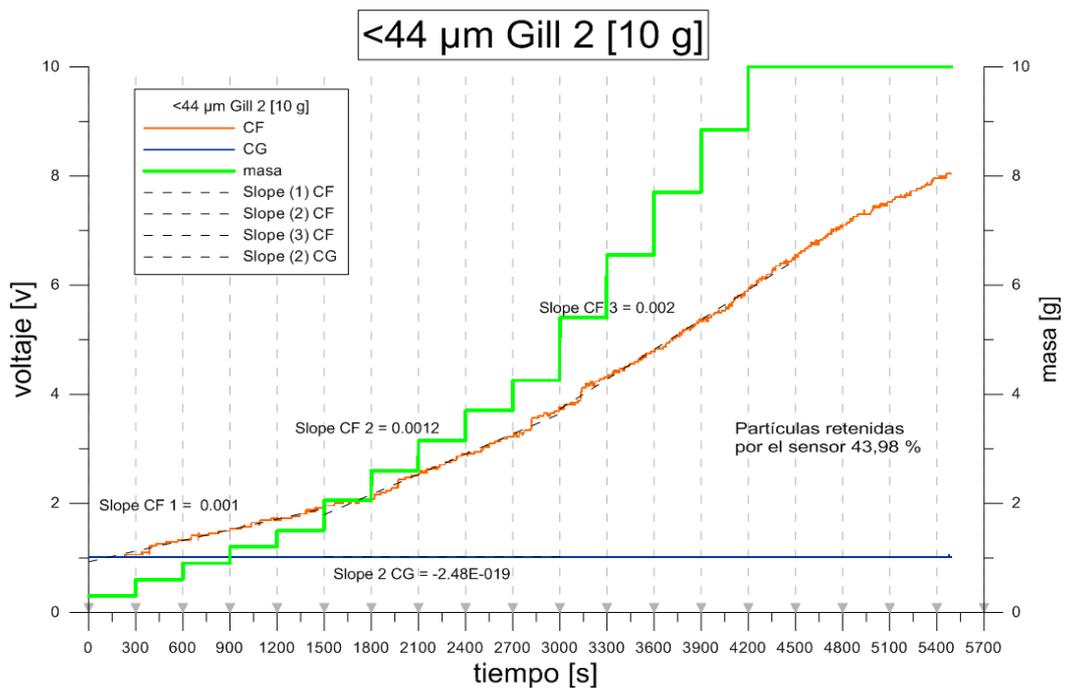
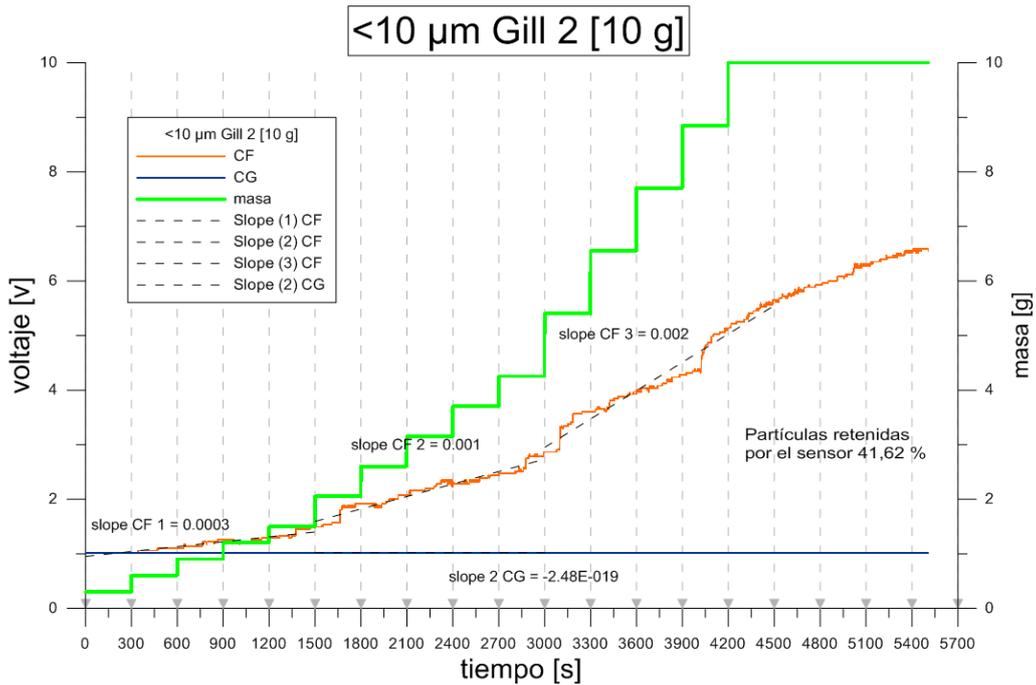
A continuación se muestra la masa retenida de las diferentes tipologías por el imán del sensor en las pruebas en aceite.

Masa retenida por el imán		
Tipología	masa [g]	%
1	<10 μm	41.62
2	<44 μm	43.98
3	149-297 μm	52.89
4	125-250 μm	41.15
5	250-315 μm	41.42
6	125-250 μm E	47.84
7	250-315 μm E	52.38
8	315-630 μm	47.04
9	1-2 mm	22.14
	Promedio	43.38

Tabla 18. Tasa de retención del sensor Gill 2.

- Como se puede apreciar en la **Tabla 18**, la masa retenida por el sensor equivale a una media de 43 % de la masa total agregada en cada una de las pruebas.
- La tasa de recogida es constante hasta llegado el tamaño de tipología 1-2 mm, donde la cantidad disminuye notablemente, debido a que tienden a colmatarse fácilmente.

A continuación se muestran los resultados obtenidos en las pruebas en aceite adicionando una masa total de 10 gramos con el sensor Gill 2.



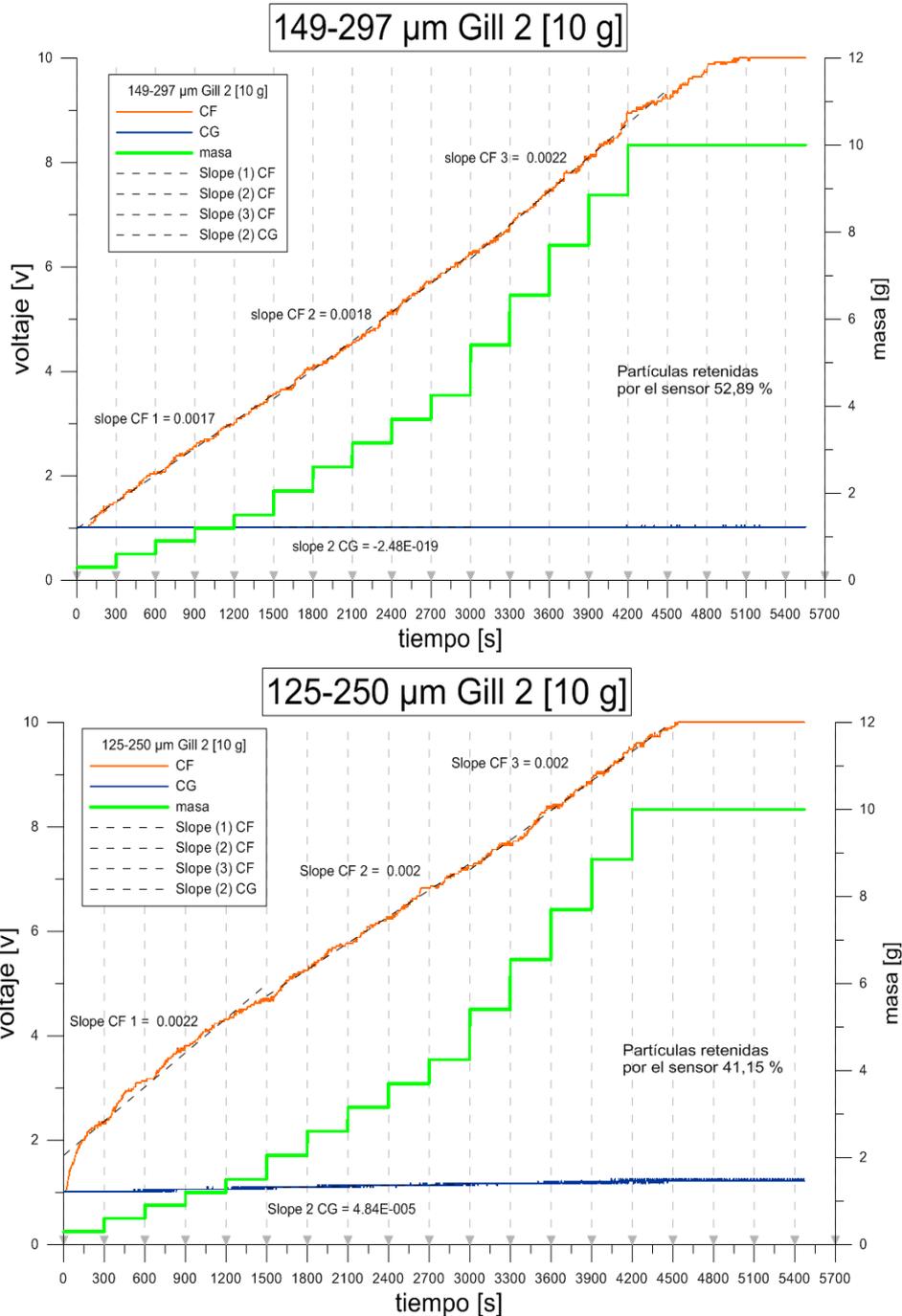
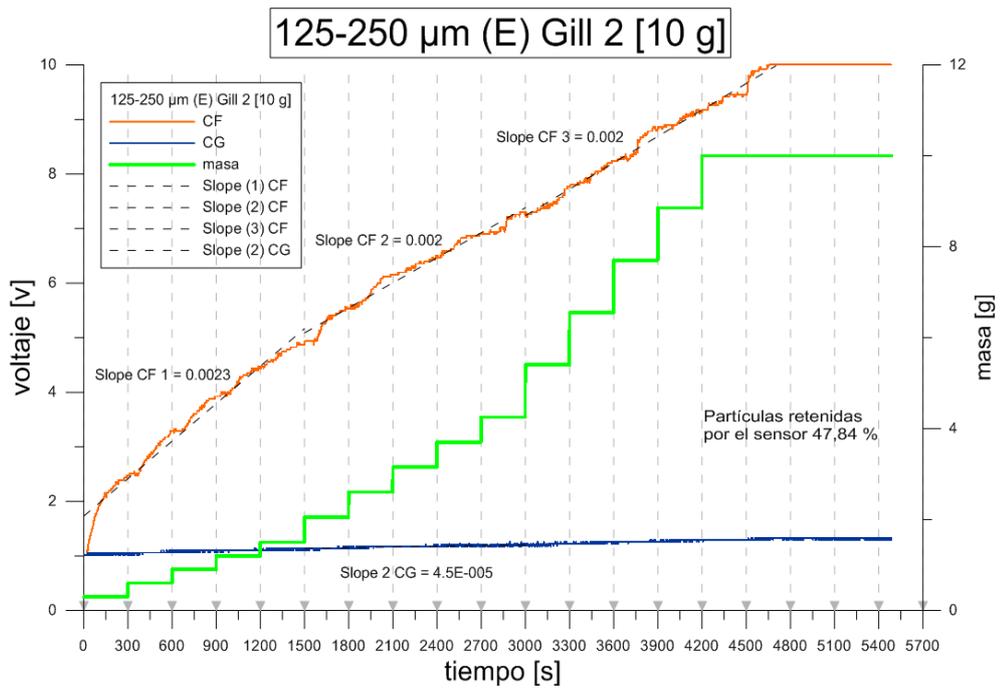
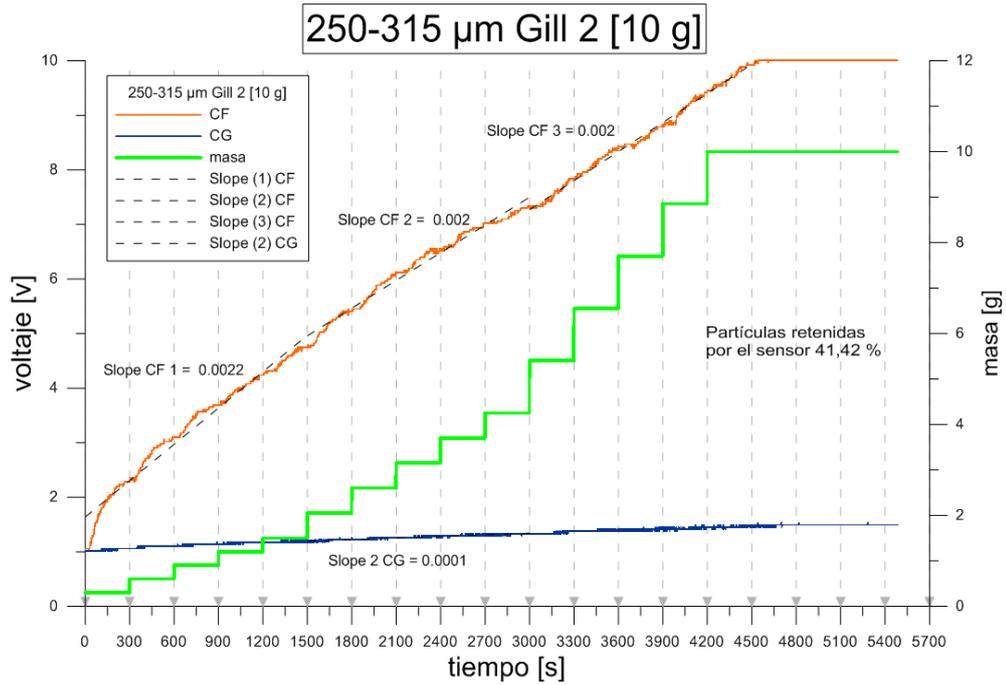


Figura. 89. Curvas de comportamiento del canal fino y grueso de las pruebas en aceite.

