



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID
ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería de Organización Industrial

**“Diagnóstico de fallos en el rotor de motores
eléctricos en estado transitorio mediante
técnicas estadísticas”**

Autor:

Granados Romero, Raúl

Tutores:

García Escudero, Luis Ángel

Fernández Temprano, Miguel Alejandro

*Departamento de Estadística e
Investigación Operativa*

Valladolid, julio 2017

Índice de contenidos

Resumen	5
Palabras Clave	5
Abstract.....	7
Keywords.....	7
Capítulo 1: Introducción y objetivos.....	9
1.1 Introducción y objetivos	10
1.1.1 Justificación	10
1.1.2 Objetivos	11
Capítulo 2: Motores de inducción	13
2.1 Introducción	14
2.2 Aspectos constructivos	14
2.3 Tipos de Rotores.....	15
2.3.1 Rotor bobinado	16
2.3.2 Rotor de jaula de ardilla.....	16
2.4 Principio de funcionamiento.....	17
2.5 Tipos de arranque	18
2.5.1 Arranque directo	18
2.5.2 Arranque estrella triángulo	19
2.5.3 Arranque por transformador	19
2.6 Régimen Transitorio	20
2.7 Fallos en los motores de inducción	20
2.7.1 Fallos en el rotor.....	21
2.7.1.1 Factores dinámicos	21
2.7.1.2 Factores electromagnéticos	22
2.7.1.3 Factores térmicos	22
2.7.1.4 Factores mecánicos	23
2.7.1.5 Factores ambientales.....	24
2.7.1.6 Factores residuales	24
2.7.2 Fallos en el estator.....	24
2.7.2.1 Factores mecánicos	24

2.7.2.2 Factores térmicos	25
2.7.2.3 Factores eléctricos	27
2.7.2.4 Factores de carácter ambiental	28
2.7.3 Fallos en rodamiento y ejes	29
2.7.4 Rotura de una barra del rotor	29
2.7.4.1 Diagnóstico del estado del motor (MCSA)	30
2.7.4.2 Dominio de la frecuencia: Transformadas FT, PSD y FFT	33
Capítulo 3: Experimentación	35
3.1 Descripción de la experimentación	36
3.2 Descripción del banco de ensayos	39
3.2.1 PC	40
3.2.2 Tarjeta de adquisición de datos	40
3.2.3 Sensores	42
3.2.3.1 Sensores de tensión	42
3.2.3.2 Sensores de intensidad	43
3.2.4 Freno electromagnético	45
3.2.5 Unidad de control del freno	46
3.2.6 Motor	47
3.2.7 Inversores	48
3.3 Características medidas	52
3.3.1 Relativas a la carga del motor	52
3.3.2 Relativas al dominio de la frecuencia	54
Capítulo 4: Metodología	57
4.1 Trayectoria de armónicos	58
4.1.1 Trayectoria de armónicos de fallo en el plano frecuencia-tiempo	58
4.1.2 Adaptive Slope Transform (AST)	60
4.2 Análisis de datos funcionales	62
4.2.1 Datos funcionales	62
4.2.1.1 Concepto	62
4.2.1.2 Objetivos del Análisis Funcional	64
4.2.2 Boxplots	65
4.2.2.1 Boxplots clásicos	65

4.2.2.2	Boxplots funcionales	68
4.2.2.2.1	Introducción.....	68
4.2.2.2.1	Construcción de boxplot funcionales.....	68
4.2.3	ANOVA Funcional	72
4.2.4	Entorno de programación empleado	74
4.2.4.1	Lenguaje de programación R.....	74
4.2.4.2	Paquetes de R.....	76
Capítulo 5: Resultados.....		77
5.1	Estudio descriptivo	78
5.1.1	Comparación de inversores	80
5.1.2	Comparación del estado del motor.....	82
5.1.3	Comparación de los niveles de carga	87
5.1.4	Comparación de los armónicos	89
5.2	Boxplots funcionales	92
5.3	ANOVA funcional.....	97
Capítulo 6: Conclusiones		103
Anexo A: Resultado de los análisis		107
A.1	Análisis descriptivo.....	108
A.1.1	Comparación de inversores	108
A.1.2	Comparación de la salud del motor	113
A.1.3	Comparación de los niveles de carga	123
A.1.4	Comparación de los armónicos.....	134
A.2	Boxplots funcionales	144
A.3	ANOVA funcional	155
Anexo B: Programas en R		167
B.1	Código para los análisis descriptivos.....	168
B.2	Código para los boxplots funcionales	169
B.3	Código para los ANOVA funcionales	171
Bibliografía		173
	Páginas webs.....	174

Resumen

El principal objetivo de este trabajo consiste en establecer una metodología de diagnóstico de la rotura de una barra del rotor en un motor de inducción con estructura de jaula de ardilla a través del uso de datos funcionales. Para lograr dicho objetivo, contamos con una serie de ensayos de una experimentación que registró la señal de la corriente de alimentación del motor en dos estados, uno sano y el otro, con la barra del rotor completamente rota. Además, se han empleado dos niveles de carga distintos para estudiar su posible influencia en el experimento. El motor se ha conectado a cinco inversores diferentes para, al igual que los diferentes niveles de carga, estudiar una posible influencia. Las dos principales técnicas de datos funcionales que hemos utilizado en este proyecto son los boxplots funcionales y el ANOVA funcional.

Palabras Clave

- ❖ Motor de inducción.
- ❖ Inversor.
- ❖ Boxplot funcional.
- ❖ ANOVA funcional.
- ❖ Rotura de barras.

Abstract

The main objective of this project is to establish a methodology for the diagnostic of the breakage of a rotor bar in an induction motor with squirrel cage structure through the use of functional data. In order to achieve this objective, we have a series of tests of an experiment that registered the signal of the feed current of the motor in two states, one healthy and the other, with the rotor bar completely broken. In addition, two different loading levels have been used to study their possible influence on the experiment. The motor has been connected to five different inverters with the objective, like the different levels of load, to study a possible influence. The two main functional data techniques that we have used in this project are functional boxplots and functional ANOVA.

Keywords

- ❖ Induction motor.
- ❖ Inverter.
- ❖ Functional boxplot.
- ❖ Functional ANOVA.
- ❖ Bars breakage.

Capítulo 1

Introducción y objetivos

1.1 Introducción y objetivos

1.1.1 Justificación

La detección de fallos en motores de inducción que operan en regímenes no estacionarios se ha convertido en una necesidad en la industria actual. La mayoría de los trabajos publicados tratan con motores alimentados directamente a la red. Sin embargo, el número de motores de inducción alimentados por inversor ha aumentado significativamente en los últimos años. Por lo tanto, últimamente se han propuesto varias técnicas de detección de fallos para este tipo de motores, basadas principalmente en un procesamiento de señal de entrada adecuado para obtener indicios de fallo en el dominio frecuencia-tiempo.

El funcionamiento a velocidad fija de los motores de inducción tiene un impacto significativo en su consumo de energía y en los costos operacionales durante su vida útil. Por lo tanto, estos usos se consideran muy ineficientes. Si el motor es alimentado por inversor, la velocidad puede ser regulada y adaptada a las necesidades reales de la carga, lo que resulta en importantes ahorros de energía. Por ejemplo, un motor que funciona a media velocidad reduce su consumo en un 75%. Las recientes directivas de la Unión Europea fomentan el uso de motores de bajo consumo energético o el uso de motores normales junto con inversores, lo que explica que el número de motores de inducción alimentados por inversor haya aumentado considerablemente. Existen otras aplicaciones en las que los motores de inducción normalmente no funcionan en estado estacionario, y el uso de un inversor es obligatorio como en la tracción eléctrica o en procesos de fabricación donde la flexibilidad es una necesidad.

Este cambio en el campo de los accionamientos eléctricos también tiene un impacto sustancial en el mantenimiento. Un procedimiento de mantenimiento predictivo trata de detectar un fallo de antemano y evaluar su gravedad para comenzar el proceso de fijación, minimizando las implicaciones económicas de un fallo futuro. En el caso de motores de inducción, estos procedimientos se basan principalmente en el seguimiento y análisis de la corriente del estator y las vibraciones mecánicas. El primer método, conocido como *Motor Current Signature Analysis* es no invasivo, lo que constituye su principal beneficio sobre otros esquemas de monitorización. Sin embargo, ya que se basa en el uso de la Transformada Rápida de Fourier no es apropiado para aplicaciones donde la velocidad del motor está sujeta a cambios continuos. Incluso si hay períodos suficientemente largos de funcionamiento en estado estacionario, en el motor de inducción alimentado por inversor, el espectro de corriente es rico en contenido armónico originado por el mecanismo de conmutación del inversor y normalmente, la señal tiene un alto nivel de ruido. Algunos armónicos originados por el suministro pueden superponerse con los armónicos relacionados con fallos, haciendo más complicada su observación y posterior diagnóstico. Además, la

amplitud de algunos armónicos relacionados con fallos también depende de la frecuencia de salida asignada o del tipo de control del inversor. Todo esto ha originado un campo activo de investigación sobre la detección y diagnóstico de fallos en motores de inducción alimentados con inversor y en regímenes transitorios.

En los regímenes transitorios de motores de inducción, se necesitan otras transformaciones matemáticas aparte de la Transformada Rápida de Fourier para analizar la corriente del estator. Estas herramientas matemáticas pertenecen al campo de las herramientas de descomposición de frecuencia-tiempo. En la literatura se describe la utilización de técnicas como las transformadas basadas en *wavelet* o la *Wigner-Ville Distribution* para detectar fallos en motores de inducción con alimentación directa a la red durante el arranque. Su aplicación a motores de inducción alimentados por inversor no es sencilla. La diferencia principal entre los arranques de motores de inducción con alimentación directa a la red y alimentados por inversor es que la frecuencia de deslizamiento es baja durante todo el transitorio. En consecuencia, las trayectorias de algunos armónicos relacionados con fallos están muy cerca de la trayectoria de la componente de frecuencia principal. Como se explicará en capítulos posteriores, esta es la característica esencial que hace que la detección de fallos en motores de inducción alimentados por inversor sea tan diferente en comparación con los motores de inducción con alimentación directa a la red. En estas circunstancias, la detectabilidad del fallo se basará en las capacidades de resolución de frecuencia y tiempo de la transformación matemática utilizada para procesar la señal de corriente del estator.

1.1.2 Objetivos

El objetivo principal de este trabajo consiste en obtener información certera acerca del estado de las barras del motor de inducción, es decir, si están rotas o se encuentran completamente sanas. En nuestro caso, el motor tendrá una estructura de jaula de ardillas y se conectará a diversos inversores trabajando a una frecuencia conocida. Para realizar el trabajo nos ayudaremos de una base de datos proporcionada por el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Valladolid, su experimentación se detallará en el Capítulo 4 de este trabajo.

Para ser más concretos, se intenta buscar una metodología de diagnóstico de fallos en las barras de los motores de inducción mediante el uso de datos funcionales. Existen varias técnicas de datos funcionales que serán descritas en el Capítulo 5. Para realizar esta tarea usaremos el programa R (<https://cran.r-project.org/>) como entorno de programación. Este entorno es muy potente, de libre acceso y proporciona una amplia gama de herramientas estadísticas contribuidas por numerosos investigadores en Estadística.

Capítulo 2

Motores de inducción

2.1 Introducción

Los motores de inducción son las máquinas eléctricas más comúnmente utilizadas en la industria, en gran parte, gracias a su robustez, facilidad de mantenimiento y su reducido coste de fabricación.

Esta clase de motores representan aproximadamente el 80% de los motores eléctricos industriales, estando en cabeza en cuanto a consumidores de energía eléctrica cuando nos referimos a Industria (Rosa (2015)).

Estos motores pueden tener fallos que generan diversos problemas en las plantas industriales tales como parones de la cadena de producción con su correspondiente gasto económico. Debido a esto, en los últimos años se viene investigando en esta materia con el objetivo de reducir tiempos y costes en las líneas de producción de las diferentes empresas.

Cabe destacar que este trabajo no tiene como objetivo principal el estudio de los aspectos de Ingeniería Eléctrica subyacentes en el problema y que nos centraremos en aspectos más puramente estadísticos. No obstante, para un mayor entendimiento del problema se ha realizado una recapitulación de diversos aspectos relativos a motores y sus posibles fallos.

2.2 Aspectos constructivos

Los motores de inducción o asíncronos están contruidos por dos armaduras con campos giratorios coaxiales denominadas estator y rotor (ver Figura 2.1). El estator es la parte fija y en su interior está alojado el rotor que es la parte móvil que gira en torno a un eje. Tanto el estator como el rotor están formados por dos circuitos, uno eléctrico y otro magnético. En el circuito eléctrico, el estator está constituido por tres devanados que se pueden conectar en triángulo o en estrella formando un devanado trifásico y el rotor está formado por un devanado trifásico. El circuito magnético consiste en un conjunto de láminas apiladas de acero con forma de cilindro en el rotor y de anillo en el estator cuyo objetivo es el de disminuir las pérdidas existentes en los conductores de los devanados trifásicos situados en una especie de ranuras localizadas en la superficie interior del circuito magnético del estator. Entre el estator y el rotor existe un espacio formado por aire denominado entrehierro cuyo objetivo es el de permitir que la máquina realiza el giro.

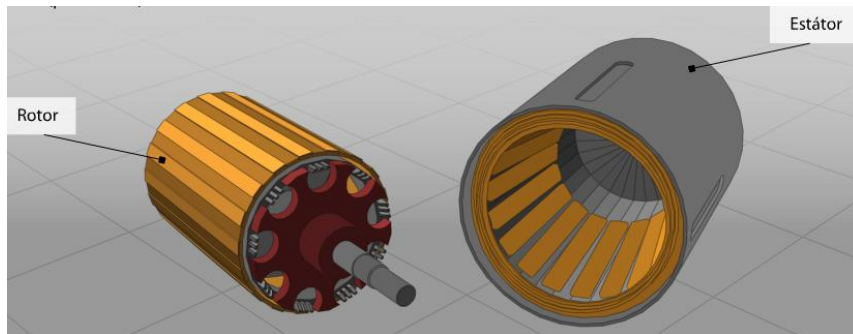


Figura 2.1 Rotor y estator de un motor de inducción.

Hasta ahora solo hemos comentado las dos partes principales que forman un motor de inducción, pero aparte del estator y el rotor, estos motores están compuestos por otros componentes necesarios para un correcto funcionamiento de la máquina como pueden ser rodamientos, carcasa, bobinado, tapas, ventiladores, etc. (Ver Figura 2.2). Estos componentes son igual de importantes que los anteriormente explicados debido a que un fallo originado por estos elementos pueden generar problemas importantes.

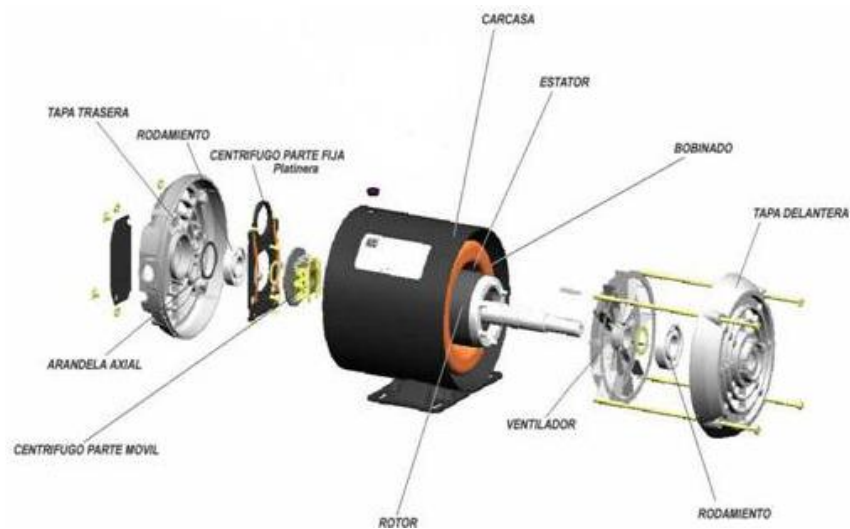


Figura 2.2 Componentes de un motor de inducción.

2.3 Tipos de Rotores

Anteriormente habíamos comentado que el circuito eléctrico del rotor estaba formado por un devanado trifásico. Dependiendo de su forma constructiva se puede diferenciar entre dos tipos de rotores: rotor bobinado o rotor “jaula de ardilla” (ver, por ejemplo, Duque y Pérez (2005)).