- Como se puede apreciar en la **Figura. 89**, los resultados obtenidos para las partículas más finas muestran que, para $<10 \mu\text{m}$, y $<44 \mu\text{m}$ el canal fino tiene un comportamiento ascendente pero para las pruebas en aceite no llegan a saturar.
- Para 149-297 μm , y 125-250 μm el canal fino llega a alcanzar el punto de saturación.
 - Para $<10 \mu\text{m}$, $<44 \mu\text{m}$, 149-297 μm , y 125-250 μm , el canal grueso se mantiene en el “Zero” de calibración.



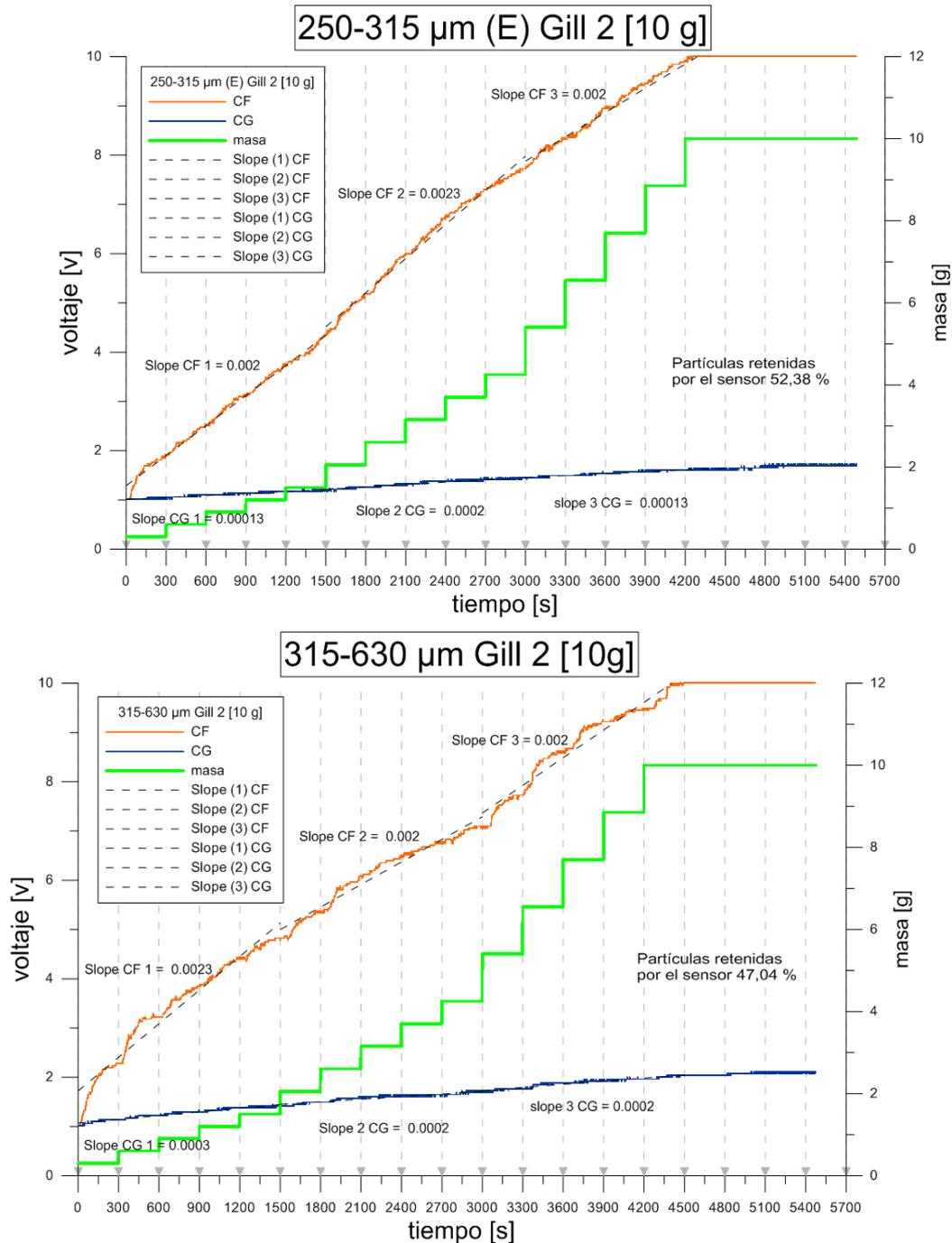


Figura. 90. Curvas de comportamiento del canal fino y grueso de las pruebas en aceite.

- Como se puede observar en la **Figura. 90**, los resultados obtenidos para las partículas de tamaño medio muestran que, para las tipologías 250-315 μm , 125-250 μm E, 250-315 μm E, y 315-630 μm , en el canal fino mantienen una tendencia ascendente hasta llegar a saturarlo.
- Las tipologías 250-315 μm , 125-250 μm E, 250-315 μm E, y 315-630 μm , en el canal grueso producen un voltaje mayor al voltaje “Zero” de calibración, pero nunca llegarán a saturarlo.

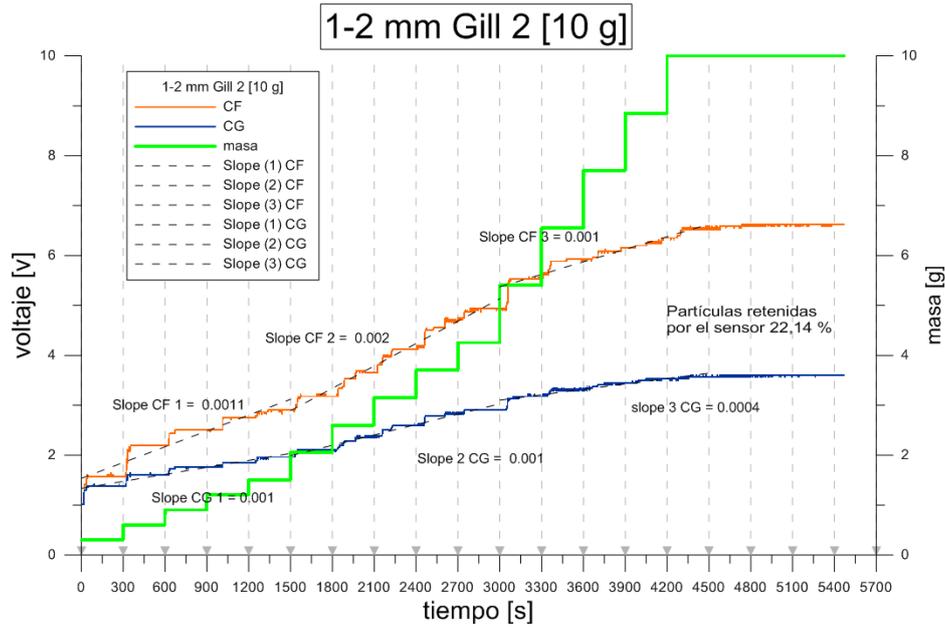


Figura. 91. Curvas de comportamiento del canal fino y grueso de las pruebas en aceite.

- Como se puede apreciar en la **Figura. 91**, para 1-2 mm en el canal fino y grueso estas partículas mantienen una tendencia ascendente mientras se realiza la adición de partículas.
- No llegan a saturar a ambos canales, esto es debido a la rápida colmatación de las partículas gruesas.

A continuación se graficó todas las señales de las diferentes tipologías para las pruebas en aceite.

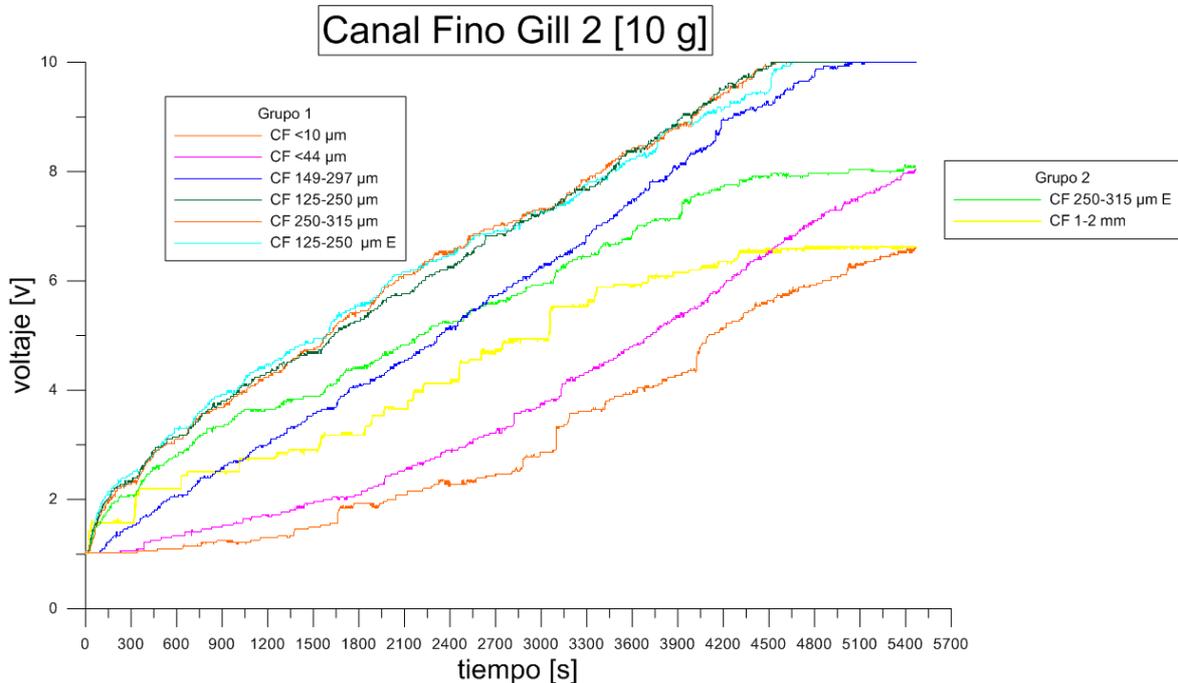


Figura. 92. Comportamiento de la señal del canal fino en pruebas con aceite.

- Como se puede apreciar en la **Figura. 92**, tenemos el grupo 1 donde conforme va aumentando el tamaño de la tipología genera un incremento en la señal de salida del canal fino hasta llegar a un punto donde se agrupan un gran número de ellas.

- Mientras en el grupo 2 se ve claramente que existe un punto de inflexión, mientras aumenta el tamaño de las partículas el voltaje descende, este comportamiento es lógico ya que se encontraría en la zona de trabajo del canal grueso en detrimento del canal fino.

A continuación se graficó la señal arrojada por el canal grueso para todas las tipologías.

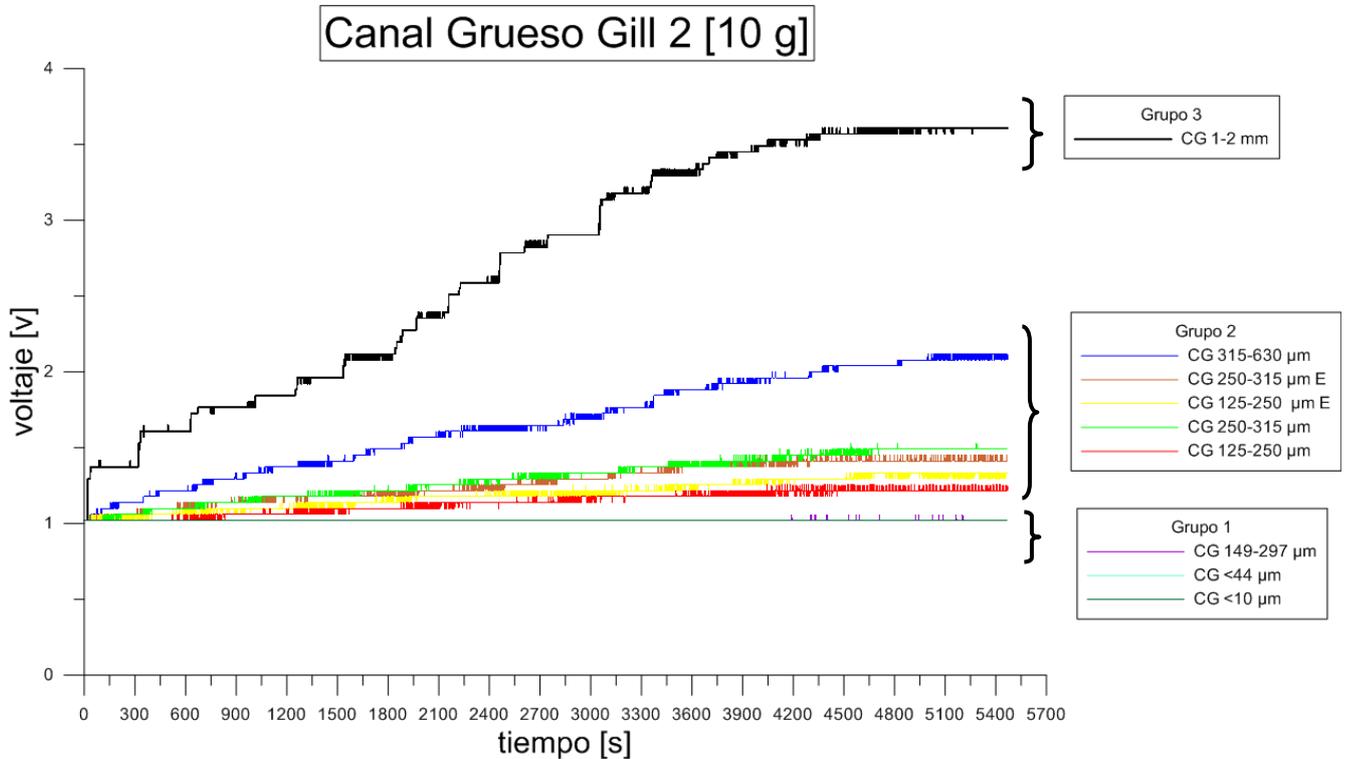
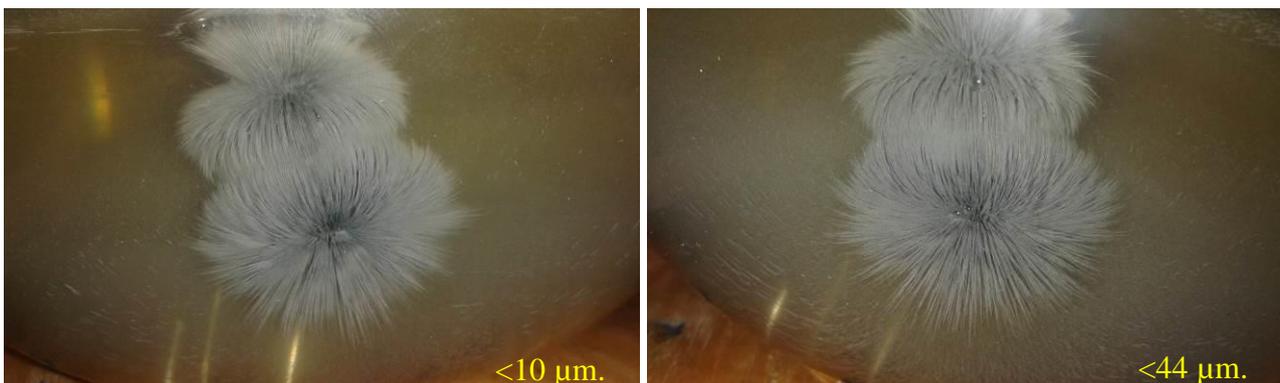


Figura. 93. Comportamiento de la señal del canal grueso en pruebas con aceite.

- Tal y como se aprecia en la **Figura. 93**, hay mucha similitud entre el desempeño del sensor en aceite con las pruebas en vacío, cuyo comportamiento se comentó en el apartado anterior

A continuación se pudo observar imágenes del material retenido por el imán del sensor después de haber terminado las correspondientes pruebas.



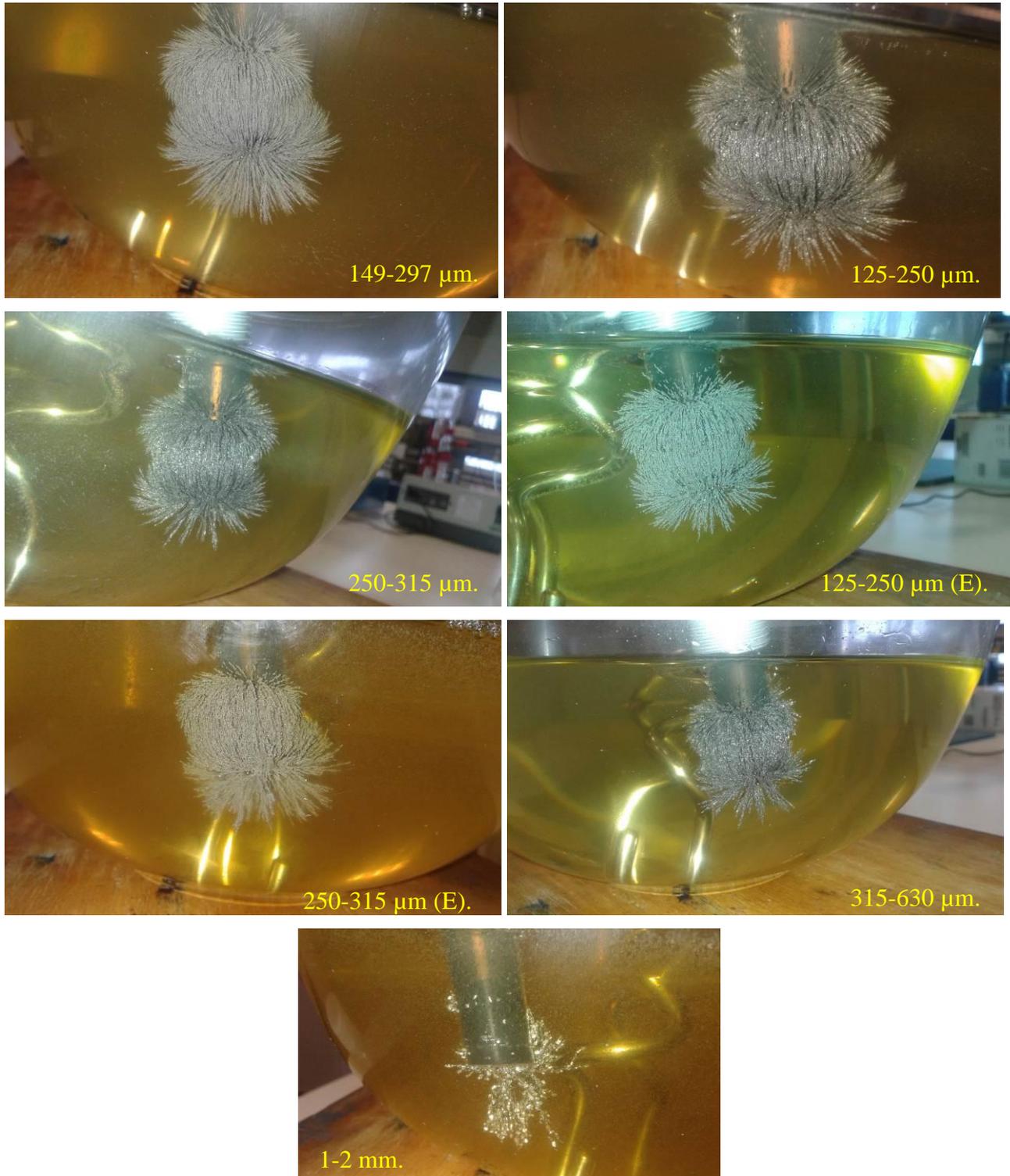


Figura. 94. Partículas retenidas por el imán del sensor al finalizar la prueba (10 g).

El voltaje de salida de los canales al final de las pruebas en aceite no es equivalente a la señal obtenida en las pruebas en vacío pese a que se trata de comparar la misma masa, esto es debido a que el imán en las pruebas en aceite atrae masa por sus laterales, masa que no genera señal como se puede apreciar en la **Figura. 94**. Dicho fenómeno fue verificado en el apartado pruebas complementarias.

Con las pendientes obtenidas de las pruebas en aceite se realizó un estudio de respuesta del sensor, mostrado en la **Tabla 19**.

Gill 2 [10 g]							
Nombre	diam [μm]	Slope (1,5) CF	Slope (1,5) CG	Slope (2,75) CF	Slope (2,75) CG	Slope (5,75) CF	Slope (5,75) CG
<10 μm	10	0.000298345	-2.48E-19	0.000761079	-2.48E-19	0.001731915	-2.48E-19
<44 μm	40	0.000651026	-2.48E-19	0.001232731	-2.48E-19	0.001821858	-2.48E-19
149-297 μm	150	0.00171477	-2.48E-19	0.001842753	-2.48E-19	0.002160475	3.10E-07
125-250 μm	175	0.002186654	5.13E-05	0.001690346	4.84E-05	0.001889704	3.40E-05
250-315 μm	200	0.002220014	0.000119618	0.00169351	0.000100256	0.00177685	9.12E-05
125-250 μm E	225	0.002291868	6.62E-05	0.001529819	4.53E-05	0.001613458	7.27E-05
250-315 μm E	275	0.002033551	0.000131086	0.002308424	0.000166281	0.001641146	0.000125553
315-630 μm	450	0.00227528	0.000248941	0.001526601	0.000174882	0.001873634	0.000211367
1-2 mm	1000	0.001055983	0.000467028	0.001494353	0.000691449	0.000837191	0.000717707

Tabla 19. Pendientes de los diferentes tramos de adición para el canal fino y grueso.

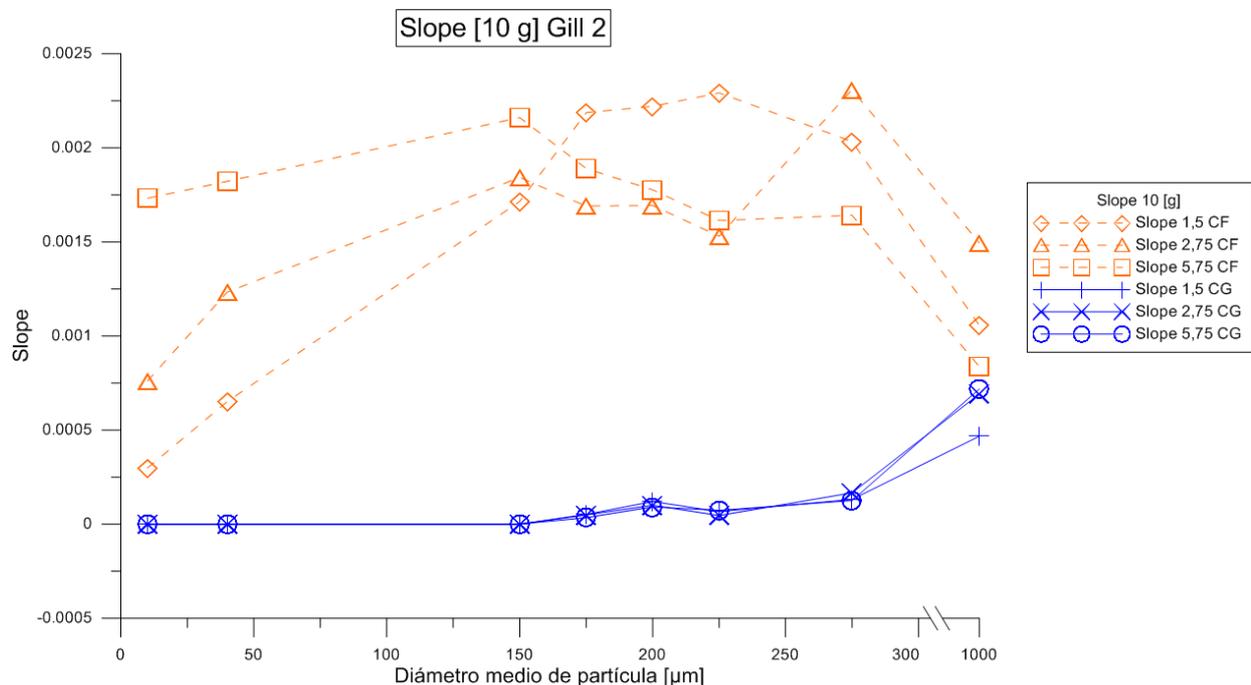


Figura. 95. Curvas de las diferentes pendientes de adición canal fino y grueso.

Los resultados arrojaron las siguientes conclusiones:

- Para el canal fino con diámetros medios de partículas <150 μm las pendientes mantienen una relación directa con las masas agregadas, debido a que como se comentó en el apartado “zonas de transición” éste es el tramo donde trabaja el canal fino.
- De 150 μm a 1000 μm las pendientes del canal fino fluctúan de manera desordenada encontrándose en la zona de transición.
- Finalmente, la pendiente del canal fino cae debido a que entra en la zona de trabajo del canal grueso.
- Para el canal grueso con diámetros medios de partículas <150 μm las pendientes se mantienen constantes.

- De 150 μm a 275 μm en el canal grueso se observa una ligera tendencia ascendente encontrándose en la zona de transición.
- En 1000 μm las pendientes tienen relación con la masa agregada, aunque no se diferencia en los dos últimos tramos de adición, cabe también destacar que, mientras más grande es la partícula mayor facilidad tiene para colmatarse.

Durante este experimento se pudo observar un comportamiento satisfactorio del sensor sumergido sobre el aceite, debido a que este presenta un comportamiento muy similar al funcionamiento de las pruebas en vacío.

La masa adicionada en el sensor no es un dato que se puede contrastar con las pruebas en vacío debido a que las partículas que se adhieren en los laterales del sensor no aportan información, pero son atraídas por el imán y representan parte de la masa pesada.

La tasa de recogida de partículas es constante en todas las muestras, excepto llegados al tamaño de tipología 1-2 mm, la cual disminuye debido a que las partículas de mayor tamaño tienden a depositarse fácilmente en el fondo del sistema.

3.1.8 Prueba de sensibilidad variable.

Con el fin de no realizar pruebas con muestras homogéneas de partículas, se efectuó una mezcla de las mismas- Sumando una masa de partículas pequeñas que incidan en el canal fino y una muestra de partículas grandes que afecten al canal de muestras gruesas, y así ver cómo el sensor reacciona a dicha mezcla, simulando un comportamiento más realista.

El procedimiento a seguir será ir adicionando, a intervalos de 5 minutos una cantidad de masa, tal y como se muestra en la **Tabla 20**, partiendo desde el más fino hasta el más grueso, para el desarrollo de la siguiente mezcla. Al finalizar este ensayo el aceite se desechará.