2.3.1 Rotor bobinado

En este tipo de rotor (ver Figura 2.3), el arrollamiento trifásico está formado por unas bobinas de hilo de cobre generalmente. Los extremos se conectan a unos anillos rozantes aislados entre sí por los que son alimentadas las bobinas. Para el arrollamiento son empleados conductores de sección rectangular o circular introducidos en las ranuras y aislados entre ellos y las entre las ranuras. En estos rotores se emplean ranuras abiertas que tiene como ventaja que las bobinas fabricadas anteriormente pueden colocarse en su posición a través de la parte superior de la ranura. Cabe destacar que es bastante más caro y de mayor de tamaño que el rotor de jaula de ardilla.

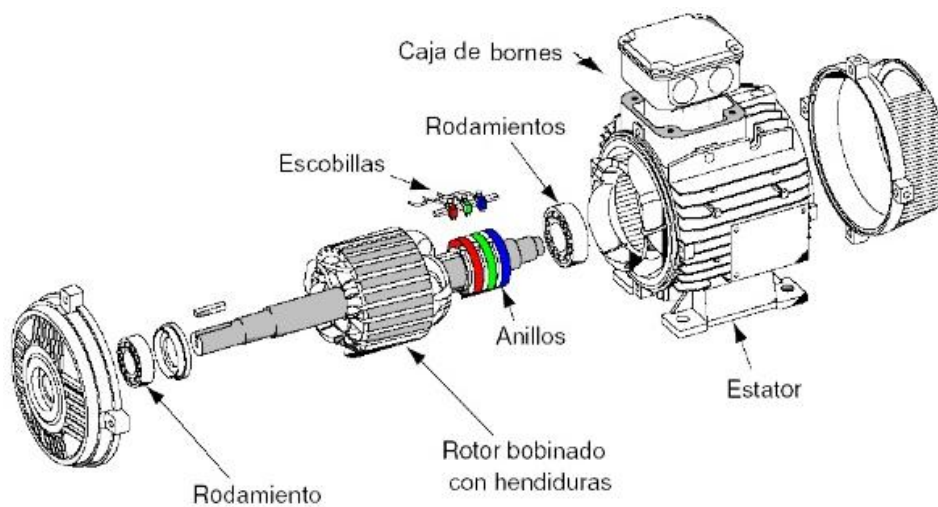


Figura 2.3 Esquema de un rotor bobinado.

2.3.2 Rotor de jaula de ardilla

Este tipo de rotor (ver Figura 2.4) es el que más se usa en la industria debido a su robustez, sencillez, bajo coste y facilidad de mantenimiento. Consiste en una serie de barras, generalmente de aluminio o cobre, selladas en sus extremos a dos anillos generando cortocircuito en ellos. Actualmente en las máquinas de menor potencia se utiliza un sistema de fundición de aluminio para construir simultáneamente las barras conductoras y los dos anillos. Cabe destacar que este tipo de rotor es el que se ha utilizado en los experimentos de este proyecto.

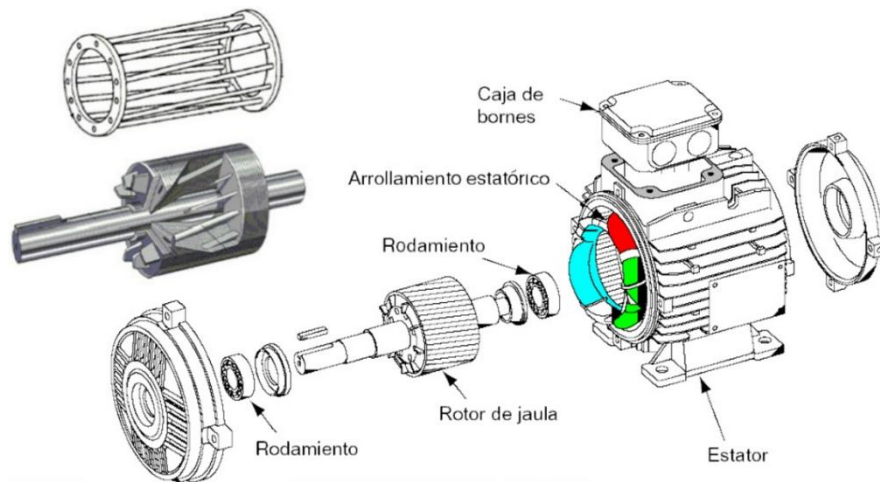


Figura 2.4 Esquema de un rotor de jaula de ardilla.

2.4 Principio de funcionamiento

El principio de funcionamiento de un motor de inducción está basado en la acción del flujo giratorio que el circuito del estator genera sobre las corrientes inducidas por el flujo en el circuito del rotor.

El flujo giratorio generado por el bobinado del estator corta los conductores del rotor, debido a esto, se crean una serie de fuerzas electromotrices inducidas. Cuando el bobinado del rotor está cerrado, las corrientes eléctricas recorren sus conductores.

La acción que se genera entre las corrientes que existen en los conductores del rotor y el flujo giratorio producen fuerzas electrodinámicas sobre dichos conductores arrastrando al rotor y obligándolo a girar en el mismo sentido que gira el campo debido a la ley de Lenz.

En los motores asíncronos, la velocidad de rotación del rotor nunca será superior a la velocidad del flujo giratorio (velocidad síncrona) porque si lo lograra se anularían todas las fuerzas electromotrices.

Para que en los conductores del rotor se origine una fuerza electromotriz es necesario que exista un movimiento relativo entre el flujo giratorio y los conductores. A esta diferencia de velocidad se le denomina deslizamiento.

2.5 Tipos de arranque

Se denomina arranque de una maquina eléctrica a la operación de puesta en marcha. En este tipo de motores, para poder realizar este proceso, es necesario que el par de arranque sea mayor que el par resistente de la carga para que se genere un momento de aceleración que hace que el motor gire a una velocidad cada vez mayor, alcanzando el régimen permanente al igualarse los pares resistente y motor.

Para realizar la operación de arranque es necesario un consumo elevado de corriente. Los Reglamentos tienen límites de la relación entre la corriente de arranque y la corriente de plena carga. Para disminuir dichas corrientes se emplean distintos métodos de arranque dependiendo de si su rotor tiene forma de jaula de ardilla o bobinado.

Existen 6 principales métodos de arranque que son: directo, estrella triángulo, por autotransformador, estatórico por resistencias, motores de rotor bobinado y electrónico. Los 3 últimos se utilizan para aquellos motores cuyo rotor es bobinado, pero como en este proyecto se ha usado el rotor de jaula de ardilla vamos a explicar con mayor detalle los 3 primeros que corresponden a este tipo de rotor.

2.5.1 Arranque directo

Lo forma más simple de realizar este arranque es conectando directamente a la red el motor. Las principales ventajas de este tipo de arranque son su sencillez, bajo coste, elevado par de arranque y posee un arranque muy rápido. Este tipo de arranque tiene un par de condiciones para poder ser utilizado: la potencia del motor debe ser pequeña y el par de arranque tiene que ser lo suficientemente elevado.

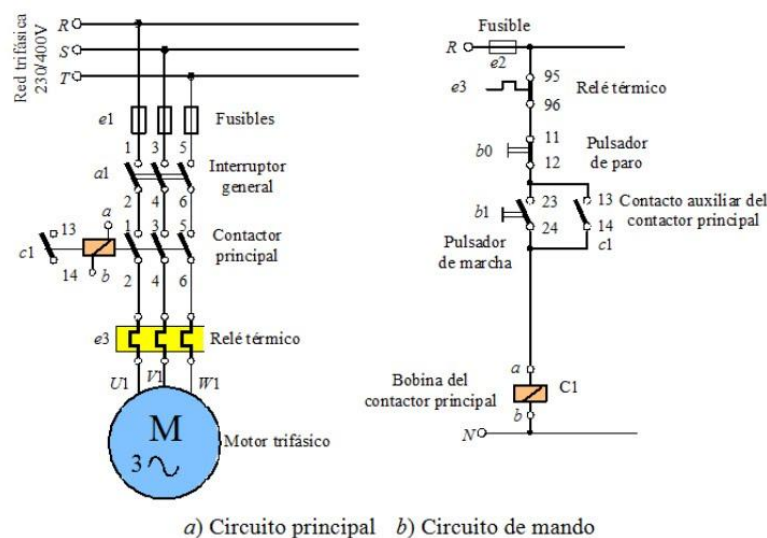


Figura 2.5 Esquema eléctrico de un arranque directo.

2.5.2 Arranque estrella triángulo

Este tipo de arranque solo se puede utilizar en aquellos motores en los que las dos extremidades de cada uno de los tres devanados del estator se encuentran conectadas en la placa de bornes. El bobinado se debe de realizar de una forma en la que el acoplamiento en triángulo corresponda con la tensión de la red.

El principio consiste en arrancar el motor uniendo a la tensión de la red los devanados en estrella. En el momento en el que se igualan el par resistente y el par motor, es cuando se acoplan en triángulo los devanados y el motor rinde según sus cualidades.

Este tipo de arranque es el idóneo para aquellas máquinas que realizan el arranque en vacío o que posean un par resistente débil.

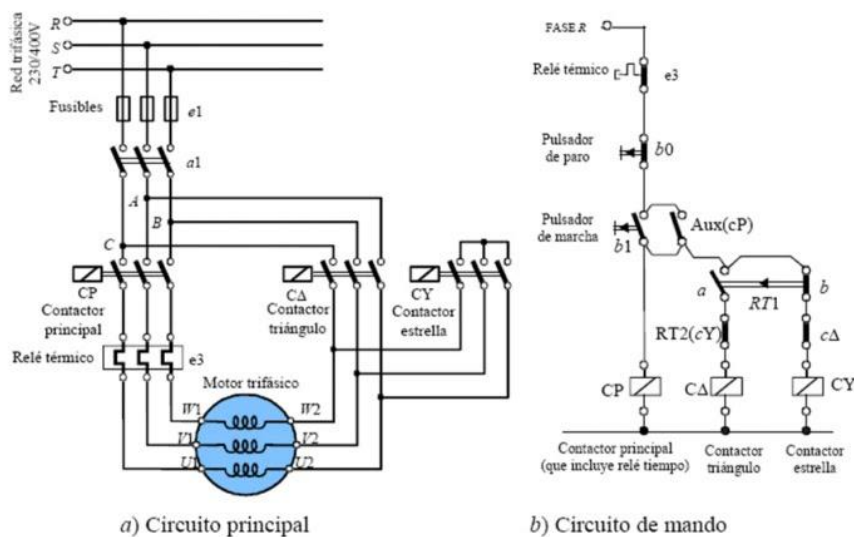


Figura 2.6 Esquema eléctrico de un arranque estrella-triángulo.

2.5.3 Arranque por transformador

El motor es alimentado por una pequeña tensión a través de un autotransformador, que al finalizar el arranque se queda fuera del circuito. Este tipo de arranque se utiliza para aquellos motores con una potencia superior a los 100 kW. La principal desventaja es su elevado coste económico debido al precio del autotransformador.

El funcionamiento se realiza en tres pasos. En primer lugar el autotransformador se acopla en estrella y después el motor se acopla a la red. En segundo lugar, antes de acoplarse a plena tensión, la estrella se abre y en este momento la parte del bobinado que está conectada a la red genera una inductancia en serie con el motor. El último lugar las inductancias generadas anteriormente se cortocircuitan y es cuando el autotransformador se queda fuera del circuito.

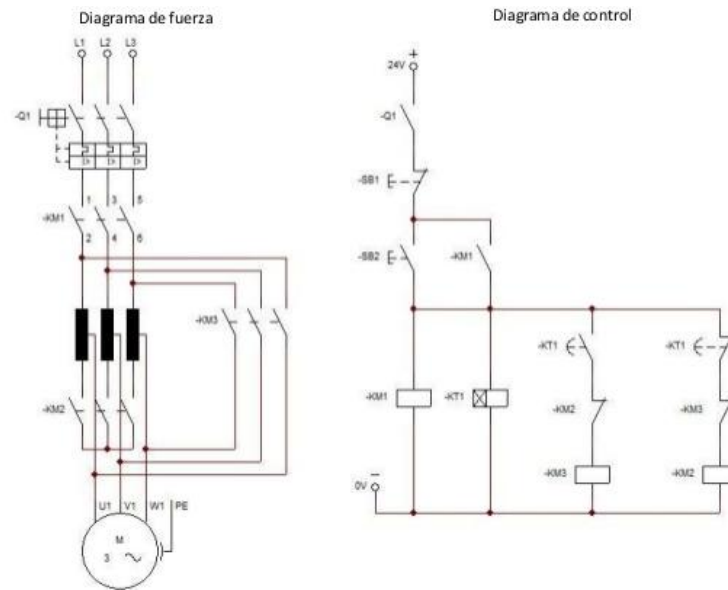


Figura 2.7 Esquema eléctrico de un arranque por transformador.

2.6 Régimen Transitorio

El motor eléctrico posee dos comportamientos diferentes. El primero sucede en el arranque (durante el régimen transitorio) y el otro en el estado estable (durante el régimen permanente). Como es lógico, las características de ambos estados no son iguales. En el régimen transitorio, no se puede pasar de una forma de energía a otra de manera instantánea y la energía total del sistema formado por la máquina y el motor, no puede variar de forma brusca. Debido a esto, un “Transitorio Eléctrico” se define como un convertidor electromecánico cuando la energía cambia temporal y rápidamente y solo se almacena en sus campos eléctricos y magnéticos, conservando la energía cinética constante. En cambio, si la variación de energía posee una alteración permanente o temporal de la energía cinética se define el fenómeno como un “Transitorio Dinámico”.

2.7 Fallos en los motores de inducción

Aunque nos centramos en el estudio del fallo de la rotura de barras de los rotores, para completar la información vamos a explicar los diferentes fallos que pueden darse en los motores de inducción. A pesar de que estos motores sean robustos y tengan buena fiabilidad, no están exentos de sufrir algunas averías durante su uso y como consecuencia de la aplicación de esfuerzos fuertes en los núcleos magnéticos, rodamientos, eje, devanados del estator y jaula, o utilizados en unos tiempos excesivos.

Los fallos se pueden clasificar según el grado de influencia en la capacidad de trabajo como se describe en Rosa (2015):

- **Fallo parcial o incompleto:** Provoca la incapacidad de algún elemento del sistema aunque le otorga seguir en funcionamiento. Se disminuyen las características del sistema.
- **Fallo catastrófico o total:** Provoca la incapacidad absoluta del sistema para ejecutar su función.

Para detectar alguno de estos fallos existen dos posibilidades, dependiendo de si modifica o no el funcionamiento normal de la planta (ver, por ejemplo, Duque y Pérez (2005)):

- **Diagnóstico fuera de línea:** Se basa en extraer el motor de su habitual zona de trabajo con el objetivo de ejecutar los estudios necesarios.
- **Diagnóstico en línea:** Se basa en realizar el análisis del motor sin extraerlo de la línea de producción, ejecutándose en las condiciones normales.

En este proyecto se estudia el fallo en los motores debido a la rotura de barra, pero además de éste existen más fallos que los vamos a explicar a continuación. La clasificación de los fallos dependerá de la parte afectada del motor.

2.7.1 Fallos en el rotor

Los problemas que existen en el rotor suelen mantener relación con las elevadas temperaturas que se alcanzan en el rotor y las elevadas cargas que se generan en el final de las barras, donde se conectan con el anillo del cortocircuito. La mayoría de los fallos tienen que ver con una acumulación de diversos factores por lo que vamos a clasificarlos según su naturaleza:

2.7.1.1 Factores dinámicos

- ❖ **Esfuerzos cíclicos:** Es posible que el eje del motor se vea sometido a esfuerzos cíclicos que provoquen algún fallo debido a la fatiga. Estos esfuerzos cíclicos pueden haber sido causados por defectos de alineación con el eje accionado, correas de transmisión sobretensionadas, un erróneo tamaño de la polea, ejes doblados. Estas cargas cíclicas deben de ser estudiadas para asegurar el correcto funcionamiento de los motores.

- ❖ **Fuerzas centrífugas:** La mayor parte de los fallos por factores dinámicos se debe a que el rotor es sometido a unas velocidades superiores a aquellas para las que fue diseñado. Con el objetivo de evitar estos fallos, los motores tienen mecanismos para no superar la velocidad máxima y conseguir evitar desplazamientos de la jaula o del eje respecto del núcleo del rotor.

2.7.1.2 Factores electromagnéticos

- ❖ **Campos magnéticos desequilibrados:** En los motores “ideales” las fuerzas magnéticas se encuentran equilibradas en direcciones opuestas, estando centrado el rotor en el entrehierro consiguiendo evitar desviaciones en el motor. En cambio en los motores reales, el rotor no está completamente centrado en el entrehierro debido al desgaste de los rodamientos, alineación del motor entre ambos o a su propio peso. Si durante un determinado tiempo estas resultantes continúan actuando es posible que se pueda doblar el eje y que el estator choque con el rotor. La solución que se suele dar en este problema es la de mejorar la geometría del entrehierro al realizar el taladro del estator en y/o en la curvatura o centrado del rotor.
- ❖ **Efecto electromagnético:** Las fuerzas electromagnéticas son unidireccionales y proporcionales al cuadrado de la corriente, llegando a producir una vibración y tendiendo a desplazar radialmente las barras. Dicha vibración sobre las barras es la que genera deflexión en ellas sobre en los arranques, que es cuando se ejerce una fatiga mayor.