		Prueba de sensibilidad Mezcla de tipologías						
		Tamaño	1	2	3	4	5	6
1		<10 μm	0.20	0.31	0.48	0.65	0.80	0.20
2		<44 μm	0.20	0.31	0.48	0.65	0.80	0.31
3		149-297 μm	0.20	0.31	0.48	0.65	0.80	0.48
4		125-250 μm	0.20	0.31	0.48	0.65	0.80	0.65
5		250-315 μm	0.20	0.31	0.48	0.65	0.80	0.80
mitad	➔	125-250 μmE	0.20	0.31	0.48	0.65	0.80	0.80
7		250-315 μmE	0.20	0.31	0.48	0.65	0.80	0.90
8		315-630 μm	0.20	0.31	0.48	0.65	0.80	0.90
9		1-2 mm	0.00	0.00	0.00	0.65	0.80	1.50
10		3.175 mm	0.00	0.00	0.00	0.00	0.80	1.50
11		<12 mm	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.50
total			1.6	2.48	3.84	5.85	8	9.54

Tabla 20. Partículas de hierro a adicionar para las pruebas de sensibilidad

A continuación representación del porcentaje de las masas totales adicionadas divididas entre partículas finas y gruesas.

	Tamaño	1	2	3	4	5	6
1	<10µm	100%	100%	100%	89%	80%	53%
2	<44 µm						
3	149-297 µm						
4	125-250 µm						
5	250-315 µm						
6	125-250 µmE						
7	250-315 µmE						
8	315-630 µm						
9	1-2 mm				11%		
10	3.175 mm	0%	0%	0%		20%	47%
11	<12 mm						

Tabla 21. Porcentaje de la relación entre partículas finas y gruesas.

En la siguiente tabla se muestra la masa retenida por el imán del sensor en las diferentes pruebas de mezcla de tipologías.

Masa retenida en el imán			
	Test	Masa [g]	%
1	Prueba 1	1.13	11.79
2	Prueba 2	1.66	17.37
3	Prueba 3	2.38	24.93
4	Prueba 4	3.24	33.97
5	Prueba 5	3.41	35.69
6	Prueba 6	3.80	39.81
	Promedio		27.26

Tabla 22. Tasa de retención para las pruebas mezclado.

- Como se puede apreciar en la **Tabla 22**, la tasa de adición aumenta mientras más cantidad de masa y tipologías se involucran en las pruebas.
- La masa retenida por el sensor se encuentra en un promedio del 27,26 % de la masa final adicionada.

A continuación se muestran los resultados obtenidos en las pruebas mezclando partículas con el sensor Gill 2.

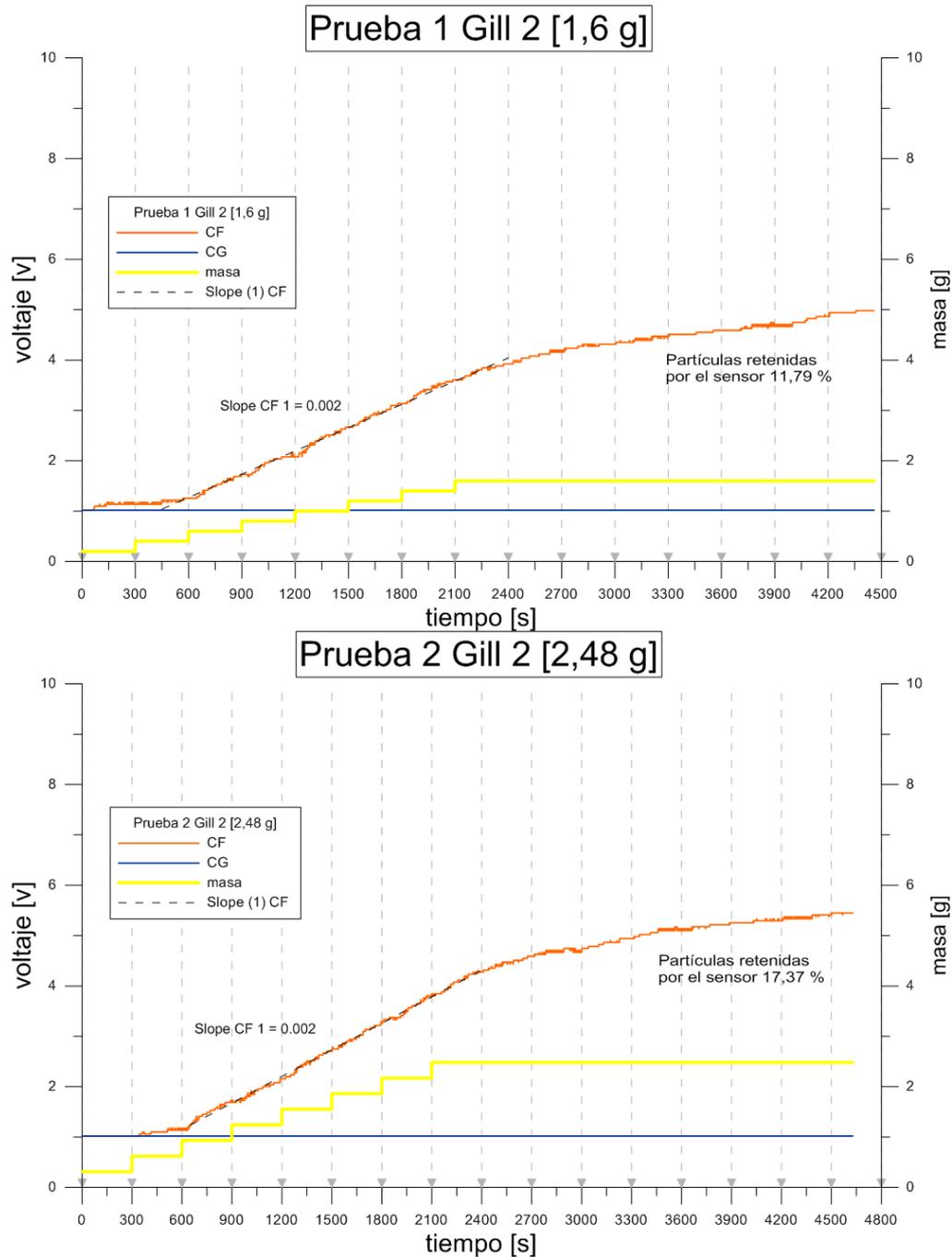
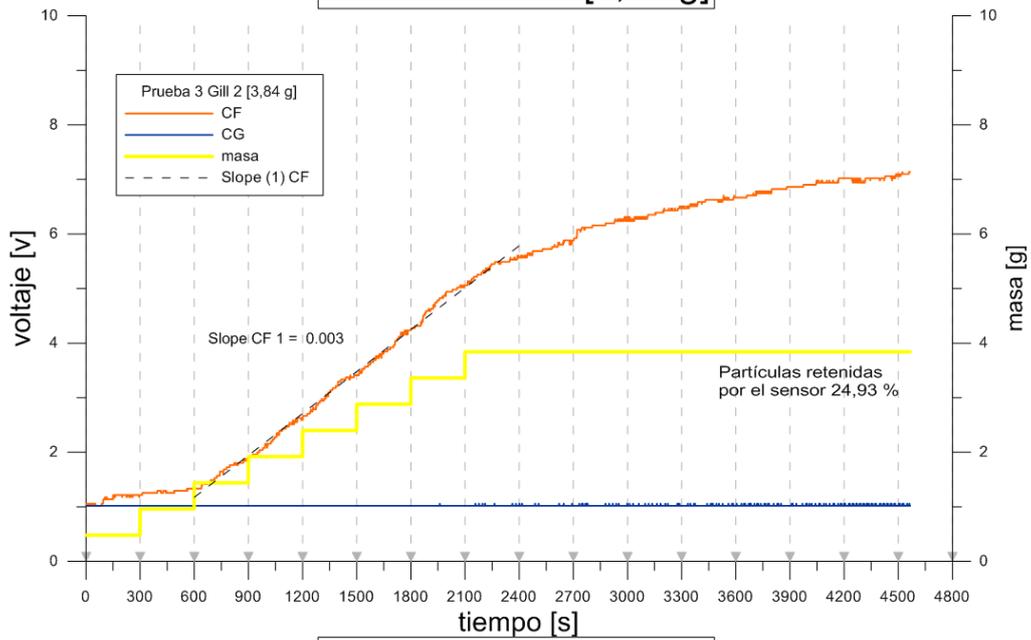


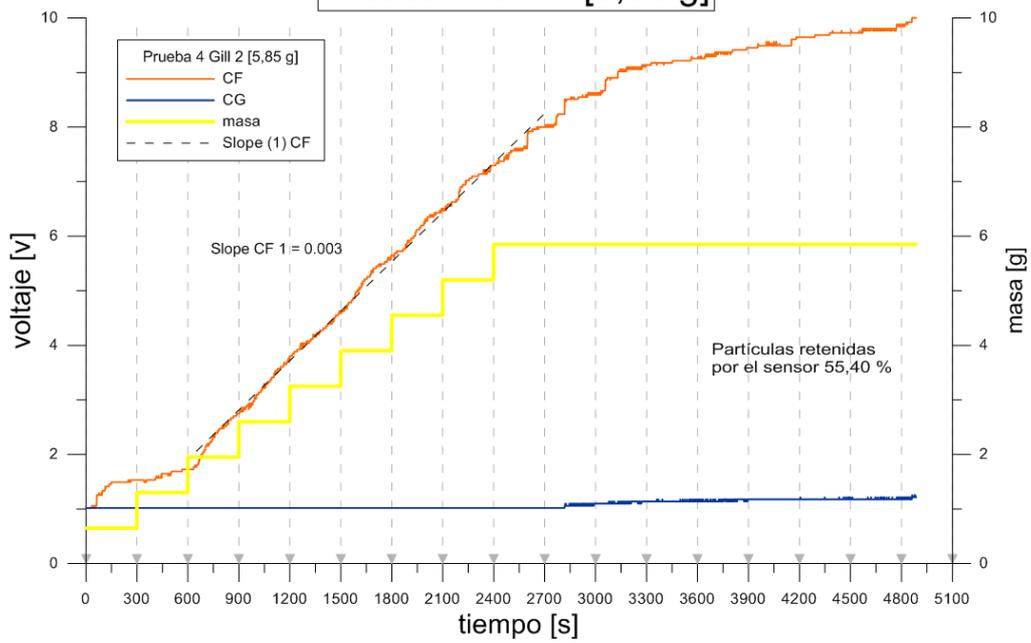
Figura. 96. Curvas de comportamiento del canal fino y grueso en las pruebas mezcla de tipologías en aceite.

- Para las pruebas 1 y 2, el voltaje de salida del canal fino mantiene una relación directa con la masa adicionada y retenida por el sensor.
- El canal grueso no genera ninguna señal por tratarse de tipologías finas y masas totales muy reducidas en estas pruebas.

Prueba 3 Gill 2 [3,84 g]



Prueba 4 Gill 2 [5,85 g]



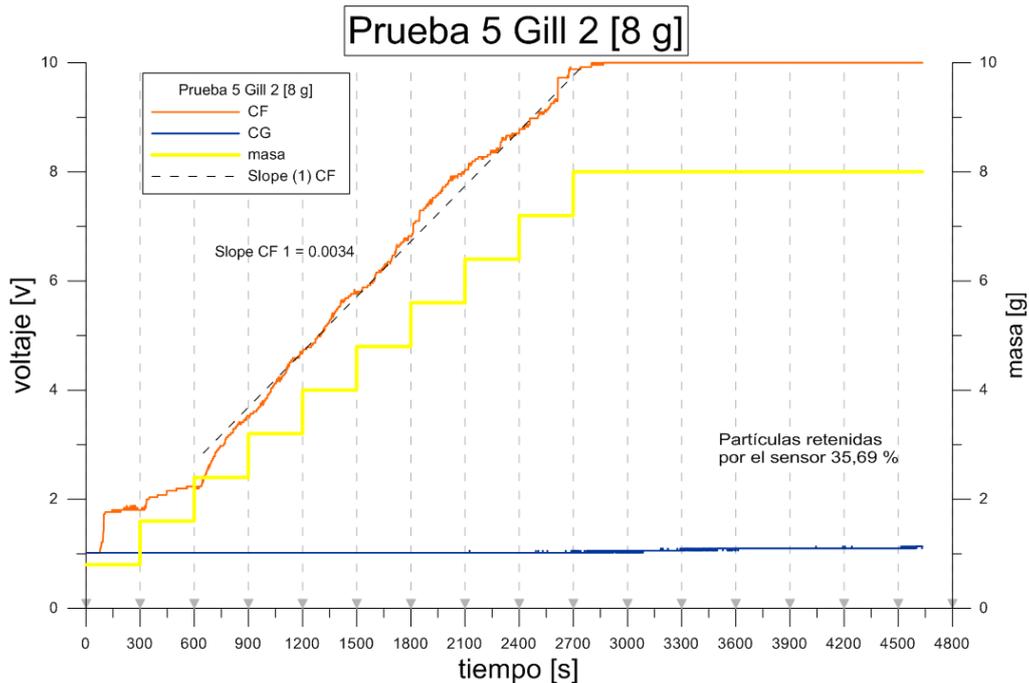


Figura. 97. Curvas de comportamiento del canal fino y grueso en las pruebas mezcla de tipologías en aceite.

- La señal de salida del canal fino guarda una relación directamente proporcional a la masa adicionada y retenida por el sensor ya que, en cada una de las cinco pruebas, su señal aumenta.
- En las pruebas 3, 4 y 5 se observa una pequeña influencia del canal grueso, debido al aumento de la masa adicionada y al involucramiento de masas de mayor tamaño.