2.7.1.3 Factores térmicos

- ❖ **Desequilibrio térmico:** Puede ser causado por el funcionamiento, por el arranque, por el diseño o por la fabricación del motor. Este tipo de fallos origina rotura de anillos o barras en el rotor. Las causas más comunes son:
 - Puntos calientes en la superficie del rotor por suciedad.
 - Diferencia de la transferencia del calor entre el núcleo y las barras del rotor.
 - Arqueo del rotor por diferencias de distribución de presión.
 - Diferencias de ventilación en distintas zonas del rotor.
 - Frecuentes paradas que originan diferencia de temperaturas en las barras del rotor.

- ❖ **Puntos calientes y pérdidas:** Existen determinadas variables durante el proceso de diseño y fabricación que pueden generar una serie de pérdidas y formación de puntos calientes como:
 - Las barras del rotor no están igualmente sujetas.
 - No posee un diseño adecuado de la laminación.
 - Uniones no eficientes entre los anillos y las barras.
 - Acortamiento irregular de las barras del rotor.
 - Ausencia de simetría en la apilación de las láminas.
 - Chispas en la laminación en superficies del rotor o ranuras.

- ❖ **Sobrecargas térmicas:** Las sobrecargas térmicas se pueden producir durante la aceleración, los arranques, cuando se reduce la velocidad o en funcionamiento estable. Pueden crear fallos en el conjunto del motor y en el rotor. Las causas más comunes son:
 - Insuficiente ventilación a causa de los filtros.
 - Rotura de barras por fatiga.
 - Un elevado número de paradas consecutivas que originan un aumento de la temperatura en los anillos o barras del cortocircuito.
 - El rotor roza con el estator como consecuencia de un fallo en los cojinetes originando fuertes vibraciones.
 - Desequilibrio en las tensiones de fase originando calentamiento en la superficie del rotor.
 - Fallos de aceleración.

- ❖ **Chispeos en el rotor:** En los arranques se generan fuerzas magnéticas que originan vibraciones en las barras y ocasionalmente desprendimientos de partículas de hierro de las barras que originan las chispas. Éstas pueden originar rotura de barras. Para reducir los chispazos que se generan, existen medidas en los procesos de fabricación y diseño del rotor. Realizando una correcta elección de las tolerancias y el material de fabricación, se podrá observar distintos niveles de intensidad de chispas.

2.7.1.4 Factores mecánicos

Los más comunes son los siguientes:

- Fallo de los rodamientos y defecto de alineación.
- Materiales incorrectos.

- Defectuosa geometría estator-rotor.
- Resonancia de los dientes.
- Porosidad de la jaula y laminación suelta.
- Montaje incorrecto del centro y el eje.
- Piezas rotas o fatigadas.
- Pérdida del entrehierro y eje torcido del rotor.

2.7.1.5 Factores ambientales

Consisten en la posibilidad de que algunos elementos externos logren entrar en el interior del motor impidiendo el correcto funcionamiento del sistema de ventilación del motor originando sobrecalentamientos. También se puede dar que la propia humedad o sustancias químicas atasquen y acaben dañando el rotor.

2.7.1.6 Factores residuales

Estos esfuerzos pueden ser representados en un plano (axial o radial) y en la mayoría de ocasiones no son dañinos para el rotor mientras no originen ningún cambio importante en la geometría del rotor. Los más comunes son operaciones como el fresado, soldadura con aleación, fundición y apilado.

2.7.2 Fallos en el estator

La mayoría de los fallos generados en el estator se producen en el sistema aislante y suelen ser originados por la combinación de varios factores. Dependiendo de la naturaleza de los fallos se pueden dividir en:

2.7.2.1 Factores mecánicos

- **Golpes en el rotor:** Los golpes que genera el rotor sobre el estator puede deberse a diversas causas, las más comunes son las siguientes:
 - Campo magnético desequilibrado.
 - Eje doblado.
 - Desfase entre el estator y el rotor.
 - Fallo en los cojinetes.
- **Movimiento de las bobinas:** Se generan elevadas fuerzas electromagnéticas en las bobinas a causa de las elevadas intensidades que se generan en las máquinas eléctricas de media y alta tensión, en las conmutaciones o arranques.

Los aislamientos pueden llegar a sufrir rupturas severas o microfisuras debido a dichos esfuerzos. Estos fallos pueden originar graves daños en los conductores de cobre y en el aislamiento de las bobinas.

- **Introducción de objetos extraños:** De la misma forma que ocurría en el rotor puede pasar en el estator y es que la introducción de elementos extraños tanto del interior (arandelas, tornillos...) como del exterior puede darse en cualquier momento, sobre todo a través del sistema de ventilación quedándose en el entrehierro. Este tipo de fallo genera daños en las chapas del núcleo magnético, en las bobinas, en las barras, en los anillos del cortocircuito o en el aislamiento.
- **Fatiga generada por vibraciones:** Las vibraciones no dejan de ser una circunstancia común que se da en todas las máquinas eléctricas. Dichas vibraciones pueden llegar a separar y romper las láminas de mica que forman el sistema aislante y pueden causar el rozamiento de las bobinas con otras partes del motor. Además de las vibraciones generadas por la propia máquina, el motor puede llegar a verse afectado por las vibraciones que originan las máquinas que se encuentran cerca suyo y una mala sujeción de las bobinas pueden verse deterioradas.

2.7.2.2 Factores térmicos

Los motores de inducción tienen una capa aislante preparada para funcionar hasta una temperatura máxima. Si se supera dicha temperatura límite la capa aislante comienza a comportarse de una manera distinta a lo esperado. En la siguiente Tabla se puede observar las distintas temperaturas límites según la clase térmica de aislamiento:

Temperatura (°C)	Clase térmica (IEC)
90	Y
105	A
120	E
130	B
155	F
180	H
200	200
220	220
250	250

Tabla 2.1 Clasificación de las distintas clases térmicas.

En este tipo de factores pueden darse dos posibles fallos:

- **Envejecimiento del aislamiento:** Si la temperatura de funcionamiento es normal, el efecto del envejecimiento térmico es proporcional a la vulnerabilidad del sistema de aislamiento debido a la influencia de otros esfuerzos o factores que guían al fallo. Si se deteriora el sistema de aislamiento, no será posible resistir a los esfuerzos mecánicos, dieléctricos y ambientales normales. Cabe la posibilidad de aumentar la vida térmica con dos opciones:
 - Aumentar la clase de material aislante usado.
 - Disminuir la temperatura de funcionamiento.

- **Sobrecargas térmicas:** Estas sobrecargas térmicas disminuyen considerablemente la vida del aislante y pueden tener como causa:
 - **Tensión de fase desequilibrada:** Puede existir un aumento excesivo de la temperatura en la bobina debido a un minúsculo desequilibrio en la tensión. Para evitar lo anterior se intenta hacer un suministro de tensión trifásico equilibrado.
 - **Sobrecarga:** Los fabricantes de motores habitualmente utilizan unos ciertos márgenes de seguridad. Debido a esto, se utiliza un sistema de aislamiento de clase F con una temperatura de operación de clase B.
 - **Variaciones de tensión:** En los últimos años se están diseñando los motores con un aumento en su potencia pero manteniendo su misma estructura. A causa de esto los motores tienden a tener un mayor número de fallos por variaciones de tensión. Debido a esto puede verse afectado la temperatura del bobinado y el rendimiento del motor.
 - **Cíclica:** Un defecto que es causado por estos esfuerzos es el de originar contracciones y dilataciones del sistema de aislamiento. Cuando se excede un determinado periodo de tiempo, los materiales aislantes se agrietan y se vuelven frágiles. El diseño de los aislantes debe ser tal que asegure que los materiales sean lo suficientemente flexibles para aguantar las dilataciones y contracciones sin agrietarse pero que no sean demasiado flexibles para no causar fallos en los esfuerzos mecánicos.

- **Ventilación obstruida:** El calor que se genera en el estator y en el rotor se disipa por convección, conducción y radiación. Si hay algún elemento que obstruya la radiación de calor de las partes del motor o que dificulte o impida el flujo de aire por el motor, generará un aumento en la temperatura del bobinado. Para lograr que el flujo de aire circule sin problemas, el motor tiene que mantenerse limpio tanto en el interior como en el exterior.

2.7.2.3 Factores eléctricos

Para explicar los fallos originados por los esfuerzos eléctricos en el bobinado, es importante conocer los materiales aislantes utilizados y sus propiedades. A continuación se exponen los principales fallos de carácter eléctrico:

- **Efecto "tracking":** Este fenómeno consiste en la formación de caminos conductores carbonizados sobre la superficie de un aislante eléctrico. Puede pasar en bobinado si no es protegido del entorno ambiental correctamente por el sistema de aislamiento. Este efecto se escucha como si fuera un zumbido intermitente con pausas, aumentos y caídas de intensidad. La intensidad se puede incrementar hasta el punto de *flashover* (combustión súbita). Después del *flashover* el zumbido es convertido en silencio.
- **Efecto corona:** En la corona se sitúan algunas descargas como resultado de la ionización gaseosa transitoria en el sistema de aislamiento, en el cual el factor de la tensión es superior al valor crítico. Se puede visualizar como una capa de color azul que rodea los conductores. Algunos de los factores que pueden influir en las descargas de la corona son los materiales, el esfuerzo de la tensión, la frecuencia, la humedad, la temperatura, el vacío... Debido a este efecto se pueden originar formaciones de arcos eléctricos y roturas de aislantes.
- **Dieléctrico:** Hay una relación entre el esfuerzo de tensión que se aplica a los material aislantes y la vida del aislante. Es muy importante saber la función para la que será utilizada el motor, seleccionar los materiales adecuados y realizar el diseño de las bobinas para que tengan una vida adecuada para el diseño.
- **Transitorios:** Últimamente se ha podido observar que numerosos motores que estaban expuestos a condiciones de transitorios de tensión han sufrido una disminución de la vida del bobinado o sufrido problemas muy pronto. Algunas de las causas de estos transitorios son las siguientes:

- Reencendidos repetidos.
- Cortocircuitos.
- Descargas eléctricas.
- Desconexión de condensadores.
- Interrupción de la corriente.
- Cierre y apertura del interruptor del circuito.

2.7.2.4 Factores de carácter ambiental

Uno de los factores a tener más en cuenta es el de mantener limpio tanto el interior como el exterior del motor, lo que quiere decir, protegerlo de las posibles condiciones ambientales que puedan afectar al correcto funcionamiento del motor. Existen tres tipos de condiciones muy importantes en estos casos:

- ❖ ***Funcionamiento en altitud elevada:*** Los motores que trabajan por encima de una determinada altitud (1000 metros aproximadamente) pueden padecer una reducción de capacidad debido a problemas de refrigeración causados por el enrarecimiento del aire. Debido a esto es necesario disminuir la potencia nominal de la máquina para evitar que se originen averías. Los fabricantes de estos motores suelen aportar gráficos indicando el porcentaje de potencia necesaria para disminuir en función de la temperatura y la altitud.
- ❖ ***Condensación:*** Uno de los problemas más comunes es la producción de condensación en el interior de los aislamientos causada por la acumulación de humedad. Este problema origina pérdida de las propiedades de los aislantes y derivaciones a masa. Para solucionar este fallo es necesario que el motor lleve mucho tiempo sin funcionar para así poder secar su interior. En el caso de los motores de mayor importancia, se puede mantener la temperatura dentro del motor superior a la temperatura ambiente mientras no esté el motor en funcionamiento mediante estufas.
- ❖ ***Contaminación:*** Los propios vapores propagados por los conductos de ventilación, restos de condensación de aceites junto con las partículas de suciedad, pueden originar a lo largo del tiempo una capa de suciedad que no deja evacuar correctamente el calor, es decir, se disminuye su capacidad con el objetivo de disipar dicho calor que influye en la creación de caminos alternativos de la corriente hacia la masa y a la vida útil de los aislamientos.

2.7.3 Fallos en rodamiento y ejes

A lo largo de los años y validado estadísticamente se ha podido saber que el fallo de los rodamientos es el principal motivo de averías en los motores eléctricos. Debido a la fatiga del material los rodamientos poseen un tiempo de vida finito que los fabricantes especifican y definen basándose en diferentes términos como promedio, duración nominal, etc. Las causas más comunes son las siguientes:

- Paso de corriente eléctrica.
- Tamaño incorrecto (diseño erróneo).
- Montaje deficiente.
- Excesiva carga.
- Lubricación insuficiente, excesiva o inadecuada.
- Contaminación externa.
- Exposición a vibraciones encontrándose el motor parado.

Las principales causas de fallo de los ejes son las originadas por fatiga, sobrecargas, corrosión y fracturas. En el caso de los motores eléctricos el fallo debido a la fatiga puede llegar a alcanzar el 90% del total de fallos del eje, en especial si los ejes no están fabricados, diseñados o utilizados correctamente.

2.7.4 Rotura de una barra del rotor

Este trabajo se centra en un fallo típico de los motores asíncronos de jaula de ardillas, estamos hablando del agrietamiento o rotura de una de las barras de los rotores (Ver Figura 2.8). Este tipo de fallos es muy común, sobre todo en los motores de inducción que arrancan con frecuencia bajo carga.

El arranque genera una alta corriente que circula por las barras a causa de que la velocidad síncrona es muy superior a la velocidad del rotor. Las altas corrientes producen una expansión y un calentamiento de las barras con relación al rotor y a causa de las diferencias en la resistencia eléctrica de las barras individuales.

La expansión que se genera en las barras y el calentamiento anteriormente citado van a ser diferentes, por lo que se generará un agrietamiento en las juntas que son donde se unen las barras y los anillos del cortocircuito.

Una vez aparecida una grieta, aumentará la resistencia de la barra, lo que hará aumentar más el calentamiento, agravando el estado de la grieta. A su vez, las barras del rotor cercanas recibirán corrientes aumentadas a causa de la corriente reducida en la barra con grietas, originando una rotura de barras en cadena.

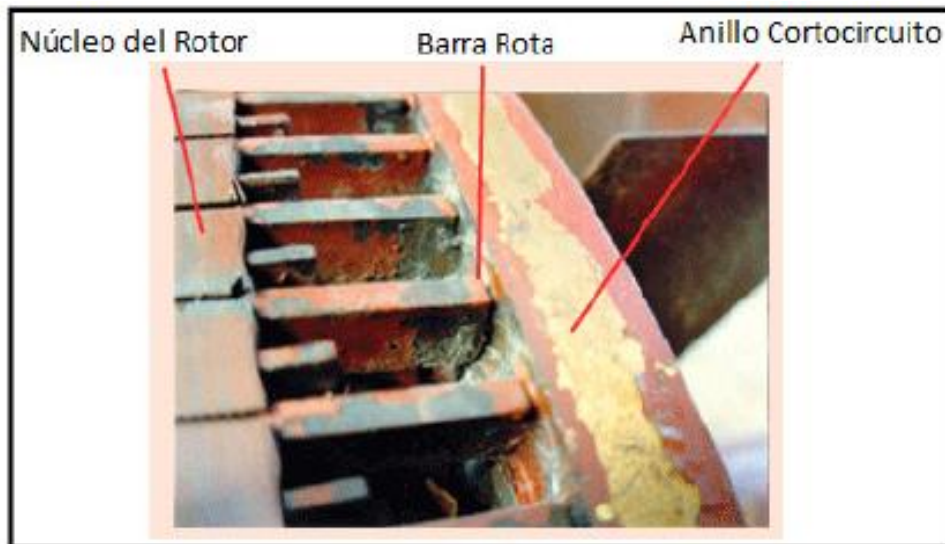


Figura 2.8 Rotura de una barra del rotor.

2.7.4.1 Diagnóstico del estado del motor (MCSA)

Como ya hemos comentado anteriormente, los motores de inducción son las máquinas eléctricas que más se usan en la industria. Debido a esto, utilizar correctamente estas máquinas es vital para conseguir los objetivos en los procesos industriales. Por tanto, cada vez más industrias están trabajando con sistemas de monitorización que identifiquen condiciones extrañas de forma preventiva, con el objetivo de evitar averías en los procesos.

El *Motor Current Signature Analysis* (MCSA) es una técnica de monitorización de máquinas eléctricas que se centra en el análisis espectral de las corrientes del estator. La ventaja de esta técnica es que no es necesario parar las máquinas para evaluar la condición, si no que se aprovechan las características de las señales (tanto en estado estacionario como transitorio) de la corriente. Su principal aplicación es la detección temprana de rotura de barras en los motores.

Generalmente, la corriente del estator de los motores de inducción posee varios armónicos. Esto se debe a varias causas como las irregularidades o imperfecciones generadas en el proceso de fabricación del motor, la posibilidad de que existan componentes armónicas en la fuente de alimentación y a que la disposición de los devanados en las ranuras es escalonada y no completamente sinusoidal (Verucchi y Acosta (2007)).

Cuando existe rotura de barra en el rotor del motor, se suelen observar mejor los armónicos y la “entidad” de estos picos puede ser, pues, usado como diagnóstico temprano de posibles fallos. En principio, consideramos que la tensión de alimentación es equilibrada, sinusoidal y pura. Debido a la asimetría de la jaula como consecuencia de la rotura de barras, se inducen corrientes y voltajes en el devanado del estator a las frecuencias:

$$f_{USH} = (1 + 2s)f_1$$

y

$$f_{LSH} = (1 - 2s)f_1$$

Donde s es el deslizamiento y f_1 es la frecuencia de la tensión de alimentación del motor medida en Hz. La frecuencia f_{USH} corresponde a la banda lateral superior del armónico (*upper-sideband harmonic*, USH), mientras que la frecuencia f_{LSH} corresponde a la banda lateral inferior del armónico (*lower-sideband harmonic*, LSH).

Si se obtienen las evoluciones de tiempo de s y f_s , estas expresiones también se utilizan en regímenes transitorios. El deslizamiento s viene dado por:

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1}$$

Donde n es la velocidad del rotor y n_1 es la velocidad síncrona, dada por:

$$n_1 = \frac{60f_1}{p}$$

Y p es el número de pares de polos del motor. A continuación, ilustramos dos imágenes para ayudar a una mejor comprensión de lo anteriormente explicado.

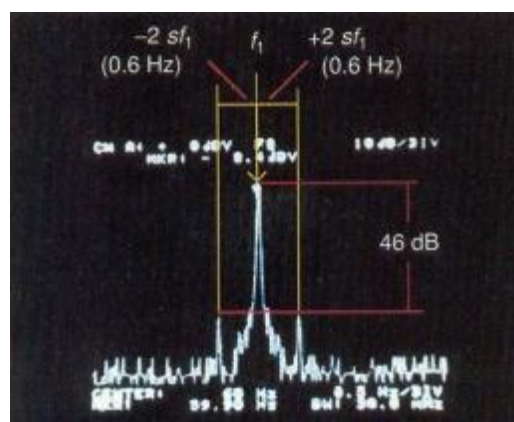


Figura 2.9 Espectro de la corriente de un motor sano.

La Figura 2.9 representa el espectro de la corriente cuando el motor se encuentra en perfectas condiciones. En la Figura 2.10 se representa lo mismo que en la anterior pero en este caso el motor tiene algunas barras del rotor rotas.

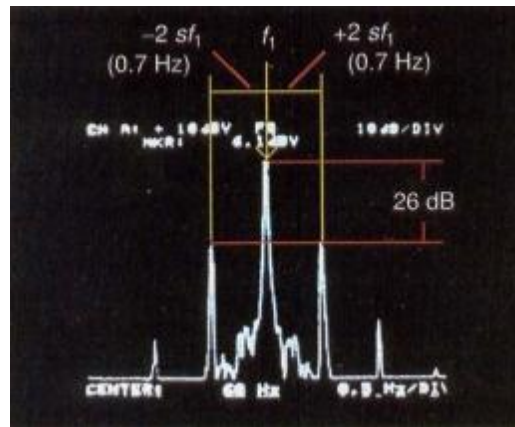


Figura 2.10 Espectro de la corriente de un motor con barras del rotor rotas.

Como se puede observar, disminuye notablemente (de 46 a 26 dB) la diferencia de las bandas con respecto a la altura del pico correspondiente al armónico principal. Esta diferencia es lo que nos ayuda a distinguir entre motores sanos y enfermos.

Ahora bien, en nuestro trabajo, se trabaja con alimentación por inversor. Los inversores generan más armónicos y modifican la amplitud de los que ya existían. Además de todo lo anterior, generan mucho ruido en todo el espectro.

En el caso anterior, teníamos una tensión de alimentación equilibrada, sinusoidal y pura. En el caso del motor con jaula asimétrica que se alimenta con una tensión de alimentación no sinusoidal, el proceso es parecido al explicado anteriormente. En este caso aparecen un par de bandas cercanas al armónico con unas frecuencias:

$$f = (k \pm 2ns)f_1$$

donde n un número entero cualquiera y k es el orden del armónico. Por una parte, aparecerán armónicos a múltiplos enteros de la frecuencia principal. A medida que dichos armónicos se alejan del armónico principal, se verá disminuida su altura. Por otra parte, aparecerán pares de bandas laterales en torno a los armónicos, que de la misma forma que antes, disminuirá su altura a medida que se aleje del armónico hasta que en un determinado momento sean imperceptibles.

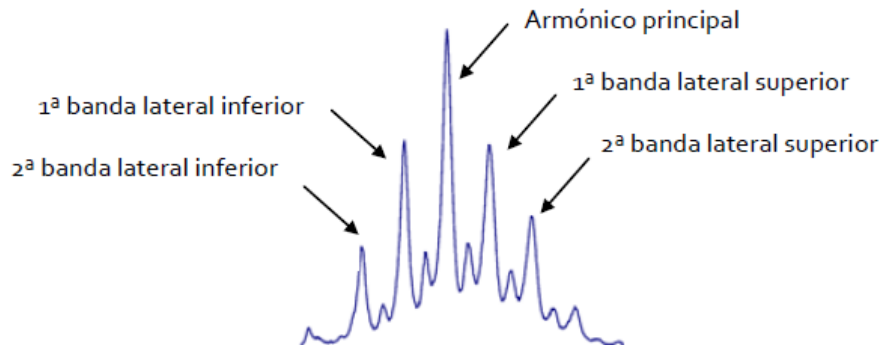


Figura 2.11 Armónico principal y sus bandas laterales.

En este trabajo solo se trabaja con el armónico principal y con sus bandas laterales más cercanas que las hemos denominado LSH y USH.

2.7.4.2 Dominio de la frecuencia: Transformadas FT, PSD y FFT

Como hemos comentado en la sección anterior, el MCSA consiste en el análisis espectral de la corriente del estator. Para la obtención de dicho análisis, se necesita registrar las señales en el dominio temporal y realizar la transformación adecuada al dominio de la frecuencia. Para lograr esto, se emplea la Transformada de Fourier (FT).

Por otra parte, el *Power Spectral Density* (PSD) es una función que nos proporciona información de la distribución en potencia de la señal en el dominio de la frecuencia. Consiste en una técnica que se utiliza para el análisis espectral de señales aleatorias o señales periódicas contaminadas con ruido.

En este trabajo, para el PSD se ha utilizado la ventana de *Hann*, también denominada *Hanning*. Las “ventanas” son usadas para el procesamiento y análisis de señales con el objetivo de evitar discontinuidades en el principio y al final de los bloques analizados. Para más información acerca de la ventana de *Hann* u otras ventanas pueden consultarse en Martín (2006).

Para calcular la FT se necesita procesar los datos y esto conlleva un número elevado de operaciones matemáticas. Debido a esto, se desarrolló un algoritmo que facilitó el cálculo siendo más eficiente y rápido. Este algoritmo se denominó Transformada Rápida de Fourier (FFT). Como veremos en posteriores capítulos, debido a que en nuestro experimento se trabaja en régimen transitorio es necesario utilizar otra transformada diferente a la FFT que solo trabaja en régimen permanente.

Capítulo 3

Experimentación

3.1 Descripción de la experimentación

La experimentación ha sido realizada por profesores del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Escuela de Ingenierías Industriales de la Universidad de Valladolid en el Laboratorio del Departamento localizado en la Sede Paseo del Cauce. Dicho experimento consiste en la reproducción de una serie de ensayos sobre un motor de inducción de jaula de ardilla al cual se le han ido realizando modificaciones. Esta modificación consiste en la perforación de una de las barras del rotor y se compararán los motores sanos (sin perforación) y los dañados (con perforación):

- **R1**: Motor sano.
- **R5**: Fallo total de la barra.

La notación de R1 a R5 surge de que en otros experimentos, el deterioro de la barra se hacía de forma progresiva pasando desde un estado R1 (totalmente sano) hasta un estado R5 (rotura total) pasando por estados intermedios R2, R3 y R4.

A su vez se han realizado los ensayos en dos niveles de carga:

- **NC1**: Nivel de carga bajo.
- **NC2**: Nivel de carga alto.

En este tipo de estudios existen dos posibilidades, trabajar en vacío o aplicar una determinada carga. En este experimento se optó por la segunda opción, aplicando dos niveles de carga distintos para estudiar su posible influencia. El nivel de carga bajo contiene una ligera carga para que no se encuentre en vacío. Por el contrario, el nivel de carga alto tiene una carga relativamente elevada.

Cabe destacar que la alimentación del motor se ha realizado a través de 5 inversores diferentes:

- **AB**: Inversor PowerFlex 40 de Allen Bradley.
- **ABB**: Inversor ACS355 de ABB.
- **SIE**: Inversor Micromaster 420 de Siemens.
- **TM**: Inversor Altivar 66 de Télémécanique.
- **WEG**: Inversor CFW-11 de WEG.

Posteriormente se detallarán las características técnicas que cada inversor posee y el uso dado al inversor en este experimento.

El objetivo de este experimento consiste en comprobar si existen diferencias entre los motores sanos y dañados, además se añaden otros factores como son los niveles de carga y los distintos inversores para estudiar su posible efecto. Así, los datos que se obtienen podrán utilizarse para construir unas pautas con las que se pueda saber el estado físico del motor a través un análisis simple de la respuesta en frecuencia obtenida, mientras la actividad del motor continúa.

En todos los casos se ha programado una frecuencia de consigna de 50 Hz y un transitorio de arranque de 10 segundos, siendo el tiempo total de la señal capturada de 30 segundos. Para los casos estudiados, se han tomado 6 segundos del estado transitorio, teniendo una frecuencia de muestreo final de 256 Hz.

En cada uno de los casos, se ha medido el valor de la banda superior USH y de la banda inferior LSH. El número total de ensayos realizados fue de 600 y en la siguiente Tabla se puede observar el reparto de dichos ensayos.

Inversor	Estado	Nivel de Carga	Banda	Nº Ensayos
AB	R1	NC1	LSH	15
			USH	15
	NC2	LSH	15	
		USH	15	
	R5	NC1	LSH	15
			USH	15
NC2	LSH	15		
	USH	15		
ABB	R1	NC1	LSH	15
			USH	15
	NC2	LSH	15	
		USH	15	
	R5	NC1	LSH	15
			USH	15
NC2	LSH	15		
	USH	15		
SIE	R1	NC1	LSH	15
			USH	15
	NC2	LSH	15	
		USH	15	
	R5	NC1	LSH	15
			USH	15
NC2	LSH	15		
	USH	15		
TM	R1	NC1	LSH	15
			USH	15
	NC2	LSH	15	
		USH	15	
	R5	NC1	LSH	15
			USH	15
NC2	LSH	15		
	USH	15		
WEG	R1	NC1	LSH	15
			USH	15
	NC2	LSH	15	
		USH	15	
	R5	NC1	LSH	15
			USH	15
NC2	LSH	15		
	USH	15		
Total				600

Tabla 3.1 Distribución de todos los ensayos.

3.2 Descripción del banco de ensayos

A continuación vamos a describir todos los elementos de los que consta el equipo que los profesores del Departamento de Ingeniería Eléctrica han empleado para realizar los ensayos anteriormente citados.

Los elementos empleados son:

1. PC (con el debido *software*).
2. Tarjeta de adquisición de datos.
3. Placas de sensores de tensión hechas a medida.
4. Placas de sensores de corriente hechas a medida.
5. Interruptor.
6. Freno electromagnético.
7. Unidad de control del Freno.
8. Motor de inducción.

En la Figura 3.1 se puede observar la numeración correspondiente a la anterior lista de elementos empleados.



Figura 3.1 Vista general del banco de ensayos.

3.2.1 PC

El principal objetivo que tiene el PC es el de recibir los datos tomados a través de una conexión por USB con la tarjeta de adquisición de datos. El ordenador posee las siguientes características:

Características técnicas del PC	
Marca	HP
Modelo	Compaq 6715s
Procesador	AMD Turion 64 X2 TL-56
RAM	2048 MB
Disco Duro	120 GB SATA
Software	Windows 7 Pro 64 bits

Tabla 3.2 Características técnicas del PC.



Figura 3.2 Vista del PC en el banco de ensayos.

3.2.2 Tarjeta de adquisición de datos

Se utiliza para la transferencia de datos generados por cada uno de los ensayos realizados. Como hemos comentado antes, se conecta el ordenador con la tarjeta de adquisición de datos a través de un cable USB. La tarjeta de adquisición de datos está compuesto por un sistema modular que consiste en:

- **Módulo de adquisición:** NI 9215.
- **Chasis compacto:** NI cDAQ-9174.

En las siguientes dos Tablas exponemos sus características:

Características técnicas del módulo de adquisición NI 9215	
Número de serie	199269A-1L
Denominación	779011-01
Tipo de Aislamiento	Tierra
Tipo de Medida	Voltaje
Rango de Voltaje	± 10 V
Precisión máxima	3%
Resolución	16 Bits
Canales diferenciales	4

Tabla 3.3 Características técnicas del módulo de adquisición.

Características técnicas del chasis NI cDAQ-9174	
Número de serie	14E8524
Denominación	781157-01
Potencia máxima consumida	15 W
Alimentación	9-30 V
Nº de contadores/temporizadores	4
Resolución	32 Bits
Número de ranuras	4
Interfaz de Bus	USB 2.0

Tabla 3.4 Características técnicas del chasis.



Figura 3.3 Tarjeta de adquisición de datos.

3.2.3 Sensores

Un sensor, también denominado captador, consiste en un dispositivo que está diseñado con el objetivo de recibir cierta información de una magnitud externa y convertirla en otra magnitud, generalmente eléctrica, que podamos manipular y cuantificar. Generalmente, dichos sensores suelen estar realizados a través de la utilización de componentes pasivos (NTC, LDR, resistencias variables...), y el uso de componentes activos.

En este experimento, la medida de las magnitudes deseadas se realizó a través de varios tipos de sensores. Todos estos sensores están empaquetados en PCB y montadas sobre placas que han sido diseñadas y construidas en el laboratorio. (Ver Figura 3.4)

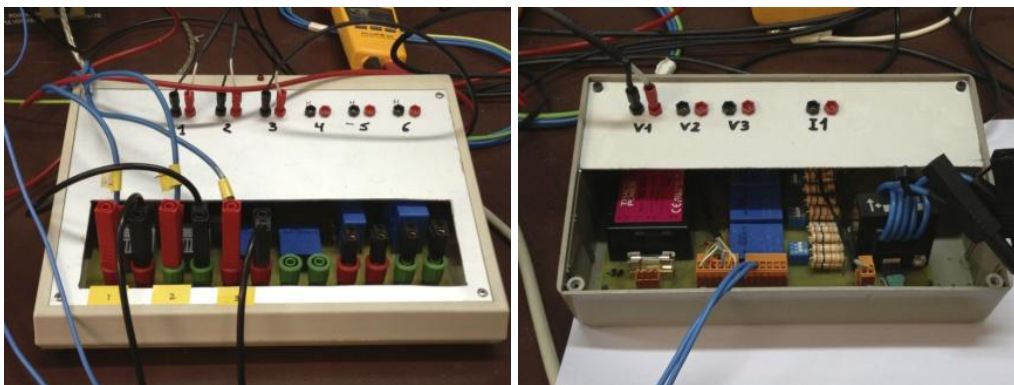


Figura 3.4 Tarjetas con los sensores de corriente y tensión respectivamente.

Realizando este experimento se han usado dos tipos de sensores, de tensión y de intensidad.

3.2.3.1 Sensores de tensión

Para obtener la medida de tensión se emplearon tres sensores LEM LV 25-P (Figura 3.5). Este sensor de tensión basado en el efecto Hall está diseñado para un montaje en PCB. Proporciona aislamiento galvánico entre los circuitos primarios y secundarios. Para obtener la medida de tensión se necesita coger una corriente proporcional a la tensión de medida mediante una resistencia externa en serie con el circuito primario de la unidad.

En la Tabla 3.5 se puede observar las características técnicas de este tipo de sensores de tensión.