En la sexta, y última prueba, se realizó un cambio con respecto a los anteriores test. Además de mezclar todas las tipologías se hizo variar la masa agregando, de manera creciente, poca cantidad de partículas finas al inicio hasta terminar con gran masa de partículas gruesas al final.

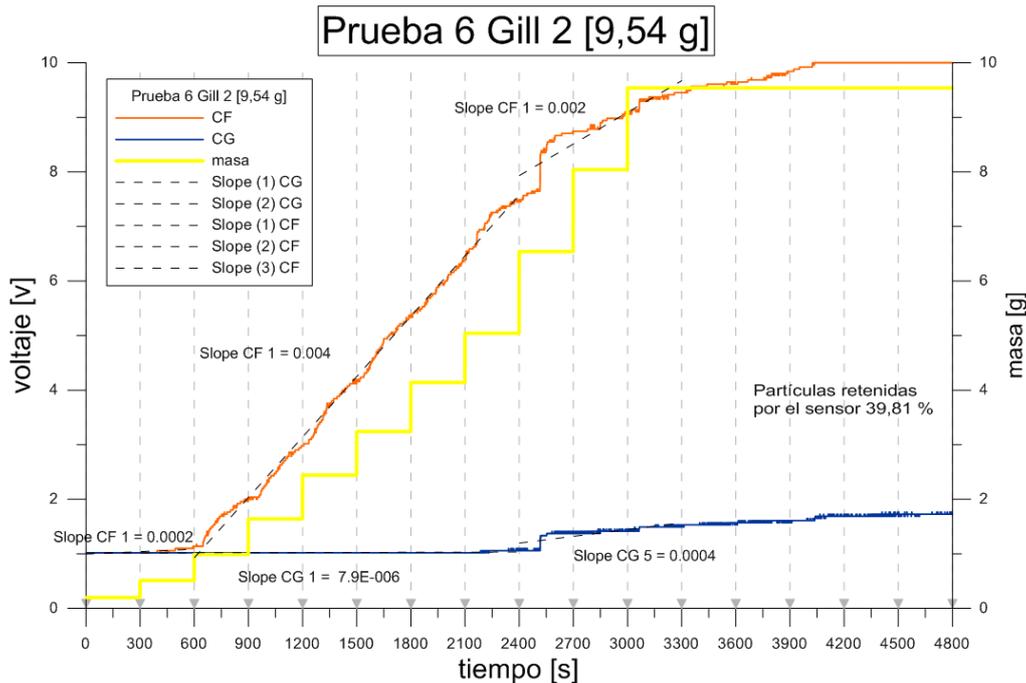


Figura. 98. Curvas de comportamiento del canal fino y grueso en las pruebas mezcla de tipologías en aceite.

- Para la prueba 6 en el canal fino, la primera pendiente termina con una zona donde las tipologías están dentro de su rango de trabajo $<10 \mu\text{m}$ y $<44 \mu\text{m}$ las cantidades son muy pequeñas, pero aún así se detecta un ligero ascenso.
- La segunda pendiente mantiene una tendencia más pronunciada, lo conforman las tipologías 149-297 μm , 125-250 μm , 250-315 μm , 125-250 μm E, y 250-315 μm E, en su mayoría son las tipologías que influenciaban dicho canal.
- La tercera pendiente es menos pronunciada y lo conforman las tipologías 315-630 μm , 1-2mm y $<12 \text{mm}$, debido a que estas tipologías influyen mejor al canal grueso.
- Para la prueba 6, los primeros tramos de adición la señal del canal grueso pasa prácticamente en el cero de calibración debido a que las tipologías $<10 \mu\text{m}$, $<44 \mu\text{m}$, 149-297 μm , 125-250 μm , 250-315 μm , 125-250 μm E, y 250-315 no generan efecto.
- En la señal del canal grueso se distingue un salto aproximadamente en el segundo 2550 (minuto 42), específicamente en la adición de la tipología 315-630 μm , como se vio en el apartado del “análisis del sensor en vacío”, pertenece al grupo de tipologías que generan señal en dicho canal.

A continuación se pudo observar imágenes del material retenido por el imán del sensor después de haber terminado las correspondientes pruebas.

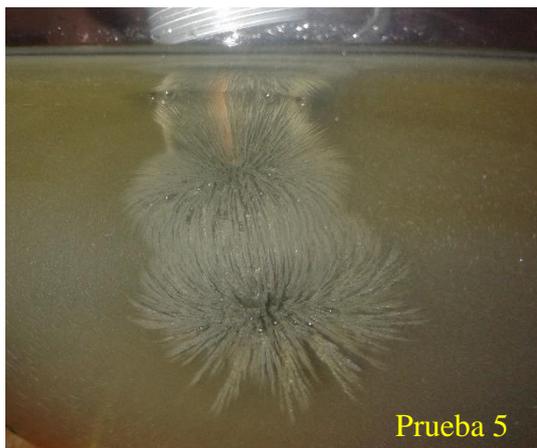
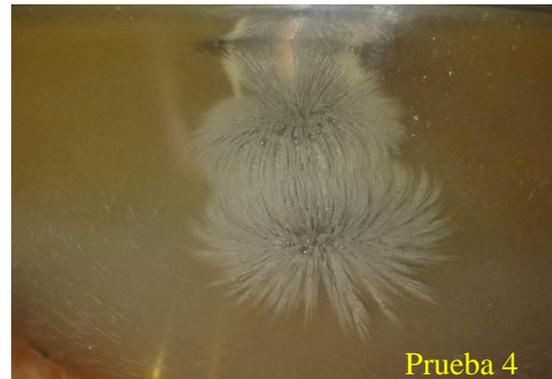
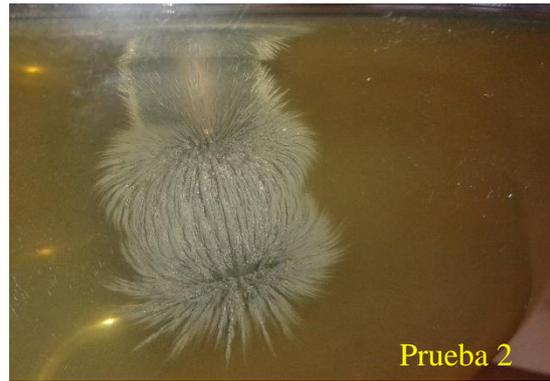


Figura. 99. Partículas retenidas por el sensor en las pruebas mixtas.

- Como se puede apreciar en la **Figura. 99**, la masa retenida en la prueba 6, a simple vista, aparenta como si hubiera retenido menor cantidad de masa comparándola con la prueba 5, pero la realidad es que, en esta última, existe mayor masa de partículas gruesas que se adicionaron en esta prueba representando un 47% de la masa total.
- Esta afirmación se corrobora con la medida de las señales de salida del canal grueso, en el cual se observa un aumento en la señal al detectar partículas gruesas.

Las principales conclusiones de esta prueba son:

Las partículas gruesas utilizadas específicamente, como las de 3.175 mm y las masas <12 mm, no influyeron en las pruebas de mezcla de partículas debido a que estas colmataban rápidamente una vez que eran vertidas en el aceite.

El sensor reacciona de manera favorable a la prueba de mezcla de tipologías, ya que puede diferenciar claramente la presencia de partículas gruesas 1-2 mm. Esto es importante ya que denotarían una señal de alarma efectiva a la hora de realizar las operaciones de monitoreo.

3.1.9 Correlación con PQ Index.

Con el objetivo de relacionar la medida del sensor con esta técnica off-line, tan utilizada en el campo del mantenimiento de sistemas mecánicos, se procedió a realizar un estudio de correlación. De todas las mediciones que se realizaron, se extrajo una muestra de referencia de 100 ml de aceite lubricante mientras estaba en proceso de agitación, para que posteriormente fueran medidas por los laboratorios de una reputada compañía eléctrica mediante la medida del PQ Index, de manera que se pueda contrastar y correlacionar con los resultados obtenidos por el sensor.

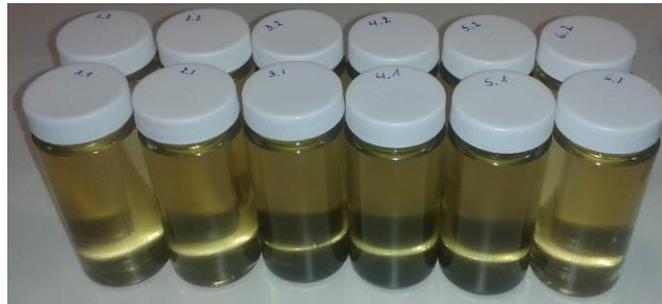


Figura. 100. Muestras para pruebas del PQ Index.

Para el análisis de la correlación de los datos del Gill 2 con el PQ Index se realizaron dos muestreos durante las pruebas, a mitad y al final del test, respectivamente, con el agitador comercial en funcionamiento, del cual se obtuvieron los siguientes resultados.

muestra	PQ1	masa mitad	CF	CG
1.1	1585	1.20	3.14 V	1.02 V
2.1	2990	1.86	3.29 V	1.02 V
3.1	4842	2.88	4.24 V	1.02 V
4.1	5560	3.90	5.65 V	1.02 V
5.1	7355	4.80	6.82 V	1.02 V
6.1	4992	3.24	5.33 V	1.02 V

Tabla 23. Datos del PQ index con las muestras tomadas a mitad de prueba.

A continuación se graficó los datos del análisis PQ index con las muestras tomadas a mitad de prueba.

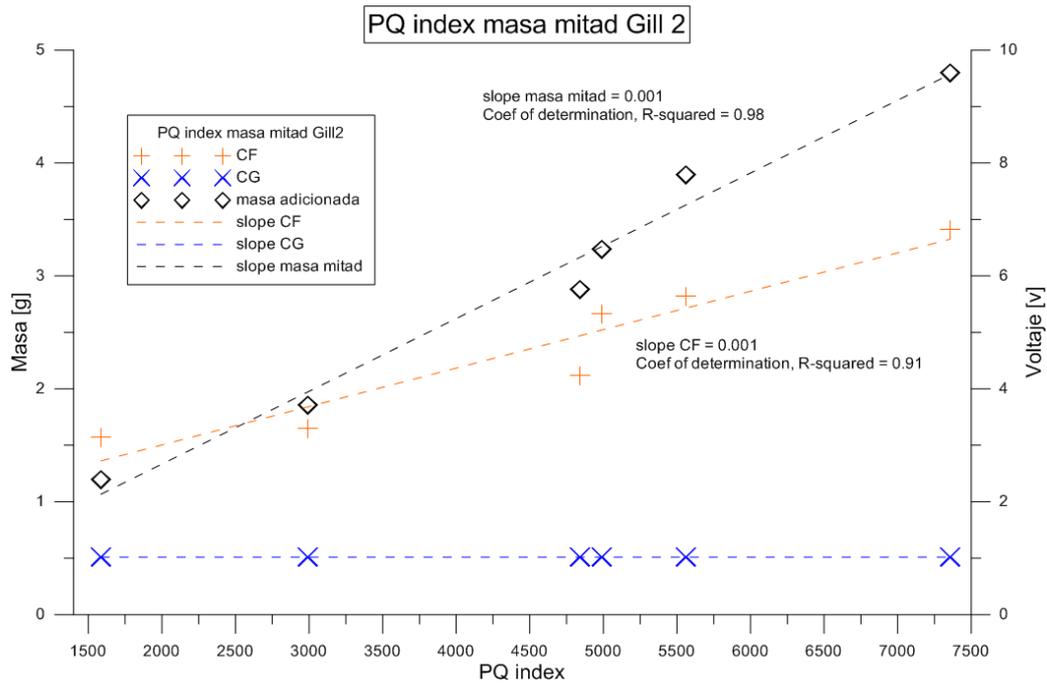


Figura. 101. Correlación de las muestra mitad de prueba con el PQ index.

- Como se puede observar en la **Figura. 101**, los coeficientes de determinación indican un comportamiento aceptable del sensor al correlacionar la señal del canal fino con el PQ index.
- Tan solo se observa aumento en el canal fino ya que hasta el desarrollo del primer muestreo sólo se habían adicionado partículas finas.

muestra	PQ 2	masa final	CF	CG
1.2	847	1.6	3.92 V	1.02 V
2.2	1710	2.48	4.27 V	1.02 V
3.2	3135	3.84	5.57 V	1.02 V
4.2	3500	5.85	8.00 V	1.02 V
5.2	5007	8	10.00 V	1.02 V
6.2	2007	9.54	9.45 V	1.53 V

Tabla 24. Datos del PQ index con las muestras tomadas a final de prueba.

A continuación se graficaron los datos del análisis PQ index con las muestras tomadas a final de prueba.