Figura 3.5 Sensor de tensión LEM LV 25-P.

Características técnicas del sensor de tensión LEM LV 25-P	
Rango de alimentación	±15 V
Precisión	0,9%
Temperatura de trabajo mínima	0°C
Temperatura de trabajo máxima	70°C
Corriente de entrada	10 mA
Corriente de salida	25 mA
Profundidad	29,2 mm
Linealidad	0,2%

Tabla 3.5 Características del sensor de tensión LEM LV 25-P.

3.2.3.2 Sensores de intensidad

Para obtener la medida de intensidad se emplearon dos sensores LEM LA 25-NP y dos sensores *Honeywell* CSNE151. Su objetivo es el de transformar la corriente alterna en tensión alterna proporcional a la intensidad.

El sensor LEM LA 25-NP (Figura 3.6) es utilizado para la medición electrónica de corrientes (pulsada, DC, mixta) contando con separación galvánica entre el circuito primario y secundario. Su principal uso es en controladores de velocidad variable AC controladores de servomotor.

En la Tabla 3.6 se puede observar las características técnicas de este tipo de sensores de corriente.

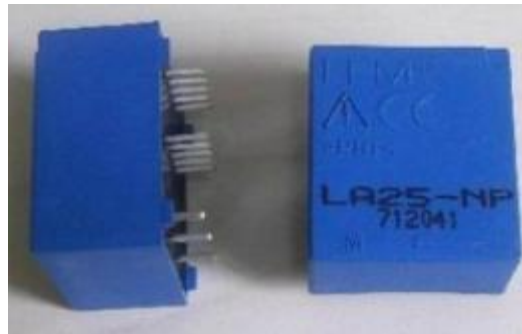


Figura 3.6 Sensor de corriente LEM LA 25-NP.

Características técnicas del sensor de corriente LEM LA 25-NP	
Rango de medida de intensidad AC	± 36 A
Rango de medida de intensidad DC	± 36 A
Precisión	0,5%
Frecuencia Máxima	150 kHz
Intensidad Consumida	10 mA
Tensión de alimentación (Rango DC)	14,25V - 15,75V
Tiempo de respuesta	1 μ s
Linealidad	0,2%

Tabla 3.6 Características del sensor de corriente LEM LA 25-NP.

El otro tipo de sensor de corriente utilizado es el sensor *Honeywell* CSNE151 (Figura 3.7). En la Tabla 3.7 se puede observar sus características técnicas.



Figura 3.7 Sensor de corriente Honeywell CSNE151.

Características técnicas del sensor de corriente Honeywell CSNE151	
Tipo de corriente detectada	CA o CC
Rango de corriente detectado	± 90 A
Corriente continua	± 50 A
Corriente de operación	50 A RMS a 25°C
Corriente de alimentación	(-12mA - 12 mA) + salida
Voltaje de alimentación	± 15 VCC
Corriente de deriva	$\pm 0,3$ mA
Desfase de corriente de deriva	$< \pm 0,6$ mA
Resistencia de la bobina	190 Ohm
Tiempo de respuesta	< 1 μ s
Vueltas de la bobina	2000
Salida nominal	25 mA
Precisión	$\pm 0,5$ %

Tabla 3.7 Características del sensor de corriente Honeywell CSNE151.

3.2.4 Freno electromagnético

Este freno (Figura 3.8) es de polvo magnético y tiene como objetivo el de simular un par constante resistente y cargar el motor. La marca del freno es *Lucas-Nülle*, al igual que la unidad de control que lo acompaña.



Figura 3.8 Freno de polvo magnético Lucas-Nülle

En la siguiente Tabla podemos observar sus principales características:

Características técnicas del freno electromagnético Lucas-Nülle	
Modelo	SE2662-5R
Par resistente	0 - 25 Nm
Potencia nominal	1 kW
Frecuencia de alimentación	50 Hz
Tensión de alimentación	230 V
Velocidad de giro	0 - 6000 rpm

Tabla 3.8 Características del freno electromagnético Lucas-Nülle.

3.2.5 Unidad de control del freno

Como habíamos comentado antes, hay una unidad de control (Figura 3.9) que acompaña al freno para poder seleccionar la cantidad de par resistente que el freno ejerce. Aparte de lo anteriormente comentado, esta unidad de control lleva incorporada unos indicadores de medida en los cuales se puede observar el par resistente que ejerce el freno y la velocidad de giro.



Figura 3.9 Panel de la unidad de control del freno.

Cabe destacar que la salida de tensión de esta unidad es proporcional al par motor y a la velocidad de giro. En la siguiente Tabla se pueden observar las características técnicas de la unidad de control del freno:

Características técnicas de la unidad de control del freno	
Modelo	SO3213-7S
Frecuencia de alimentación	50 Hz
Tensión de alimentación	230 V

Tabla 3.9 Características de la unidad de control del freno.

3.2.6 Motor

El motor (Figura 3.10) utilizado para este experimento es de la marca *Siemens*. Es un motor de inducción con una estructura de jaula de ardillas.



Figura 3.10 Motor de inducción Siemens empleado en los ensayos.

A continuación se podrá observar sus características técnicas tanto en la Tabla 3.10 como en la Figura 3.11 que muestra la placa de características del motor.

Características técnicas del motor de inducción Siemens	
Modelo	3~ Mot 1LA7083-4AA10
Nº de serie	UD 0305/2134342- 10
Índice de protección	IP55
Tamaño	80M IM B3
Eficiencia	IEC
Conexión del estator	Estrella
Tensión nominal	400 V
Corriente nominal	1,86 A
Velocidad a plena carga	1395 rpm
Deslizamiento a plena carga	0,07
Potencia nominal	0,75 kW
Par nominal	5,13 Nm
Factor de potencia	0,81
Frecuencia nominal	50 Hz
Nº de barras del rotor	28
Nº de pares de polos	2
Factor servicio	1,1
Clase Térmica	ThcL F

Tabla 3.10 Características del motor de inducción Siemens.



Figura 3.11 Placa de las características del motor de inducción.

3.2.7 Inversores

Un inversor es un dispositivo que permite controlar la velocidad rotacional de un motor de inducción de corriente alterna, el cual es alimentado por una frecuencia y voltaje constante, y entrega al motor una frecuencia y voltaje variable, debido a esto también son denominados variadores de frecuencia.

En nuestro experimento se han usado cinco tipos diferentes de inversores como fuentes de alimentación del motor. Estos cinco inversores son Inversor PowerFlex 40 de Allen Bradley (AB), Inversor ACS355 de ABB (ABB), Inversor Micromaster 420 de Siemens (SIE), Inversor Altivar 66 de Télémécanique (TM) e Inversor CFW 11 de WEG (WEG). A continuación podremos observar sus características técnicas y sus imágenes:

Características técnicas del inversor AB	
Marca	Allen Bradley
Modelo	PowerFlex 40
Potencia nominal	2,2 kW
PWM por defecto	4 kHz
Rango PWM	2 - 16 kHz
Intensidad nominal	7,5 A
Tensión	380 - 400 V
Tiempo de aceleración	0 - 600 s

Tabla 3.11 Características del Inversor PowerFlex 40 de Allen Bradley.



Figura 3.12 Inversor PowerFlex 40 de Allen Bradley.

Características técnicas del inversor ABB	
Marca	Asea Brown Boveri
Modelo	ACS355-03E-15A6-4
Potencia nominal	7,5 kW
PWM por defecto	4 kHz
Rango PWM	4 - 16 kHz
Intensidad nominal	15,6 A
Tensión	380 - 400 V
Tiempo de aceleración	0 - 1800 s

Tabla 3.12 Características del Inversor ACS355 de ABB.



Figura 3.13 Inversor ACS355 de ABB.

Características técnicas del inversor SIE	
Marca	Siemens
Modelo	Micromaster 420
Potencia nominal	4 kW
PWM por defecto	4 kHz
Rango PWM	2 - 16 kHz
Intensidad nominal	10,2 A
Tensión	380 - 400 V
Tiempo de aceleración	0 - 900 s

Tabla 3.13 Características del Inversor Micromaster 420 de Siemens.



Figura 3.14 Inversor Micromaster 420 de Siemens.

Características técnicas del inversor TM	
Marca	Télmécanique
Modelo	Altivar 66
Potencia nominal	2,2 kW
PWM por defecto	4 kHz
Rango PWM	-
Intensidad nominal	5,8 A
Tensión	400 - 460 V
Tiempo de aceleración	0,1 - 999,9 s

Tabla 3.14 Características del Inversor Altivar 66 de Télmécanique.



Figura 3.15 Inversor Altivar 66 de Télémécanique.

Características técnicas del inversor WEG	
Marca	WEG
Modelo	CFW-11
Potencia nominal	1,5 kW
PWM por defecto	5 kHz
Rango PWM	5 - 10 kHz
Intensidad nominal	3,6 A
Tensión	380 - 480 V
Tiempo de aceleración	0 - 999 s

Tabla 3.15 Características del Inversor CFW 11 de WEG.



Figura 3.16 Inversor CFW 11 de WEG.

3.3 Características medidas

Aparte de las características citadas anteriormente, existen otro tipo que son propias de los motores de inducción y su carga. También existen otro tipo de características que pueden mostrar algunos detalles del estado del motor, como pueden ser las relativas al dominio de la frecuencia del espectro de corriente y a las amplitudes de armónicos.

3.3.1 Relativas a la carga del motor

Con excepción del deslizamiento, todas las demás variables que vamos a citar a continuación sólo se consideran para saber el estado en el que se encuentra el motor durante los ensayos realizados. Algunas de estas variables nos pueden ser de gran utilidad para visualizar otras variables que son importantes a la hora de la detección de fallos. A pesar de que estas variables no entran en los análisis, es conveniente una breve descripción de ellas.

- **Deslizamiento:** Se define como la diferencia de velocidad que existe entre la velocidad síncrona (n_1) y la velocidad del rotor (n) expresada en proporción o tanto por ciento. Como ya hemos visto anteriormente, su expresión es:

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1}$$

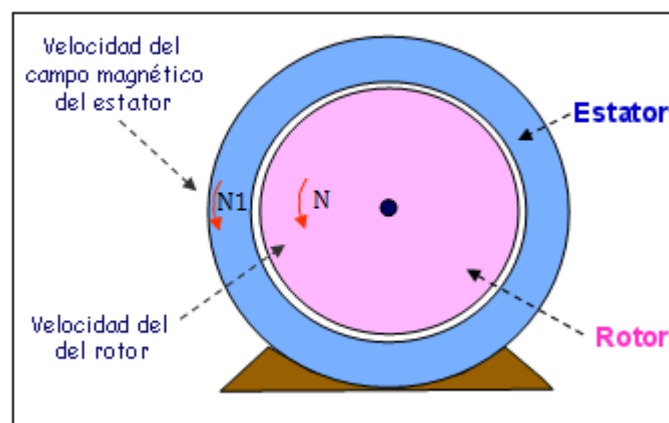


Figura 3.17 Velocidades del estator y del rotor de un motor de inducción.

En la siguiente Tabla se pueden observar los deslizamientos nominales usuales dependiendo del número de polos que tenga el motor, con una frecuencia de 50 Hz.

Nº de Polos	Velocidad del rotor (rpm)	Velocidad síncrona (rpm)	Deslizamiento (%)
2	2950	3000	1,6
4	1450	1500	3,3
8	700	750	6,6
10	550	600	8

Tabla 3.16 Deslizamientos nominales a una frecuencia de 50 Hz.

- **Velocidad:** Consiste en la velocidad de rotación del rotor medidas en revoluciones por minuto (rpm) durante la realización del ensayo. Esta velocidad puede verse modificada a través de la Unidad del Control del Freno que hemos visto anteriormente.

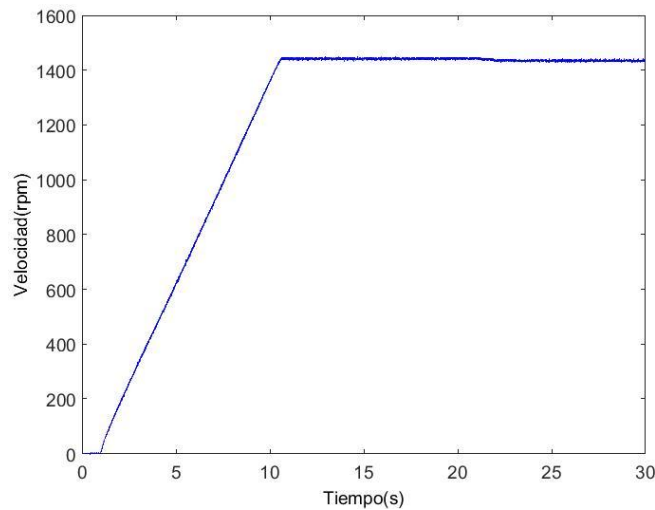


Figura 3.18 Gráfica de la velocidad de rotación registrada en el experimento.

- **Corriente:** Se trata del valor eficaz de la corriente consumida por el motor en el ensayo.
- **Tensión:** Consiste en el valor eficaz de la tensión que consume el motor durante la realización del ensayo. Se determina a través de los sensores de tensión anteriormente descritos.

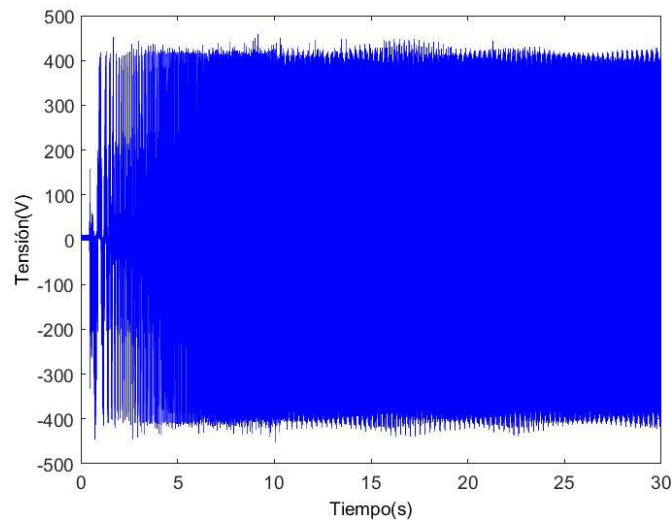


Figura 3.19 Gráfica de la tensión registrada en el experimento.

3.3.2 Relativas al dominio de la frecuencia

El análisis de nuestro trabajo se focaliza en la respuesta en frecuencia del motor. A pesar de esto, el espectro de frecuencia está relacionado con el tiempo. Debido a esto, es necesario procesar adecuadamente la señal para obtener los indicadores requeridos.

El principal método y más utilizado para la obtención del espectro en frecuencias de una señal es la Transformada de Fourier, pero como ya comentamos en anteriores secciones, para tener que realizar los mínimos cálculos posibles, se suele emplear una simplificación de esta transformada que es la Transformada Rápida de Fourier. El problema de esta transformada es que en el estado transitorio no se visualizan los armónicos, solo se puede ver la frecuencia fundamental, por lo que para que sea útil también en el régimen transitorio se realiza con la *Adaptive Slope Transform* (ver Pons-Llinares et al. (2016)) y que se explicará en el siguiente capítulo. Partiendo de ésta, se realizan los cálculos de la función PSD normalizada, con la que se identifica mejor las bandas laterales indicativas de fallo localizadas alrededor de los armónicos. Dicha normalización fija como referencia el nivel que alcanza el armónico fundamental, que se sitúa siempre en cero decibelios.

Como ya comentamos en la Sección 2.7.4.1, a pesar de que en torno a cada armónico aparezcan diversas bandas, este trabajo se va a centrar exclusivamente en la banda superior USH y en la banda inferior LSH más próxima a la frecuencia del armónico principal.

Consideraremos un ejemplo con un motor con una barra rota causada por una perforación en la jaula del rotor y que se alimenta con diferentes inversores. Los inversores están programados para proporcionar una puesta en marcha de 10s con la

frecuencia de salida aumentando linealmente de 0 a 50 Hz. La corriente del estator se capta a 5 kHz como frecuencia de muestreo (Figura 3.20 (a)), incluyendo el arranque y un estado estacionario largo. La trayectoria del primer armónico en el plano de frecuencia-tiempo (f-t) se muestra en la Figura 3.20 (b).