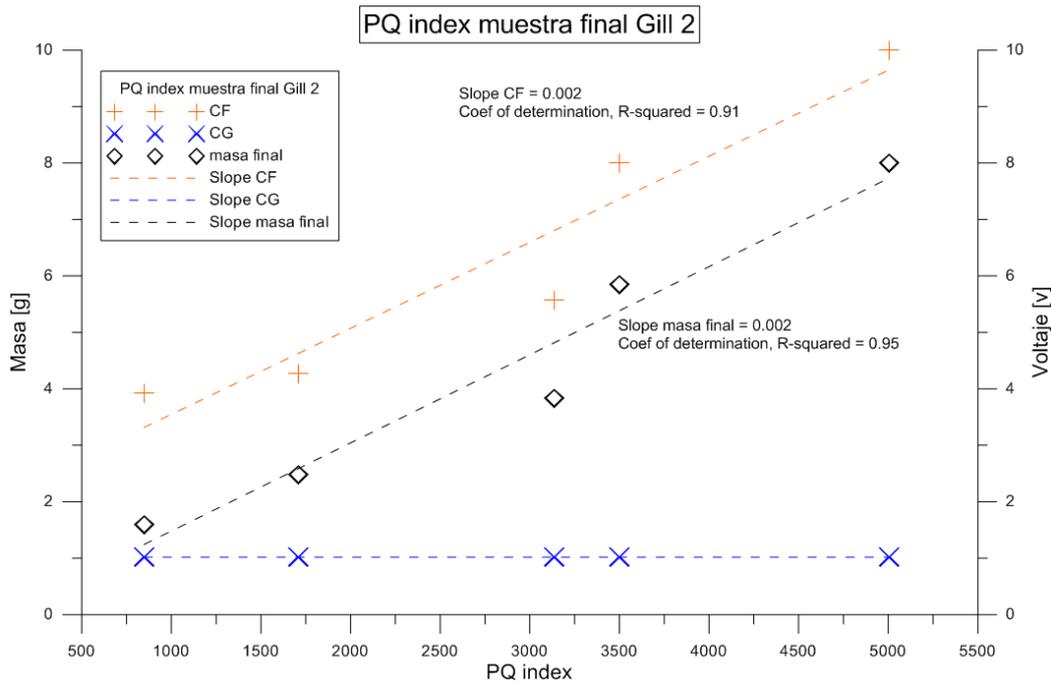


Figura. 102. Correlación de la muestra final de prueba con el PQ index.

- No se tomaron los datos la prueba 6 debido a que esta genera una inconsistencia en la medida.

Esto se debe a que gran parte de las masas adicionadas en la prueba 6 pertenecen a las tipologías 3,175 mm y <12mm representando un 47% de la masa total aportada y estas tienden a colmatarse fácilmente, por lo que los datos de muestreo no son representativos.

Las principales conclusiones de esta prueba son:

En general, existe una buena correlación entre la señal del canal fino del sensor y el PQ index, pues como quedó evidenciado en el apartado de pruebas de sensibilidad, en el que se mezclaron todas las tipologías, las partículas gruesas tienden a colmatarse por lo que su detección es nula.

3.1.10 Pruebas complementarias.

Debido a las mejoras que lleva consigo el sensor se realizaron algunas pruebas complementarias para comprobar los diferentes parámetros accesorios.

3.1.10.1 Verificación del módulo de calibración del límite de saturación de partículas.

Para verificar el funcionamiento del módulo de calibración del límite de saturación de partículas, se partió planteando diferentes masas como límite de saturación en el canal grueso y fino, para luego comprobar el comportamiento del sensor al hacer incidir sobre las regletas de calibración proporcionadas por la empresa fabricante.

Primera prueba de calibración canal grueso: Se acercó el sensor a un fragmento grueso de metal de masa 4,5 gramos y se presionó “Full Scale Coarse”.



Figura. 103. Uso de un fragmento grueso como límite de calibración canal grueso.

Como se puede apreciar en la **Figura. 104**, se estimó la masa aproximada de cada uno de los espacios de la regleta de calibración, usando las fórmulas aplicadas en el apartado “cálculo del número de partículas”.



Figura. 104 . Regleta de calibración para el canal grueso.

Seguidamente se hizo pasar el sensor por cada una de las posiciones de la regleta de calibración para ver su comportamiento.





Figura. 105. Verificación de las diferentes posiciones de la regleta de calibración.

Segunda prueba de calibración del canal grueso: Se realizó la misma prueba pero usando una partícula pequeña de 0,014 gramos.

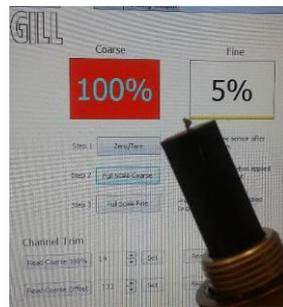


Figura. 106. Uso de un fragmento pequeño como límite de calibración del canal grueso.

Nuevamente se hizo pasar el sensor por todas las posiciones de la regleta de calibración para ver su comportamiento.



Figura. 107. Verificación de la regleta de calibración.

A continuación se hizo una tabla con los datos obtenidos en las dos calibraciones del canal grueso.

Coarse iron ball bearings - 2mm		Primera calibración 4,5 [g]		Segunda calibración 0,014	
	Masa [g]	Coarse	Fine	Coarse	Fine
2 balls	0.07	2%	12%	100%	12%
6 balls	0.20	4%	33%		
10 balls	0.33	6%	43%		
14 balls	0.46	5%	38%		
18 balls	0.59	9%	56%		

Tabla 25. Pruebas de calibración canal grueso.

Como se puede ver en la **Tabla 25**, debido al cambio del límite de calibración, varía el punto de saturación. En la primera calibración el sensor no llegó a saturar el canal grueso. En la segunda calibración el sensor saturó en la primera posición de la regleta. Se ve influencia en el canal fino.

Primera prueba de calibración canal fino: Con partículas 125-250 μm (E) se realizó la comprobación de “Full Scale Fine”, Se acercó el sensor a una masa de 5 gramos.



Figura. 108. Uso de una gran masa de partículas finas como límite de calibración canal fino.

Seguidamente se hizo pasar el sensor por las diferentes posiciones de la regleta de calibración para ver su comportamiento.

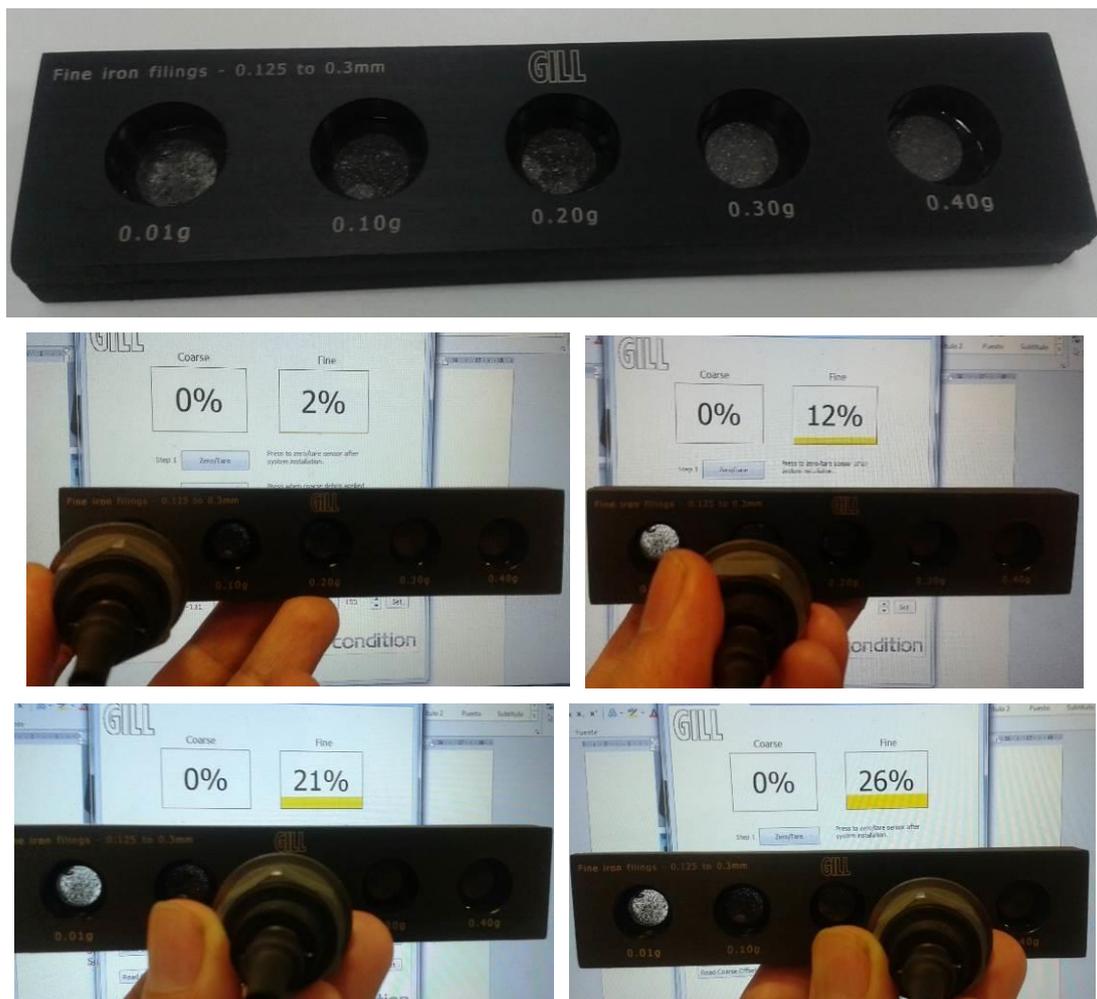




Figura. 109. Verificación de las diferentes posiciones de la regleta de calibración.

Segunda prueba de calibración del canal fino: Se realizó “Full Scale Coarse” con una masa 0,014 gramos y se presionó “Full Scale fine”.



Figura. 110. Uso de una pequeña masa de partículas finas como límite de calibración del canal fino.

Seguidamente se hizo pasar el sensor por todas las posiciones de la regleta de calibración para ver su comportamiento.



Figura. 111. Verificación de las diferentes posiciones de la regleta de calibración.

A continuación se elaboró una tabla con los datos obtenidos en las dos calibraciones del canal fino.

Fine iron fillings - 0,125 to 0,3mm		Primera calibración 5 [g]		Segunda calibración 0,014	
	Masa [g]	Coarse	Fine	Coarse	Fine
	0.01	0%	2%	0%	95%
	0.10	0%	12%	0%	100%
	0.20	0%	21%		
	0.30	0%	26%		
	0.40	0%	30%		

Tabla 26. Pruebas de calibración canal fino.

Como se puede apreciar en la **Tabla 26**, al variar el límite de calibración, cambia el punto de saturación para el canal fino. En la primera calibración el sensor no llegó a saturar el canal grueso. En la segunda calibración el sensor satura en la posición dos de la regleta de calibración. No existe influencia en el canal grueso.

3.1.10.2 Verificación del módulo estado del aceite.

Para verificar el funcionamiento del módulo estado del aceite se sumergió el sensor sobre varias muestras contaminadas con agua.

Como punto de partida se inició con una muestra 500 ppm de agua, el cual fue nuestro límite de precaución basados en la normativa española UNE-EN 61 400-4.

Parámetro	Método	Límite aceptable	Nivel de precaución	Nivel de alarma
Contenido de agua (excepto los aceites PAG)	ISO 12937 ASTM D6304	< 300 ppm	300 ppm a 600 ppm	> 600 ppm

Tabla 27. Límites de contenido de agua en los aceites de aerogeneradores.



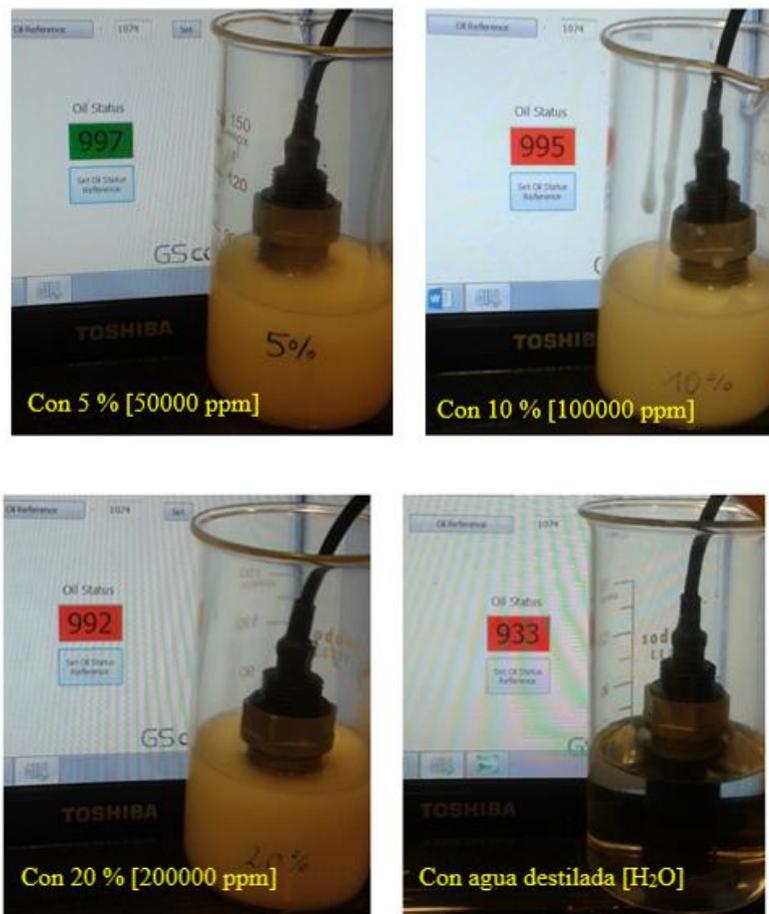


Figura. 112. Inmersió del sensor en las diferentes concentraciones de agua

A continuació se hizo una tabla con los datos obtenidos en la verificación del módulo estado del aceite.

Contenido de agua	Valores del estado del aceite
Aceite nuevo [0 ppm]	1000
500 ppm [0,05%]	1000
1000 ppm [0,1%]	1000
10000 ppm [1%]	1000
50000 ppm [5%]	997
100000 ppm [10%]	995
200000 ppm [20%]	992
Agua destilada	933

Tabla 28. Valores del estado del aceite con respecto a la presencia de agua.

- Como se puede apreciar en la **Tabla 28**, el sensor no fue lo bastante sensible para detectar presencia de agua en pequeñas proporciones.