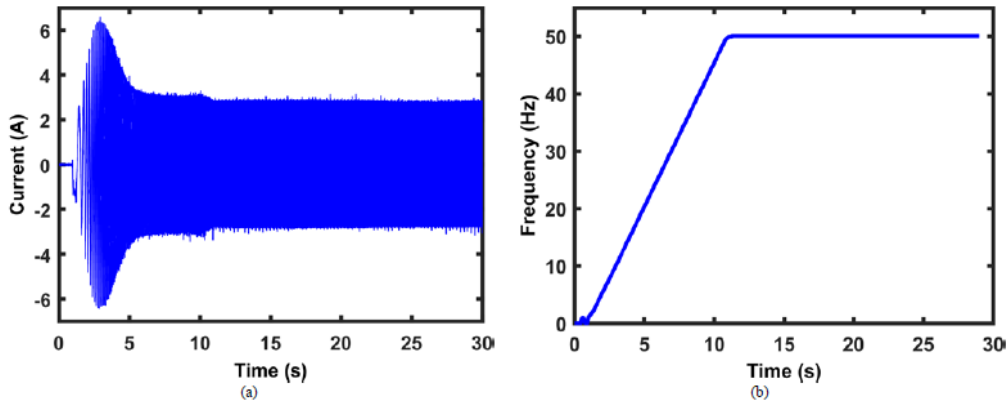


Figura 3.20 (a) Corriente de estator del motor de inducción con una barra de rotor rota; (b) Trayectoria del primer armónico en el plano f-t.

En la Figura 3.21 podemos observar el PSD de la corriente del estator con unos valores para LSH y USH de 45.8 y 54.2 Hz respectivamente. Estos resultados se pueden hallar con unas fórmulas explicadas en la Sección 2.7.4.1.

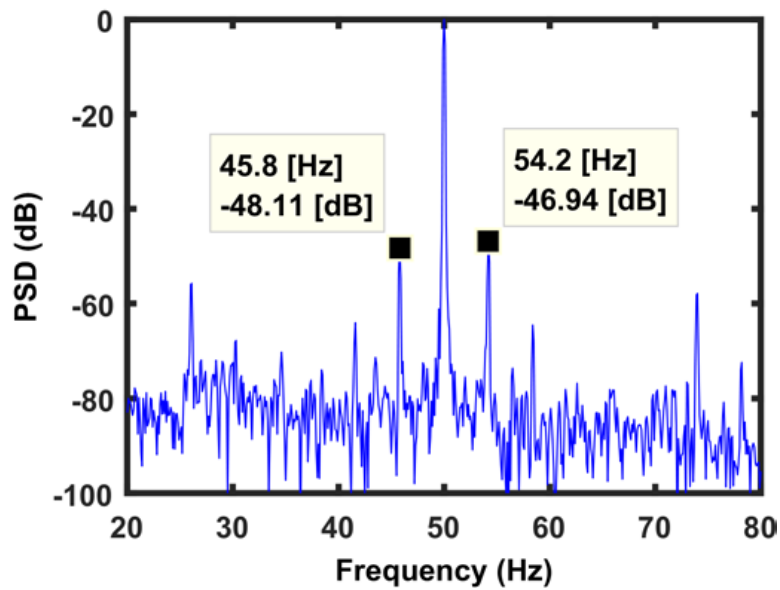


Figura 3.21 PSD de un motor de inducción con la una barra del rotor rota.

Estos armónicos tienen amplitudes altas en sus respectivas densidades espectrales de potencia, lo que hace sospechar que este motor está sufriendo el fallo mencionado anteriormente.

Capítulo 4

Metodología

4.1 Trayectoria de armónicos

4.1.1 Trayectoria de armónicos de fallo en el plano frecuencia-tiempo

En los regímenes transitorios, las técnicas de detección de fallos se basan en la capacidad de rastrear armónicos relacionados con fallos de baja energía en comparación con el componente fundamental (FC, primer armónico de la señal), también denominado componente principal, de alta energía y otros armónicos como los de devanado y principal. En el campo MCSA, estos fallos se identifican por la presencia de componentes específicos en el espectro de la corriente del estator. Estos defectos se manifiestan principalmente por un par de bandas alrededor del FC, cuya frecuencia característica depende de la carga del motor a través del deslizamiento como comentamos en la Sección 2.7.4.1.

En motores de inducción con alimentación directa a la red, la frecuencia FC se fija y se establece desde el primer momento del arranque del motor. Por lo tanto, la velocidad síncrona también es constante. Como la velocidad del rotor, en un arranque estándar, aumenta casi linealmente desde cero hasta casi la velocidad síncrona, el deslizamiento disminuye desde 1 casi linealmente hasta un valor muy bajo. Debido a estas evoluciones, la trayectoria de algunos armónicos de fallo es muy ventajosa para fines de monitorización porque evolucionan lejos del FC, al menos durante el arranque. Por ejemplo, el LSH traza una trayectoria con un patrón “V” característico durante un arranque de motor de inducción con alimentación directa a la red, como se muestra en la Figura 4.1 (suponiendo una evolución lineal del deslizamiento frente al tiempo).

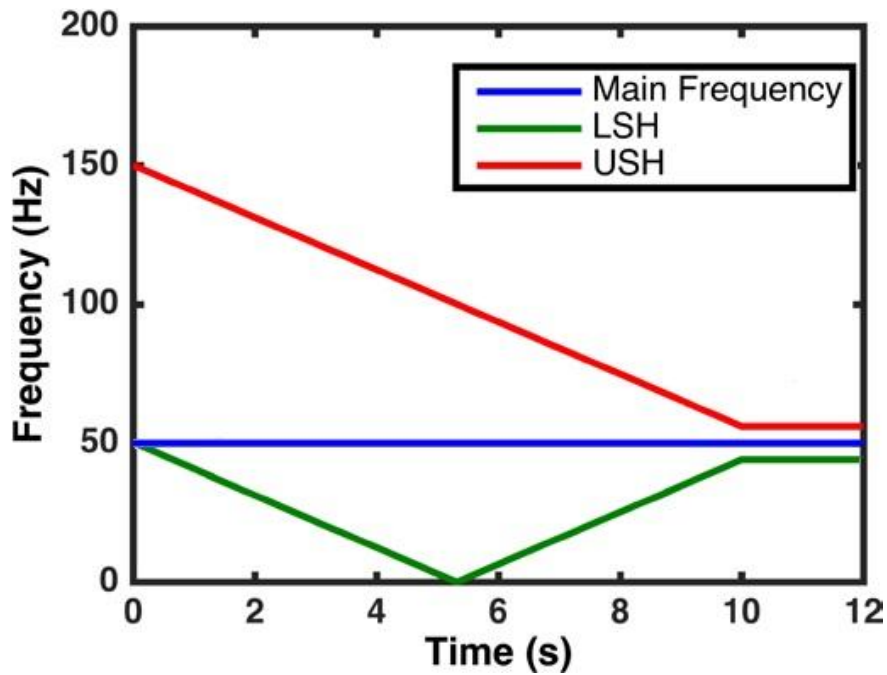


Figura 4.1 Trayectoria teórica de los armónicos utilizados: arranque del motor de inducción con alimentación directa a la red de 10s de largo (suponiendo una evolución lineal del deslizamiento en función del tiempo).

En el motor de inducción alimentado por inversor, la evolución del tiempo de los armónicos durante la puesta en marcha es muy diferente de la de alimentación lineal, como se puede observar comparando las Figura 4.1 y Figura 4.2.

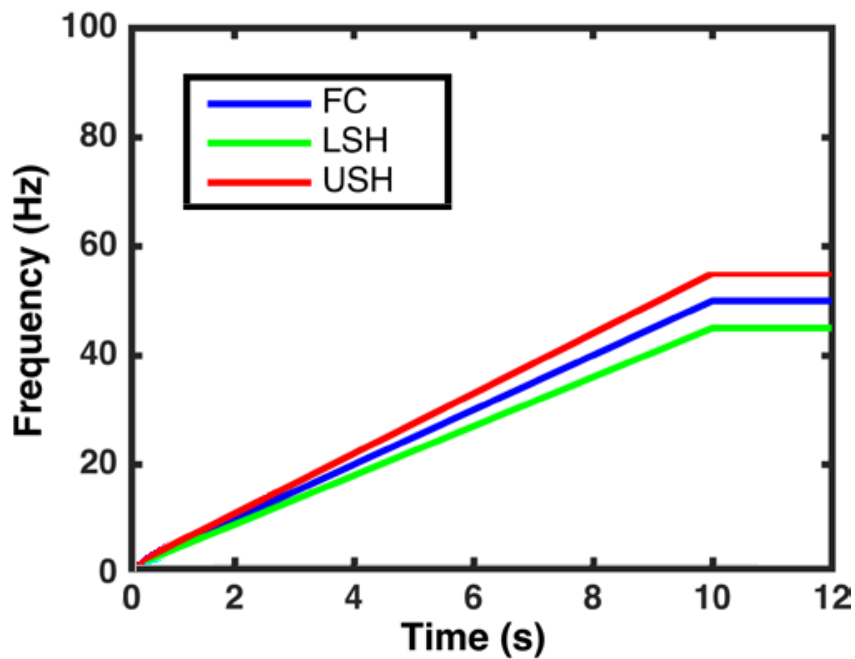


Figura 4.2 Trayectoria teórica de los armónicos utilizados: arranque del motor de inducción alimentado por inversor de 10s de largo con una evolución lineal de la frecuencia principal de 0 a 50 Hz.

Un inversor permite evitar la típica corriente de arranque de los motores de inducción con alimentación directa a la red y controlar la duración de este transitorio. Como resultado, la puesta en marcha es suave y libre de altos torques. Independientemente del tipo de control del motor de inducción, el FC de la tensión de salida del inversor se incrementa desde 0 Hz hasta la frecuencia de funcionamiento final (50 Hz). Además, a medida que la velocidad del motor aumenta paralelamente a la velocidad síncrona y muy cerca de ella, la frecuencia de deslizamiento sf_s es muy baja. En consecuencia, el LSH y el USH (que tienen baja energía) evolucionan durante el arranque paralelo y cercano al FC (armónico de mayor energía), haciendo su detección especialmente difícil debido a la diferencia de energías entre ellos.

4.1.2 Adaptive Slope Transform (AST)

Existen varias herramientas para la detección de fallos basadas en el análisis tiempo-frecuencia en motores de inducción de alimentación con inversor como pueden ser la Transformada Rápida de Fourier, la Distribución *Wigner-Ville*, la Transformada de *Hilbert-Huang*, etc. Entre todas las técnicas existentes, en nuestro trabajo se ha utilizado la *Adaptive Slope Transform (AST)*. A continuación se explicará con más detalles en qué consiste esta transformada. Para más información de esta transformada o de otras técnicas relacionadas se puede consultar Fernández-Cavero et al. (2017).

La AST pertenece a la familia de transformaciones lineales. Este tipo de transformaciones proporcionan un buen resultado con una compensación entre resoluciones de tiempo y frecuencia y esto significa que la evolución, en lugar de ser representada por una línea perfectamente fina, tiene un cierto “grosor”. La AST permite fijar una compensación diferente para cada punto en el espacio f-t, optimizando el resultado en todas partes. En otras palabras, la compensación se adapta a lo largo de las trayectorias armónicas para minimizar el grosor de la evolución que se está capturando. Como consecuencia, las evoluciones aparecen tan finas como es posible con este tipo de transformación y, así, pueden distinguirse y caracterizarse mejor.

Este enfoque se ha aplicado para detectar roturas de barras en motores de inducción alimentados directamente a la red. Gracias a la adaptabilidad a las transformadas, las evoluciones de armónicos de la barra de rotor rota se capturan completamente durante un transitorio complejo, como un arranque seguido de oscilaciones de carga, incluso en regiones donde evolucionan muy cerca del FC.

En el caso del motor con una rotura de barra (Figura 4.3), el criterio de pendiente se aplica a la evolución del FC durante el arranque y, así, su grosor minimiza. Las trayectorias de los armónicos son casi paralelas a la evolución del FC (como se analiza en la Figura 4.2). Sin embargo, los armónicos están demasiado cerca del FC, e incluso con un grosor mínimo del FC, caen dentro de la línea que representa la evolución del FC, y no pueden detectarse (Figura 4.3).

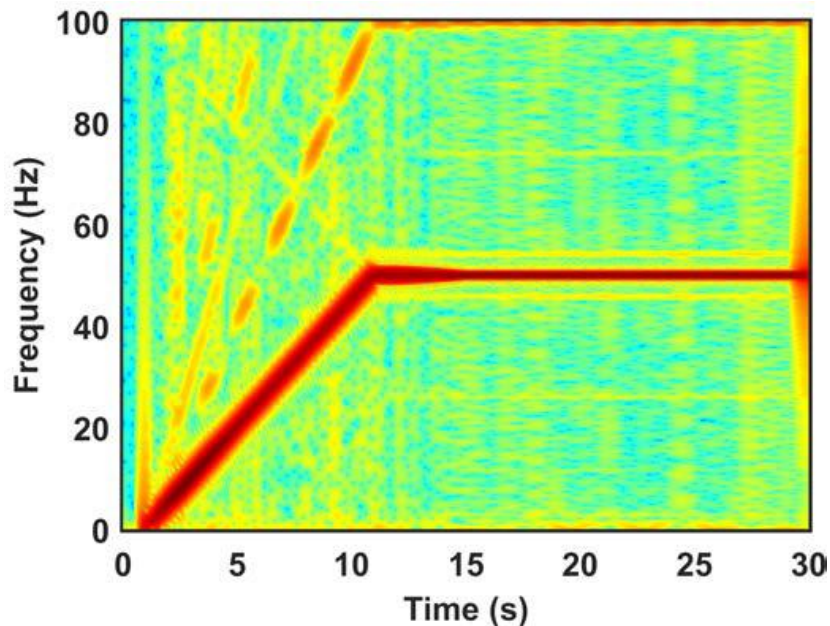


Figura 4.3 Espectrograma usando la transformada AST.

Cuando el motor alcanza el estado estacionario (alrededor de 11s en la Figura 4.3) la resolución de frecuencia se incrementa gracias a la adaptabilidad de AST, por lo que el espesor del FC a lo largo del eje de frecuencia disminuye.

Concluyendo, el AST aplicado en el motor de inducción alimentado por inversor cambia la compensación a lo largo del tiempo para optimizar la captura del FC, no sólo durante el arranque sino también durante el estado estacionario, y utiliza esta misma compensación a lo largo de las evoluciones de armónicos de fallo, ya que sus pendientes son lo suficientemente similares. Esto da como resultado una buena resolución simultáneamente durante el arranque y durante el régimen estacionario. En el motor de inducción alimentado directamente a la red, sí que se pueden notar diferencias en la adaptabilidad de la transformada, ya que las evoluciones del FC y de los armónicos defectuosos son completamente diferentes.

4.2 Análisis de datos funcionales

4.2.1 Datos funcionales

4.2.1.1 Concepto

El Análisis de Datos Funcionales es una rama bastante novedosa de la Estadística, que estudia y analiza la información contenida en muestras de curvas, superficies o muestras de elementos que varíen sobre un espacio continuo. En nuestro trabajo nos centramos en el estudio de la información contenida en curvas y no en otro tipo de datos funcionales. Para analizar datos funcionales, los investigadores han usado diversas adaptaciones de los procedimientos estadísticos tradicionales entre los cuales Ramsay y Silverman (2005) proporcionaron métodos esencialmente paramétricos, mientras Ferraty y Vieu (2006) desarrollaron técnicas no paramétricas. En contraste con el análisis de datos funcionales basado en modelos, los métodos de visualización a menudo ayudan a mostrar los datos, resaltan sus características y revelando muchas características interesantes.

La idea es ver los datos como funciones y no como unos datos multivariante en dimensión muy alta ya que al observar las curvas en momentos consecutivos se suelen observar dependencias o correlaciones muy fuertes entre observaciones consecutivas. En general, los puntos o valores de tiempo en los que se observan las funciones pueden variar de un registro a otro. A continuación, para una mejor comprensión, explicaremos uno de los muchos ejemplos que se encuentran en el libro de Ramsay y Silverman (2005), donde se puede encontrar información más detallada acerca del Análisis de Datos Funcionales.

La Figura 4.4 proporciona un ejemplo de conjunto de datos funcionales del tipo a los que consideraremos en este trabajo. Dicha Figura muestra las alturas de 10 niñas medidas en un conjunto de 31 edades en el *Berkeley Growth Study* (Tuddenham y Snyder (1954)). Las edades no están igualmente espaciadas, cuando el niño tiene un año de edad se le realizan cuatro mediciones, posteriormente las mediciones son anuales de dos a ocho años, seguido de alturas medidas bianualmente. A pesar de que se tuvo cuidado en el proceso de medición, existe una incertidumbre o ruido en valores de altura que tiene una desviación estándar de aproximadamente tres milímetros. A pesar de que cada registro implica sólo valores discretos, estos valores reflejan una variación suave de la altura que se podría evaluar, en principio, tan a menudo como se desee, y por lo tanto es una función de altura. Así, los datos consisten en una muestra de 10 observaciones funcionales $Altura(t_i)$ con $i = 1, 2, \dots, y 10$.

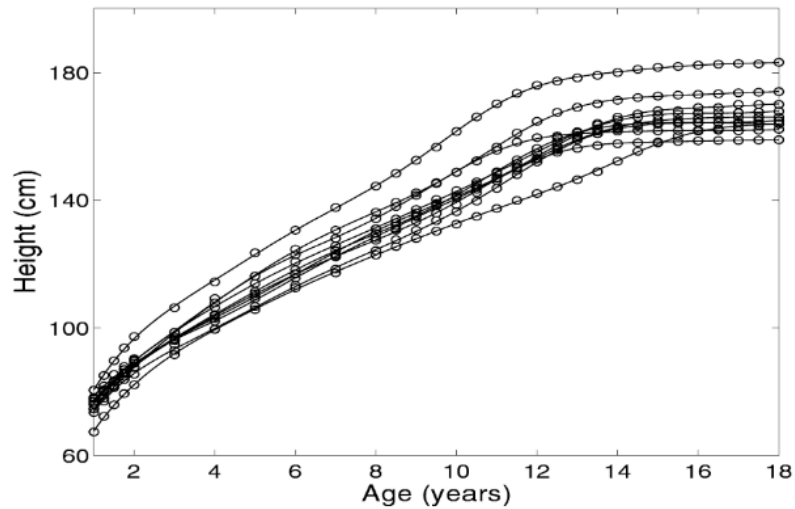


Figura 4.4 Las alturas de 10 niñas medidas en 31 edades. Los círculos indican las edades de medición desigualmente espaciadas.

El uso de técnicas funcionales permite extraer información de este tipo de datos que tratarlos como variables tomando valores en dimensión muy alta no lo permiten. Por ejemplo, la Figura 4.5 muestra las curvas de aceleración D^2 Altura estimadas a partir de estos datos por Ramsay et al. (1995). En dicha Figura, el brote de crecimiento puberal aparece como una fuerte aceleración positiva seguida de una fuerte desaceleración negativa. Pero la mayoría de los registros también muestran una desaceleración alrededor de los seis años. Por lo tanto, concluimos que parte de la variación de curva a curva puede explicarse a nivel de ciertas derivadas. El hecho de que las derivadas sean de interés es otra razón para pensar en los registros como funciones, en lugar de vectores de observación en tiempo discreto.

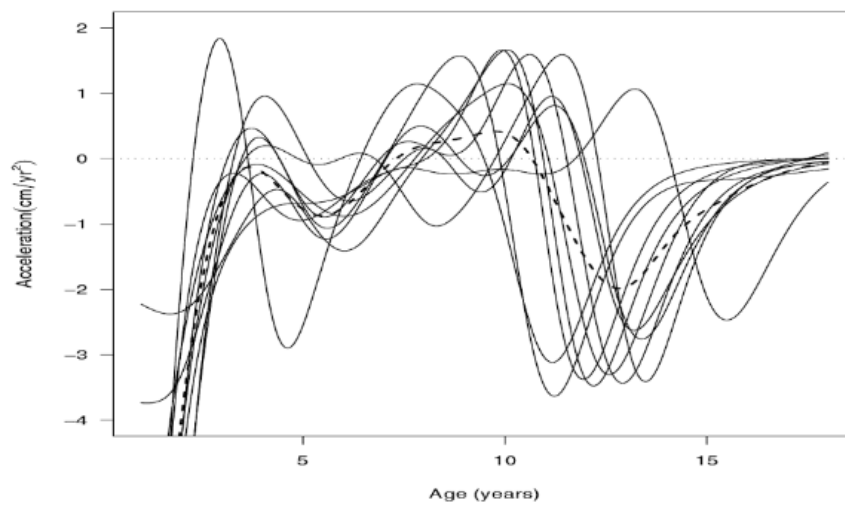


Figura 4.5 Las aceleraciones estimadas de altura para 10 niñas, medidas en centímetros por año. La línea discontinua es la media de corte-transversal y es un resumen de las curvas.

La respuesta de estas curvas de altura invita a una exploración de las formas en que las curvas varían. Esto es potencialmente complejo. Por ejemplo, el rápido crecimiento durante la pubertad es visible en todas las curvas, pero tanto el momento como la intensidad del crecimiento puberal difieren de una niña a otra. Sin duda, sería útil algún tipo de análisis de componentes principales, pero debemos adaptar el procedimiento para tener en cuenta el espaciado desigual de las edades y la suavidad de las funciones de altura subyacentes. Un objetivo podría ser la separación de la variación en el tiempo de los eventos de crecimiento significativo, como el brote de crecimiento puberal, de la variación en la intensidad del crecimiento.

4.2.1.2 Objetivos del Análisis Funcional

Los objetivos del Análisis de Datos Funcionales son esencialmente los mismos que los de cualquier otra rama de la Estadística. Incluyen, por ejemplo, los siguientes objetivos:

- Representar los datos de manera que ayuden a un análisis más profundo.
- Visualizar los datos para resaltar características importantes.
- Estudiar importantes fuentes y patrones de variaciones entre los datos.
- Explicar la variación de un resultado o variable dependiente mediante el uso de información de variables de entrada o variables independientes.
- Comparar dos o más conjuntos de datos.

Cada una de estas actividades puede realizarse con técnicas apropiadas para dichos objetivos. Otra forma de clasificar la actividad realizada en un análisis de datos es como exploratoria, confirmatoria o predictiva. En el modo exploratorio, las preguntas a los datos tienden a ser bastante abiertas en el sentido de que se espera que la técnica correcta revele aspectos nuevos e interesantes de los datos, así como arrojar luz sobre rasgos conocidos y evidentes. Las investigaciones exploratorias tienden a considerar sólo los datos disponibles, con menos preocupación por las declaraciones sobre cuestiones más amplias, como las características de las poblaciones o los acontecimientos no observados en los datos. Los análisis de confirmación, por otro lado, tienden a ser inferenciales y a ser determinados por preguntas específicas sobre los datos. Se supone que algún tipo de estructura está presente en los datos, y uno quiere saber si ciertas afirmaciones o hipótesis específicas pueden ser consideradas por los datos. Los estudios predictivos son también bastante comunes y se enfocan en usar los datos disponibles para hacer una declaración sobre estados no observados.

4.2.2 Boxplots

4.2.2.1 Boxplots clásicos

Los “boxplots” o “box and whiskers plots” (diagrama de cajas o diagrama de cajas y bigotes) consisten en una ilustración visual en la que se puede observar determinadas características de importancia, simultáneamente, tales como la simetría y la dispersión. En primer lugar introducido por Tukey (1970) y Tukey (1977) en el análisis exploratorio de datos, los boxplots han evolucionado hasta convertirse en un método sencillo pero muy informativo en el análisis exploratorio de datos. Para realizarlos son necesarios los valores mínimos y máximos de los datos y los tres cuartiles.

Este tipo de gráficas consiste en una caja con forma de rectángulo, donde los lados de mayor longitud representan el recorrido existente entre el primer y tercer cuartiles (rango intercuartílico). Este rectángulo se divide a través de una línea vertical la cual representa la mediana de los datos. Cabe recordar que el segundo cuartil coincide con la mediana.

La caja se coloca a escala sobre una línea cuyos extremos son los valores mínimo y máximo de la variable pero dentro de unos límites basados en los valores del primer y tercer cuartil. Las líneas que sobresalen de la caja se denominan bigotes. Dichos bigotes poseen un límite de prolongación que son los valores máximos y mínimos de la serie. Cualquier dato que no esté ubicado en el interior de este rango es localizado y marcado individualmente como posible valor atípico u outlier.

A continuación se explica el significado de las medidas descriptivas:

- **Rango intercuartílico (IQR)**: Es la diferencia que existe entre el tercer y el primer cuartil y se expresa:

$$IQR = Q3 - Q1$$

- **Límite inferior (LI)**: Es el extremo inferior y se expresa:

$$LI = Q1 - 1.5 * IQR$$

- **Límite superior (LS)**: Es el extremo superior y se expresa:

$$LS = Q3 + 1.5 * IQR$$

- **Valor mínimo (Mín)**: Es el menor valor del conjunto de datos que es mayor o igual al límite inferior.

- **Valor máximo (Máx):** Es el mayor valor del conjunto de datos que es menor o igual al límite superior.
- **Primer cuartil (Q1):** Consiste en el valor superior al 25% de todos los valores de la distribución.
- **Segundo cuartil (Q2):** Como hemos recordado anteriormente, coincide con el valor de la mediana. Se encuentra situada en el medio de la distribución, por encima del 50% de las observaciones y por debajo del 50% de éstas.
- **Tercer cuartil (Q3):** Se trata del valor que sobrepasa el 75% de todos los valores de la distribución.

Cabe destacar que en el diagrama de cajas también se pueden encontrar valores atípicos que son aquellos que están por encima del límite superior o por debajo del límite inferior. Estos datos pueden representar opiniones extremas, errores de registro, errores de medición, etc.

Para un mayor entendimiento de los boxplots clásicos vamos a ilustrar un breve ejemplo de un ejercicio. En la Figura 4.6 podemos ver un conjunto de datos del que hay que realizar un boxplot clásico.

Altura de los árboles (metros)									
7,13	5,35	10,14	4,15	5,85	4,69	6,84	0,94	3,45	5,79
5,64	4,92	5,32	6,56	6,17	4,33	6,18	6,50	3,74	2,98

Figura 4.6 Conjunto de datos de la altura de 20 árboles medida en metros.

Primero se ordenan todos los datos. A continuación se calculan los percentiles y posteriormente, ambos límites. Utilizando las fórmulas anteriormente citadas obtenemos los siguientes valores:

$$Q_1 = 4.20 \quad Q_2 = 5.50 \quad Q_3 = 6.42 \quad LI = 0,96 \quad LS = 9,59$$

Una vez que tengamos estos datos procedemos a hallar los valores mínimos y máximos dentro de los límites superior e inferior para poder construir el diagrama de cajas. Con las definiciones que hemos dado de los valores mínimos, obtenemos los siguientes valores:

$$Mín = 2,98 \quad Máx = 7,13$$

Por último, todos los datos que se encuentren fuera de los dos anteriores valores se los marca como posibles valores atípicos. En la siguiente Figura se puede observar el diagrama de cajas construido.

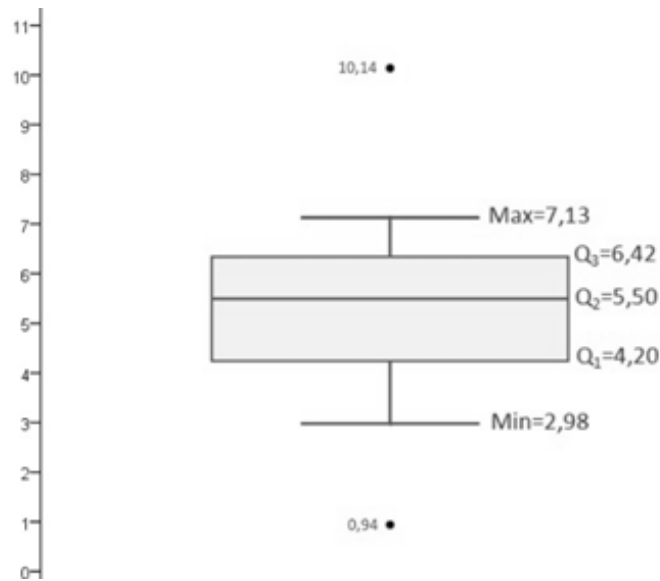


Figura 4.7 Diagrama de cajas construido.

Se puede apreciar cierta asimetría debida a que la mediana (Q_2) no está situada en el centro de la caja. Esto se debe a que existen árboles con mayor altura que la mediana posee una mayor separación de ésta, al contrario que los árboles inferiores a la mediana que están más agrupados y cerca de la mediana.

A pesar de que lo anterior es de gran utilidad, donde de verdad se da el uso a este tipo de diagramas es en las comparaciones de diferentes distribuciones. En la Figura 4.7 se puede observar los tiempos realizados por un atleta en sus entrenamientos de la prueba de 200 metros a lo largo de 10 días consecutivos. Cada día se registran nuevos tiempos y se calcula los valores mínimo y máximo, la mediana y los cuartiles.

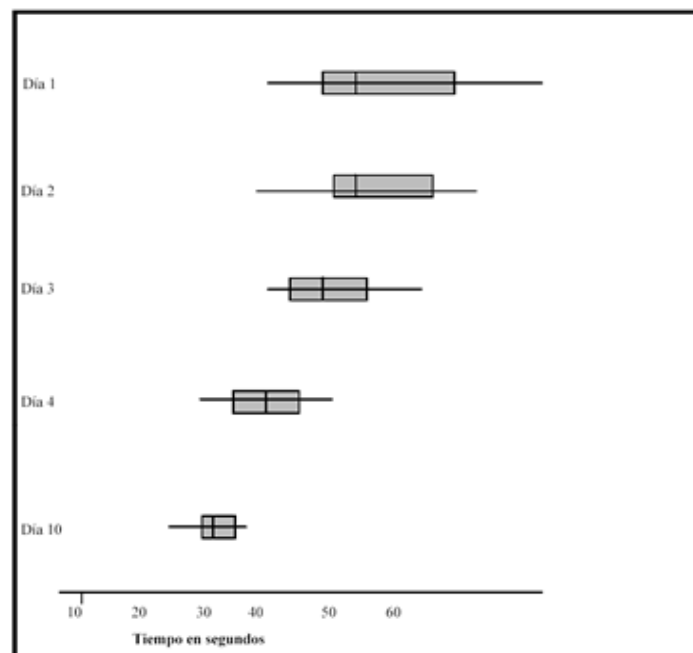


Figura 4.8 Comparación de distribuciones del entrenamiento de un atleta en 10 días consecutivos.

Se puede observar como las cajas se van desplazando a lo largo de los días a la izquierda indicando que el entrenamiento ha sido fructífero, debido a que siendo la misma distancia, logra reducir los tiempos. La diferencia entre el máximo y el mínimo también disminuye como también lo hace el rango intercuartílico.

4.2.2.2 Boxplots funcionales

4.2.2.2.1 Introducción

Como hemos descrito en la sección anterior, sabemos que el boxplot es un método gráfico para mostrar cinco estadísticas descriptivas: la mediana, el primer y el tercer cuartiles y las observaciones mínimas y máximas. El primer paso para construir un boxplot es el ordenamiento de los datos. En el ajuste univariante, el ranking es simplemente desde la observación más pequeña hasta la más grande. Sin embargo, el ordenamiento multivariado es mucho más complicado y ha atraído considerable interés en los últimos años. Para generalizar las estadísticas de órdenes o clasificaciones a la configuración multivariante, se han introducido diferentes versiones de profundidad de datos para medir cuán profunda (central) o periférica (atípica) es una observación.

Para datos funcionales, López-Pintado y Romo (2009) introdujeron recientemente la noción de “profundidad de banda”. Permite ordenar una muestra de curvas desde el centro hacia afuera y, por lo tanto, introduce una medida para definir cuartiles funcionales y la centralidad o periferia de una observación. Teniendo las curvas como entrada, el boxplot funcional es una extensión natural del boxplot clásico y es una herramienta atractiva de la visualización de datos funcionales.

4.2.2.2.1 Construcción de boxplot funcionales

En el boxplot clásico, la caja en sí representa el 50% medio de los datos “más centrales”. Una idea interesante que puede extenderse a los datos funcionales es el concepto de región central introducido por Liu et al. (1999). La banda delimitada por la proporción α ($0 < \alpha < 1$) de las curvas más profundas de la muestra se utiliza para determinar la región central α . En particular, la muestra del 50% de la región central es

$$C_{0,5} = \{(t, y(t)): \min_{r=1, \dots, [n/2]} y_{[r]}(t) \leq y(t) \leq \max_{r=1, \dots, [n/2]} y_{[r]}(t)\},$$

donde $[n/2]$ es el entero más pequeño no menor que $n/2$ e $y_{[r]}$ son las curvas o funciones en nuestra muestra ordenadas de menor a mayor profundidad o centralidad. El borde de la región central del 50% se define como la envoltura que representa la caja en un boxplot clásico.

Por lo tanto, esta región central del 50% es el análogo al "intervalo inter-cuartílico" y da una indicación útil de la extensión del 50% central de las curvas. Este es un rango robusto para la interpretación porque la región central del 50% no se ve afectada por valores atípicos o valores extremos, y da una visualización menos sesgada de la propagación de las curvas. También hay una curva en la caja que indica la mediana $y_{[1]}(t)$, o la curva más central que tiene el mayor valor de profundidad de banda. La curva mediana es también una estadística robusta para medir la centralidad.