Comentándolo con la empresa fabricante se nos informó que el sensor no fue diseñado para detectar pequeñas cantidades de agua en el aceite. En la mayoría de los casos, el agua se separa del aceite ubicándose en la parte inferior del sumidero y por lo tanto la sensibilidad no es un problema. De la

misma manera sirve como control de llenado ya que, si el sensor se queda sin aceite, aumenta la constante dieléctrica.

3.1.10.3 Verificación del módulo de control de temperatura

Para comprobar el funcionamiento del módulo de control de temperatura se sumergió el sensor junto a un termopar sobre una muestra de aceite, se fue aumentando la temperatura hasta alcanzar los 160°C, paralelamente se fue controlando el voltaje del canal de salida mediante un multímetro, como se puede apreciar en la **Figura. 113**.

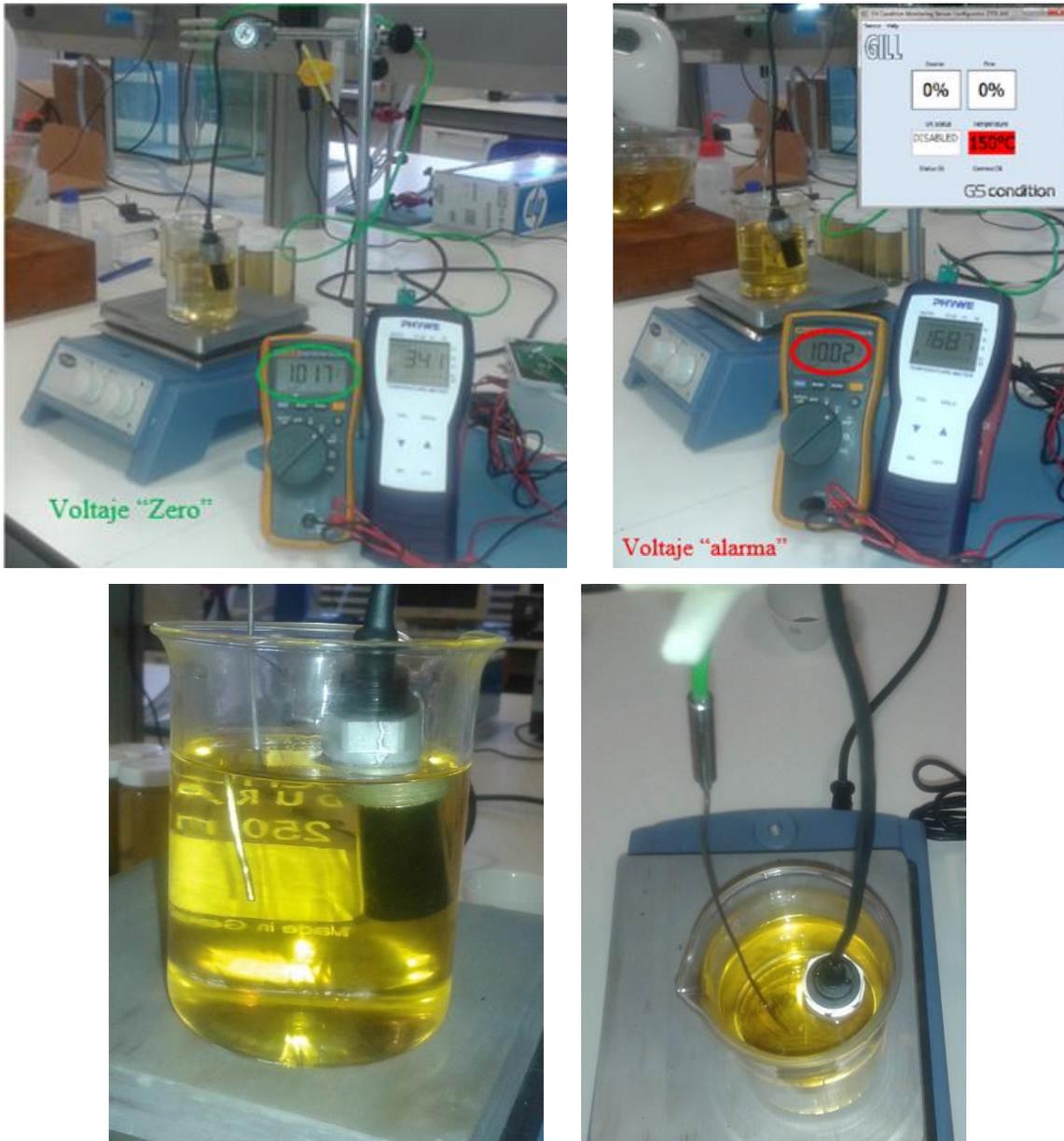


Figura. 113. Montaje y vista de las mediadas obtenidas en la prueba.

A continuación se hizo una tabla con los datos obtenidos en la verificación del módulo control de temperatura.

Temp sensor [°C]	Canal de salida [V]	Temp termopar [°C]	Temp sensor [°C]	Canal de salida [V]	Temp termopar [°C]
23	1.015	24.1	95	1.015	122
24		26.7	100		126.3
30		41.3	105		131.2
40		57.1	110		138.2
45		64.5	115		143.2
50		70.6	120		142.7
55		77.5	125		144.7
60		85.1	130		150.7
65		89	135		153
70		97.2	140		157
75		105.1	145		162
80		109.3	150		167.9
85		112.7	155		177.1
90		118.1	160		185.5

Tabla 29. Medidas obtenidas por el sensor y el termopar.

- Como se puede apreciar en la **Tabla 28**, la señal del voltaje para medir la temperatura no genera una respuesta lineal, solamente mide “zero” o “full scale”.
- Resaltado en rojo se muestra la referencia a la que fue configurado el sensor, para indicar alarma por alta temperatura.

A continuación se graficaron los siguientes datos.

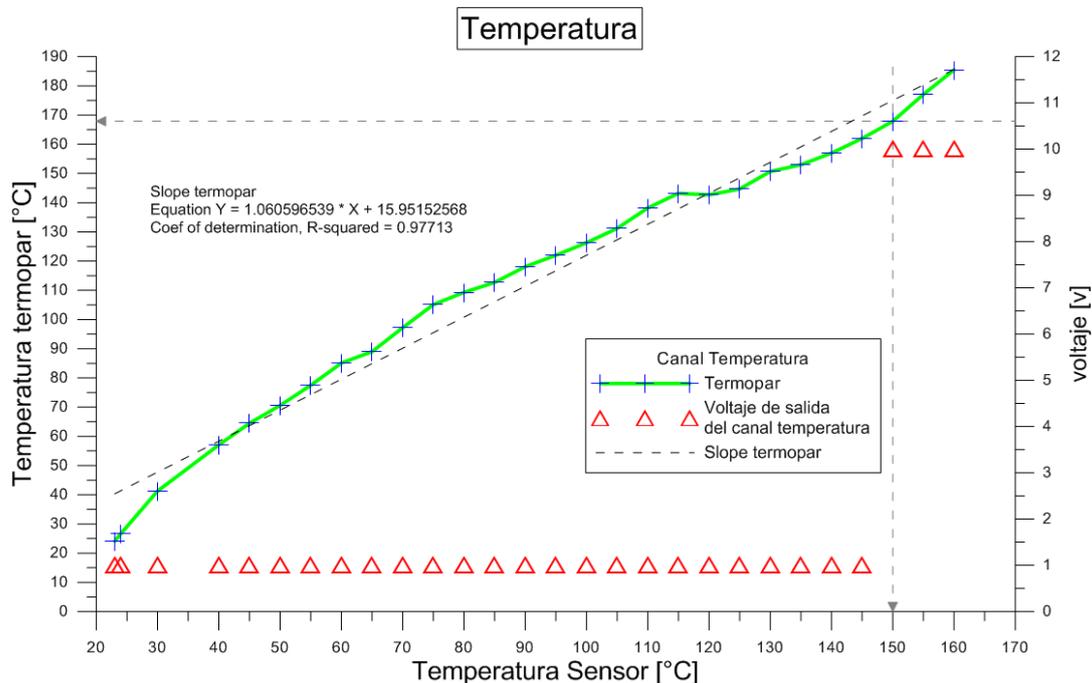


Figura. 114. Verificación del voltaje de salida del canal de temperatura

- Como se puede observar en la **Figura. 114**, existe un desfase de aproximadamente 20 grados entre la respuesta de la temperatura que indica en la pantalla el software del sensor y el termopar.

- Se puede corroborar el comportamiento de la señal que previamente fue configurada para que a 150°C lleve a la saturación a este canal.

3.1.10.4 Influencia de la posición de las partículas con respecto a los canales de salida

Otra de las pruebas complementarias fue verificar el voltaje de salida con partículas gruesas, mientras se hacía variar su posición.



Figura 115. Medida de partícula grande isomorfa en dos posiciones.

- Por lo que se pudo observar en la **Figura 115**, dicha partícula satura la señal del canal grueso mientras que el voltaje en el canal fino no presenta una variación considerable, encontrándose muy próximo al voltaje “ZERO”, esto ocurre para ambos canales, independientemente de la posición en la que se adhiere la partícula al sensor.

A continuación se realizó el mismo procedimiento con una partícula plana.



Figura 116. Medida de partícula gruesa plana dos posiciones.

- Como se puede apreciar en la **Figura 116**, el voltaje de salida del canal grueso varía considerablemente según la posición en la que se adhiere la partícula, mientras que el canal fino se mantiene igual.
- Como conclusión, para partículas gruesas la señal de salida del sensor no varía, mientras que para partículas planas la señal se vio claramente afectada por la posición.

También se verificó si el sensor Gill 2 se vio afectado por las partículas que se adhieren sobre los laterales del sensor.



Figura. 117. Señal adhiriendo las partículas en los laterales del sensor.

- Como se puede apreciar en la **Figura. 117**, tanto las partículas finas como gruesas no producen un cambio considerable en la señal de salida de ambos canales.

Las principales conclusiones de las pruebas complementarias son:

El sensor presenta una mejora sustancial al permitir al usuario calibrar según su criterio, para su aplicación como límite de saturación, mediante un software fácil y amigable lleva poco tiempo realizar esta operación.

Otra mejora es la adición de un tercer canal que puede ser configurado para detectar disminución en el nivel de aceite, sin embargo no es muy sensible para detectar el estado del aceite con respecto a la contaminación por agua.

Otra aplicación del tercer canal es el monitoreo de la temperatura del aceite, el cual es fácilmente configurable y guarda una buena correlación en su desempeño al ser comparado con un termopar.

Para nuestro estudio resultó una desventaja que el sensor no cense las partículas que se adhieren en los laterales pues toda la masa retenida por el imán del sensor no corresponde a la señal que nos entregan ambos canales.

4 Conclusiones

La realización de la evaluación en laboratorio de Gill 2 para el monitorizado on-line del desgaste en multiplicadoras de aerogenerador, se realizó de manera satisfactoria, ya que se pudo observar un buen comportamiento del sensor en su funcionamiento de detección de partículas.

El sensor desempeñó correctamente su función, tanto en las pruebas en vacío como en aceite. Según su respuesta, se llegó a la conclusión que se trata de un sensor de detección másico, es decir, aumenta su valor dependiendo de la masa detectada, no tanto por el número de partículas, ya que para una misma masa el número de partículas que se necesita para que saturen los canales varían desde el orden de millones, en el caso de tipologías pequeñas, hasta unidades, en el caso de tipologías grandes.

Se puede estimar el tamaño de las partículas adheridas, conociendo los voltajes de salida de ambos canales y pudiendo relacionarlos con los diferentes diámetros medios de partículas, ya que dependiendo de uno u otro tamaño, esto influye en el grado de severidad del desgaste, además este sensor posee la ventaja de conocer a priori las posibles interferencias entre canales y responder favorablemente a todas las cantidades de masa.

Asimismo, el software para la configuración y calibración de los límites de saturación representa una mejora sustancial para su desempeño.

Se pudo observar un comportamiento satisfactorio del sensor sumergido en aceite, debido a que éste presenta un comportamiento muy similar al funcionamiento de las pruebas en vacío, es decir, el aceite no representa un obstáculo en la retención de partículas.

El sensor reaccionó de manera favorable a las pruebas en aceite y con mezcla de partículas, ya que puede diferenciar claramente la presencia de partículas grandes, que denotarían una señal de alarma efectiva a la hora de realizar las operaciones de monitoreo y justificar desgastes anómalos.

La tasa de recogida de partículas por el sensor es constante hasta llegado el tamaño de 1-2 mm, esto resulta lógico, ya que las partículas de mayor tamaño tienden a depositarse fácilmente en el fondo del sistema y cada vez le resulta difícil encontrar partículas en suspensión. Sin embargo, la masa retenida en el sensor no es un dato que se pueda contrastar debido a que las partículas se adhieren a los laterales del sensor y no aportan información, pero de igual manera son atraídas por el imán y representan parte de la masa.

En general, existe una buena correlación entre la señal del canal fino del sensor y el PQ Index, pues como quedó evidenciado en el apartado de pruebas de sensibilidad, donde se mezclaron todas las tipologías, las partículas gruesas tienden a colmatar por lo que su detección es nula.

Este sensor posee aplicaciones complementarias de gran interés, pues mediante un tercer canal se puede configurar para detectar disminución del nivel de aceite, contaminación por presencia de agua (aunque los resultados ofrecidos por este sensor no fueron satisfactorios al respecto), y conocer la temperatura del aceite, dichas mejoras ofrecen muchas ventajas al ser aplicadas.

La capacidad de detección del sensor debe ser un factor a tomar en cuenta a la hora de ubicarlo en el lugar de trabajo, para lo cual, si se va a disponer de este sensor se recomienda el uso de varios ejemplares, colocándolos en diferentes espacios, con el fin de comparar la tasa de recogida de partículas, de manera que se pueda eliminar variabilidad con las distintas tasas de recolección.

4.1 Trabajos futuros

A la vista de los resultados obtenidos con el sensor objeto de estudio sería conveniente, como colofón y trabajo futuro, su aplicación directa sobre la multiplicadora en casos reales, de manera que ello nos permita ver claramente el desempeño efectivo del sensor, así como las ventajas inherentes al mismo.

Sin perjuicio de que el objeto de estudio de este trabajo se circunscriba a la incidencia del sensor sobre la multiplicadora, se pone de manifiesto su aplicabilidad en otros campos, tales como la automoción, en donde su uso, tal y como se observa en nuestras conclusiones podría producir en el futuro ventajas similares.

5 Pliego de condiciones

5.1 Equipos de protección individual (EPIs).

Se detallan a continuación los materiales con los que se tiene que proteger cualquier persona que acceda al laboratorio.

5.1.1 Protección de los ojos.

Durante todas las pruebas que se realicen en el laboratorio, el personal que esté realizándolas ha de estar en todo momento equipado con gafas de seguridad.

Además, es interesante que se utilicen gafas de vista antes que lentes de contacto, pues cualquier contacto con alguna pequeña partícula o con el aceite del ensayo puede irritar los ojos, provocando con seguridad daños más graves en el caso de que se usen lentillas de contacto.

5.1.2 Protección de las manos.

Para el experimento que se ha de realizar en el laboratorio, es obligatorio el uso de guantes de nitrilo a la hora de manipular aceites lubricantes y productos químicos. Además, después de haber terminado una tarea y antes de empezar otra, es muy recomendable lavarse las manos con abundante agua y jabón.

5.1.3 Protección del cuerpo.

Para la protección del cuerpo durante el trabajo en el laboratorio, se recomienda el uso de batas de material resistente y cómodo, para prevenir salpicaduras de aceite. Trabajo

5.2 Gestión de residuos.

5.2.1 Introducción.

A lo largo de este apartado se explicarán todos los residuos formados en el laboratorio en una jornada de trabajo, tanto los residuos líquidos como los sólidos. Los residuos se irán almacenando en diferentes envases, que van correctamente etiquetados y que se guardan en un almacén temporal de residuos, donde esperan a ser recogidos por la empresa gestora.

5.2.2 Residuos líquidos.

5.2.2.1 Aceite lubricante usado en el experimento principal.

Representa la mayor cantidad de residuos generados en el laboratorio. Son dos bidones con 20 litros de aceite lubricante respectivamente del que se va extrayendo aceite para hacer las diferentes pruebas. Una vez que se acaba un experimento, y que ya no se va a volver a utilizar ese mismo aceite, ha de vaciarse en los recipientes existentes para almacenar los aceites usados y gestionado de la forma adecuada.

5.2.3 Residuos sólidos.

5.2.3.1 Papeles, cartones y plásticos.

Existe, a disposición de quienes estén realizando los experimentos en el laboratorio, una papeleras para tirar papeles y cartones innecesarios, así como otra para plásticos.

Cabe destacar que si cualquiera de estos productos está impregnado de aceite u otros productos químicos, pasa a ser considerado como residuo tóxico, por lo que se ha de tratar de diferente manera.

5.2.3.2 Recipientes contaminados.

En este grupo se incluyen los recipientes de toma de muestras que se utilizan en el laboratorio, así como todo el material empleado en los ensayos de caracterización del aceite.

5.2.3.3 Materiales impregnados de hidrocarburos.

En este grupo se engloba, principalmente:

- Papeles de limpieza absorbentes, utilizados para limpiar las mesas y el suelo en caso de derrames de aceites indeseados.
- Guantes de nitrilo y de plástico en general, utilizados durante los diferentes experimentos.
- Papeles y plásticos que no pueden tirarse a las papeleras correspondientes por contaminación con aceites lubricantes.

6 PRESUPUESTO.

6.1 Acondicionamiento del laboratorio.

A continuación, se va a proceder a comentar todos y cada uno de los costes asociados a los elementos que se han necesitado para poder realizar el montaje de los equipos y las pruebas previas al experimento principal.

6.1.1 Costes de los equipos.

Se adjunta una tabla del coste de los equipos adquiridos o utilizados a lo largo de este proyecto por horas de uso, se ha calculado la vida útil en horas de todos los instrumentos. A partir de la fórmula siguiente se obtiene el coste de uso de los equipos:

$$\text{Coste de uso del equipo} = \frac{\text{Tiempo de uso}}{\text{Vida útil}} \cdot \text{Coste del equipo}$$

Ecuación 3. Cálculo del coste de uso de un equipo.

Equipo	Vida útil (horas)	Tiempo de uso (horas)	Coste equipo (€)	Coste de uso equipo
Ordenador	10000	350	400,00	14,00 €
Fuente de alimentación: 12V – 1A - 12W	35000	100	61,00	0,17 €
Data logger	2000	50	121,60	3,04 €
Una batidora comercial - Batidora amasadora (500 W), 5 velocidades + turbo	500	50	68,7	6,87 €
Multímetro	2000	100	50,00	2,50 €
Balanza	5000	5	120,00	0,12 €
Cronómetro	1000	55	3,00	0,17 €
Total IVA incluido				26,87 €

Tabla 30. Coste de los equipos principales.

Se adjunta, a continuación, una tabla en la que se adjuntan otros instrumentos utilizados. Estos equipos son adicionales, y se adjunta el precio estimado por el uso de dichos equipos.

quipo	Horas	Coste de uso equipo IVA incluido (€/h)	Coste total
Microscopio	2	20	40,00 €
Karl Fischer Titrator	1	50	50,00 €

Termopar	1	20	20,00 €
Estufa	2	30	60,00 €
Termómetro	2	10	20,00 €
Total IVA incluido			190,00 €

Tabla 31. Coste de los equipos secundarios.

6.1.2 Costes totales en equipamiento del laboratorio.

Concepto	Coste total IVA incluido
Equipos principales	26,87 €
Equipos adicionales	190,00 €
Total	216,87 €

Tabla 32. Costes de equipamiento.

Por tanto, el coste total en acondicionamiento del laboratorio ha sido de 216,87€.

6.2 Material utilizado.

6.2.1 Introducción.

A continuación se detallan los costes del material necesario para la realización de los experimentos, tanto del material de ensayo como materiales fungibles.

6.2.2 Costes de material de ensayo.

En este apartado se adjunta el coste de las partículas, así como sus gastos de envío, el aceite utilizado durante los experimentos.

Material	Unidades	Coste unidad (€)	Coste total IVA
Recipiente de vidrio para horno capacidad 2.5- 3 litros.	1	15,87	19,20 €
Aceite Renolin Unisyn CLP 320	1	316,00	400,00 €
(00170) Iron powder, spherical (<10 µm)	1	47,93	58,00 €
(39813) Iron powder, -325 mesh, <44 µm	1	32,70	39,57 €
(41830) Iron sponge, -50+100 mesh 149-297	1	23,30	28,19 €

(14183) Iron powder, -20 mesh	1	175,00	211,75 €
(39708) Iron granules, 1-2 mm		36,1	43,68 €
(42385) Iron slug 3.175 mm	1	52,98	64,00 €
(10213) Iron pieces, irregularly shaped <12 mm	1	42,98	52,00 €
(44212) Copper shot, 0.6-0.8 mm	1	75,10	90,87 €
Equipo de seguridad	1	50,00	60,5 €
Total			1067,76 €

Tabla 33. Costes del material de ensayo.

6.2.3 Costes de material fungible.

Se adjunta, a continuación, los costes de material fungible usados en las diferentes pruebas.

Material	Coste total IVA
Guantes	10,00 €
Material de papelería	30,00 €
Papel absorbente de laboratorio	160,00 €
Recipientes de plástico	20,00 €
Total	220,00 €

Tabla 34. Coste del material fungible.

6.2.4 Costes totales de material.

Concepto	Coste total IVA incluido
Material de ensayo	1067,76 €
Material fungible	220,00 €
Total	1287,76 €

Tabla 35. Coste de material usado.

Como se puede ver en la **Tabla 35**, el coste total de material ha sido de 1287,76 €.

6.3 Salarios.

Como se puede ver en la **Tabla 36**, se adjunta el salario del director y el codirector del proyecto.

Empleado	Horas	€/hora	Coste total IVA incluido
Director del proyecto	20	53,40	1068,00 €
Co-director del proyecto	100	45,90	4590,00 €
Autor del proyecto	960	30,00	28800,00 €
Total			34458,00 €

Tabla 36. Coste de salarios.

6.4 Costes totales.

Costes	Coste total IVA incluido
Equipamiento del laboratorio	216,87 €
Material	1287,76 €
Salarios	34458,00 €
Total	35962,63 €

Tabla 37. Costes totales.

El coste total en la realización del proyecto, IVA incluido, se adjunta como se puede ver desglosado en la **Tabla 37**, y es de 35962,63 €.

7 Bibliografía

1. **Creus, A.** *Aerogeneradores (1ª ed)*. Barcelona : Ediciones Ceysa, Cano Pina, (2008).
2. **De Torre, S.** queaprendemoshoy.com (I). *pasado-presente-y-futuro-de-un-recurso-inagotable-i*. [En línea] 28 de Junio de 2012. [Citado el: 15 de Abril de 2016.] <http://queaprendemoshoy.com/energia-eolica-pasado-presente-y-futuro-de-un-recurso-inagotable-i/>.
3. **De la Torre, S.** queaprendemoshoy.com (II). *energia-eolica-pasado-presente-y-futuro-de-un-recurso-inagotable-ii*/. [En línea] 28 de Junio de 2012. [Citado el: 04 de abril de 2016.] <http://queaprendemoshoy.com/energia-eolica-pasado-presente-y-futuro-de-un-recurso-inagotable-ii/>.
4. **Opex-Energy-Eolica.** opex-energy.com/principio_de_funcionamiento. *Opex-Energy-Eolica*. [En línea] [Citado el: 13 de Abril de 2016.] http://opex-energy.com/eolica/principio_de_funcionamiento.html#1._AERODINAMICA_EN_AEROGENERADORES._
5. **Olivera Cruz, J.** Aerogenerador - JONATHAN Olivera Cruz - Ilustración. [En línea] 2016. <http://www.ediciona.com/aerogenerador-dirpi-53073.htm>.

6. **Opex Energy**, Eólica/principales_elementos_aerogeneradores. [En línea] [Citado el: 13 de Marzo de 2016.] http://opex-energy.com/eolica/principales_elementos_aerogeneradores.html.
7. **Fabregat, G.** Análisis y especificación técnica de las cargas de ensayo de vida acelerada para multiplicadores de aerogeneradores. [En línea] <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/15290/MEMORIA.pdf?sequence=1..>
8. **Sheng, S., Link, H., LaCava, J. van Dam, McNiff, B., Veers, P., Keller, J., Butterfield, S., y Oyague, F.** Wind Turbine Drivetrain Condition Monitoring During GRC Phase 1 and Phase 2 Testing. National Renewable Energy Laboratory. [En línea] 2011. [Citado el: 12 de marzo de 2016.] <http://www.nrel.gov/docs/fy12osti/52748.pdf>.
9. **Eólica en Ecuador: Identifican potencial eólico para generar 884 MW, 2013.** vehículo, revista eólica y del. s.l. : REVE, revista eólica y del vehículo, 2013.
10. **Ecuador, Ministerio de electricidad y energía renovable** del. Ministerio de electricidad y energía renovable del Ecuador. [En línea] 07 de Marzo de 2013. <http://www.energia.gob.ec/ministerio-de-electricidad-y-energia-renovable-presento-el-primer-atlas-eolico-del-ecuador/>.
11. **Jost, H.P.** “Lubrication (Tribology) Education and Research (“Jost Report”). *Department of Education and Science*. s.l. : HSMI. Reino Unido, 1996.
12. **Universidad Nebrija**, Lubricación. *nebrija.es*. [En línea] <http://www.nebrija.es/~alopezro/Lubricacion.pdf>.
13. **Linares, O.** American Quality Lubricants. *Fundamentos de la Tribología*. [En línea] [Citado el: 03 de marzo de 2016.] <http://www.widman.biz/boletines/20.html>.
14. **J.M., Payri. F Desantes.** *Motores de combustion interna alternativos*. s.l. : Reverte S.A., 2011.
15. **Terradillos, J.** <http://lubrication-management.com/>. *Análisis del aceite como herramienta de mejora del*. [En línea] 2004. http://lubrication-management.com/wp-content/uploads/sites/3/2014/07/An%C3%A1lisis_aceite_aerogeneradores_ES.pdf.
16. **Besa, A, Carballeira. J.** *Diagnóstico y corrección de fallos de componentes mecánicos*. Valencia : Universitat Politècnica de valència, 2015.
17. **Dupuis, Richard.** Application of Oil Debris Monitoring For Wind Turbine. *Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society*. [En línea] 2010. [Citado el: 05 de marzo de 2016.] https://www.phmsociety.org/sites/phmsociety.org/files/phm_submission/2010/phmc_10_044.pdf.
18. **Toms., Allison.** *Oil Debris Monitoring: Part of an Effective Gearbox Monitoring Strategy*. 2014.
19. **Moura PS, de Almeida AT.** *The role of demand-side management in the grid integration of wind power*. 2010.
20. **Higgins., H.** *Maintenance Engineering Handbook*. McGraw-Hill Inc., 5 edición. 1995. 9780071546461.