Los "bigotes" del diagrama de caja son las líneas verticales del gráfico que se extienden desde el cuadro e indican la envolvente máxima del conjunto de datos excepto los valores atípicos. Por lo tanto, necesitamos identificar primero los valores atípicos. Una vez más, extendemos el criterio empírico de outlier de 1.5 veces IQR al boxplot funcional. Las "cercas" (extensión del concepto tradicional de los bigotes) se obtienen aumentando la envolvente de la región central del 50% en 1.5 veces el rango de la región central del 50%. Cualquier curva fuera de las cercas se señala como posible valor atípico. Vale la pena señalar que cuando cada curva es simplemente una única observación, el boxplot funcional reduce a un boxplot clásico.

La Figura 4.8 ilustra unos datos que consisten en las temperaturas mensuales de la superficie del mar medidas en grados Celsius sobre el Océano Pacífico tropical centro-oriental. En este caso, cada curva representa un año de temperatura de la superficie del mar observado en grados Celsius desde enero 1951 hasta diciembre 2007.

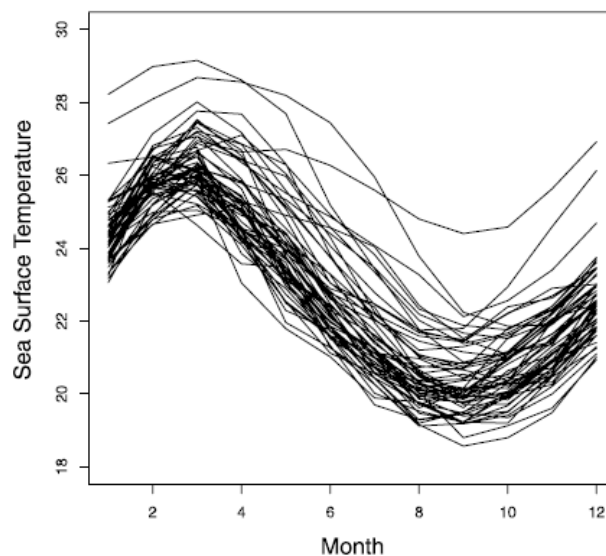


Figura 4.8 Datos de las temperaturas mensuales de la superficie del mar, medidos en grados Celsius sobre el este-central del Océano Pacífico tropical desde 1951 hasta 2007.

En nuestro boxplot funcional (Figura 4.9), sólo la curva mediana y los outliers marcados son observaciones reales. El borde de la caja en el medio denota la envoltura de la región central del 50% y el mínimo y el máximo proporcionan el rango de la envoltura no periférica.

Para mostrar esta diferencia, usamos curvas azules para denotar las envolturas, una curva negra para representar la curva mediana, y curvas discontinuas rojas para indicar los candidatos outliers. Por lo tanto, en lugar de tener cinco estadísticos de resumen como en un boxplot clásico, el boxplot funcional tiene la envoltura de la región central del 50%, la curva mediana, y la envoltura máxima no periférica como estadística descriptiva.

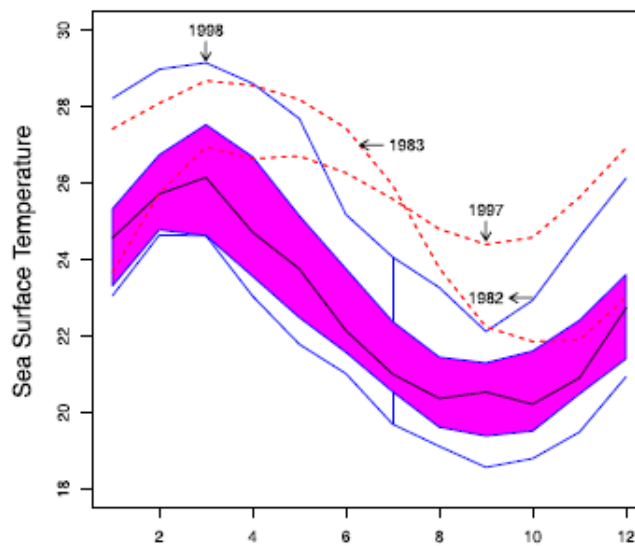


Figura 4.9 *Boxplot funcional de las temperaturas mensuales de la superficie del mar.*

Nuestro boxplot funcional detecta dos valores atípicos en los años 1983 y 1997. Además, el año 1982 de septiembre a diciembre y el año 1998 de enero a junio se consideran parte del máximo envolvente. Para datos funcionales, tales como estas temperaturas de la superficie del mar, habrá necesariamente dependencia en el tiempo. Teniendo en cuenta que esta dependencia en el tiempo puede afectar el rendimiento de detección de valores atípicos, se puede modificar el factor constante 1.5 en la práctica.

Al introducir el concepto de regiones centrales, el boxplot funcional puede generalizarse a un boxplot funcional mejorado mostrado en la Figura 4.10. Además de la región central del 50%, también se proporcionan las regiones centrales del 25% y del 75%.

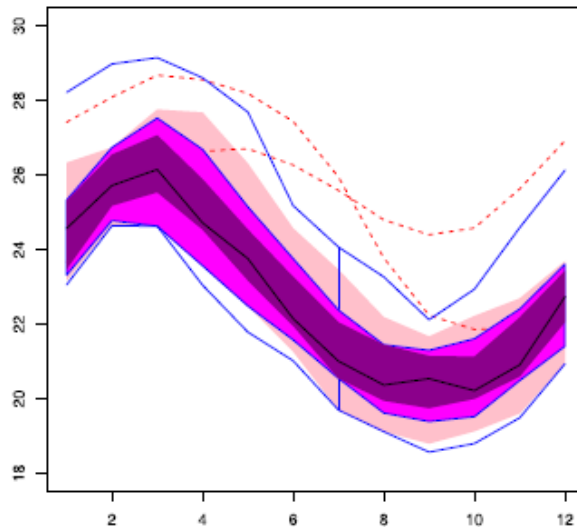


Figura 4.10 El boxplot funcional mejorado de temperaturas de la superficie del mar con magenta oscuro que denota la región central del 25%, magenta que representa la región central del 50% y rosa indica la región central del 75%.

Se puede pensar en usar el enfoque más intuitivo, los diagramas de cajas tomando las observaciones en cada momento del tiempo como variables separadas tal como se muestra en la Figura 4.11, y que no tratan cada curva como una observación funcional. Obviamente, tal enfoque ha perdido la información de las formas de las curvas. En general, las regiones centrales proporcionadas por los diagramas de bloques puntuales son más estrechas que las dadas por el diagrama de bloques funcional, por lo que muchos más puntos son detectados como valores atípicos.

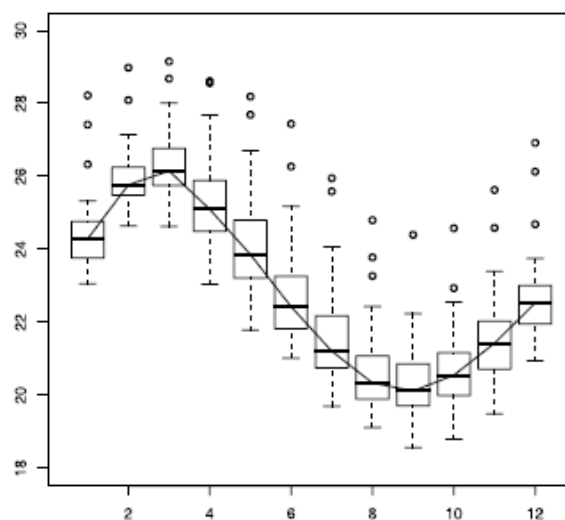


Figura 4.11 Diagramas puntuales de temperaturas de la superficie del mar con medianas conectadas por una línea negra.

Al comparar estos dos tipos de boxplot, vemos que la mediana funcional podría ser equivalente a las medianas en las Tablas de puntos sólo si todos los puntos de la curva mediana funcional son las medianas puntuales simultáneamente. Esto raramente es cierto para los datos funcionales, especialmente cuando las curvas son muy irregulares. Específicamente, en el ejemplo anterior de temperatura superficial del mar, se detectarían valores atípicos para cada mes sin tener en cuenta la tendencia anual. Uno puede conectar esos valores atípicos mensuales del mismo año, pero es muy difícil visualizar toda la curva anual como atípica y hay casos en los que sólo una o dos observaciones mensuales dentro de un año son relativamente extremas. Además, el uso de las medianas puntuales conectadas (la línea media negra en la Figura 4.11) como la curva más representativa no es muy sensible ya que suaviza demasiadas características mensuales de una curva de temperatura anual típica y no es una verdadera curva de la muestra.

Es importante señalar que la caja, los bigotes y la mediana pueden revelar información útil acerca de un conjunto de datos funcional al observar su posición, tamaño, longitud e incluso la forma de la caja o la curva media. Además, los espaciamientos entre las diferentes partes de la caja ayudan a indicar el grado de asimetría en los datos e identificar valores atípicos.

La información obtenida acerca de los boxplots funcionales se ha obtenido del artículo Sun y Genton (2011) donde se puede obtener aun más información acerca de este tema.

En el programa R, para la construcción de los boxplots funcionales ha sido necesario la función `fbplot`, la cual se encuentra en una librería llamada `fda`, que fue necesario descargar para su utilización.

4.2.3 ANOVA Funcional

Mediante los boxplots funcionales podemos hacernos una idea descriptiva visual de si las medias funcionales de más de dos grupos pueden ser consideradas iguales o no. Nótese que los boxplots también proporcionan información descriptiva de la variabilidad existente en esos grupos y que nos pueden servir a valorar visualmente dicha igualdad de medias.

No obstante, también tiene sentido preguntarse por procedimientos inferenciales más cuantitativos que eviten la subjetividad que la valoración de gráficos desgraciadamente puede tener. La técnica estadística por excelencia que permiten contrastar estadísticamente la igualdad de medias en distintas subpoblaciones (por ejemplo definidas por combinaciones de valores de las variables explicativas) es el

Análisis de la Varianza o ANOVA (ANalysis Of VAriance) (Iacobucci (2001)). Esta técnica permite obtener p-valores estadísticos en las comparaciones que antes realizábamos solo a nivel puramente descriptivo.

Las técnicas ANOVA, además de estar esencialmente pensadas para variables respuesta univariantes y no respuestas funcionales, asumen hipótesis generalmente bastante fuertes para que puedan ser aplicadas en este entorno de Análisis de Datos Funcionales. Por tanto, en este trabajo vamos a adoptar un enfoque totalmente no-paramétrico, es decir no dependiente del cumplimiento de ninguna hipótesis poblacional, y usaremos técnicas de remuestreo “bootstrap” (Efron (1979)) para probar estadísticamente la validez de la hipótesis de la igualdad de medias.

Para explicar la metodología aplicada nos basaremos en un caso particular tal como el que se muestra en la Figura 4.12. El gráfico de la izquierda muestra los dos grupos de curvas usando colores distintos (colores rojo y verde) con sus respectivas curvas medias. Nuestra idea sería ver si las curvas promedio poblacionales pueden ser iguales o no. El segundo gráfico muestra curvas de color gris que simulan una muestra bootstrap, del mismo tamaño que las muestras originales y que reproducen, en la medida de lo posible, las curvas originales si estas curvas hubieran sido obtenidas de dos grupos con la misma función de media. También, en este segundo gráfico, se muestran las correspondientes medias estimadas para los grupos originales y para las curvas previamente mencionadas de color gris. Como estadístico de contraste se puede usar una modificación del estadístico “F” tradicionalmente usado en ANOVA y adaptado al problema de datos funcionales (cociente entre variabilidad “entre grupos” y “dentro de grupos” pero ahora usando distancias funcionales). Estas muestras bootstrap se usan para simular los valores que hubiera tomado el pseudo-estadístico “F” comentado anteriormente bajo la hipótesis nula de que las medias fueran iguales. En el tercer gráfico se muestran los valores obtenidos del estadístico en el proceso de remuestreo “bootstrap” y una estimación no-paramétrica, usando técnicas de suavizado, de la densidad de la distribución de dicho estadístico bajo la hipótesis nula. La línea vertical roja muestra el valor observado del estadístico obtenido al aplicarse a nuestra muestra original de curvas. El p-valor es la estimación de la probabilidad de que nuestro estadístico tome valores más extremos para rechazar la hipótesis nula si usamos la distribución obtenida mediante la técnica bootstrap. Si este p-valor es pequeño se rechaza la hipótesis nula de igualdad de funciones de media.

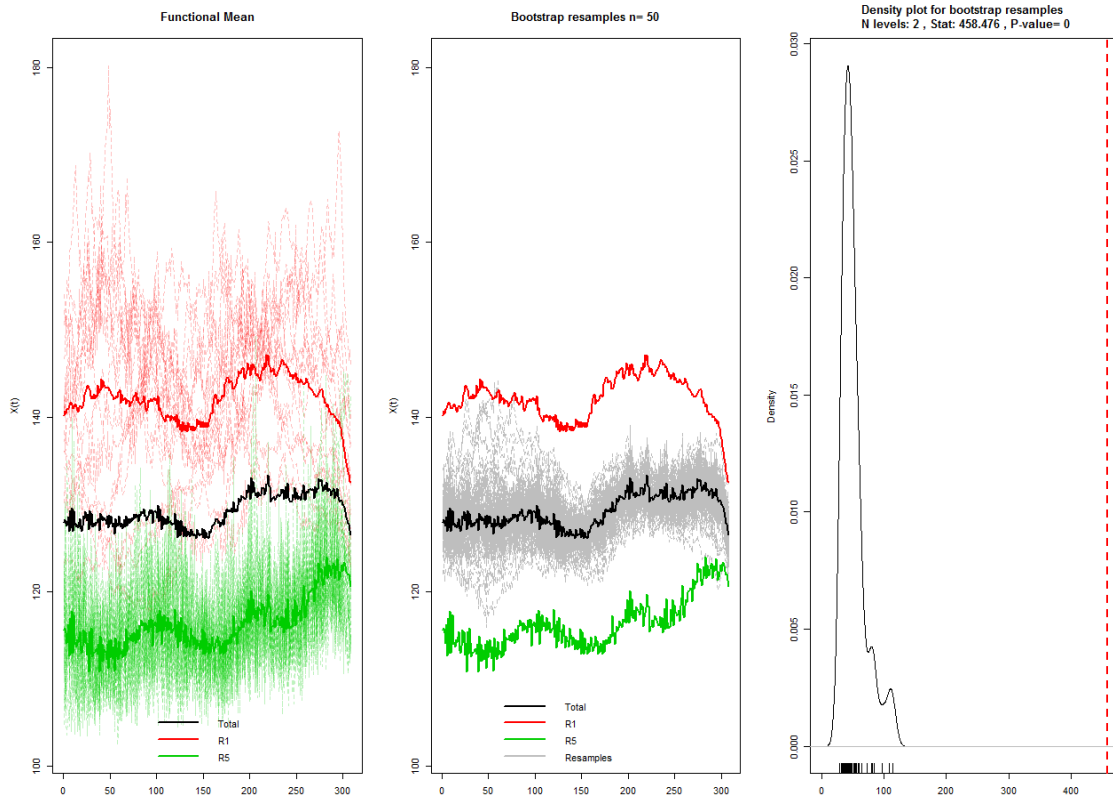


Figura 4.12 Ejemplo de una gráfica obtenida en el experimento utilizando la metodología del ANOVA funcional.

El procedimiento que utilizaremos para realizar este ANOVA funcional está descrito con más detalle en Cuevas et al. (2004) y será implementado mediante la librería `fda.usc` (Febrero-Bande y Oviedo de la Fuente (2012)) disponible en el repositorio CRAN.

4.2.4 Entorno de programación empleado

4.2.4.1 Lenguaje de programación R

El lenguaje de programación R es un sistema de análisis gráficos y estadísticos creado por Robert Gentleman y Ross Ihaka. R posee dos naturalezas, una como programa y otra como lenguaje de programación y se considera como un dialecto del S. El programa R contiene una amplia gama de herramientas estadísticas como análisis de series temporales, modelos lineales y no lineales, tests estadísticos, gráficas, etc. R es distribuido sin ningún coste mediante *General Public Licence*, su desarrollo es llevado a cabo por diferentes estadísticos denominados como *Grupo Nuclear de Desarrollo del R*.

Para la instalación de este programa son necesarios archivos que son distribuidos a través de internet por *Comprehensive R Archive Network* (CRAN). Para descargar el programa se puede acceder directamente a la página web <https://www.r-project.org/>, además existen diferentes manuales y material en varios idiomas, como el usado en este trabajo que fue García (2008). Además del programa, existen diversos paquetes o bibliotecas contribuidas que pueden ser descargados si algunas de las funcionalidades a utilizar no están incorporadas en la distribución base del programa.

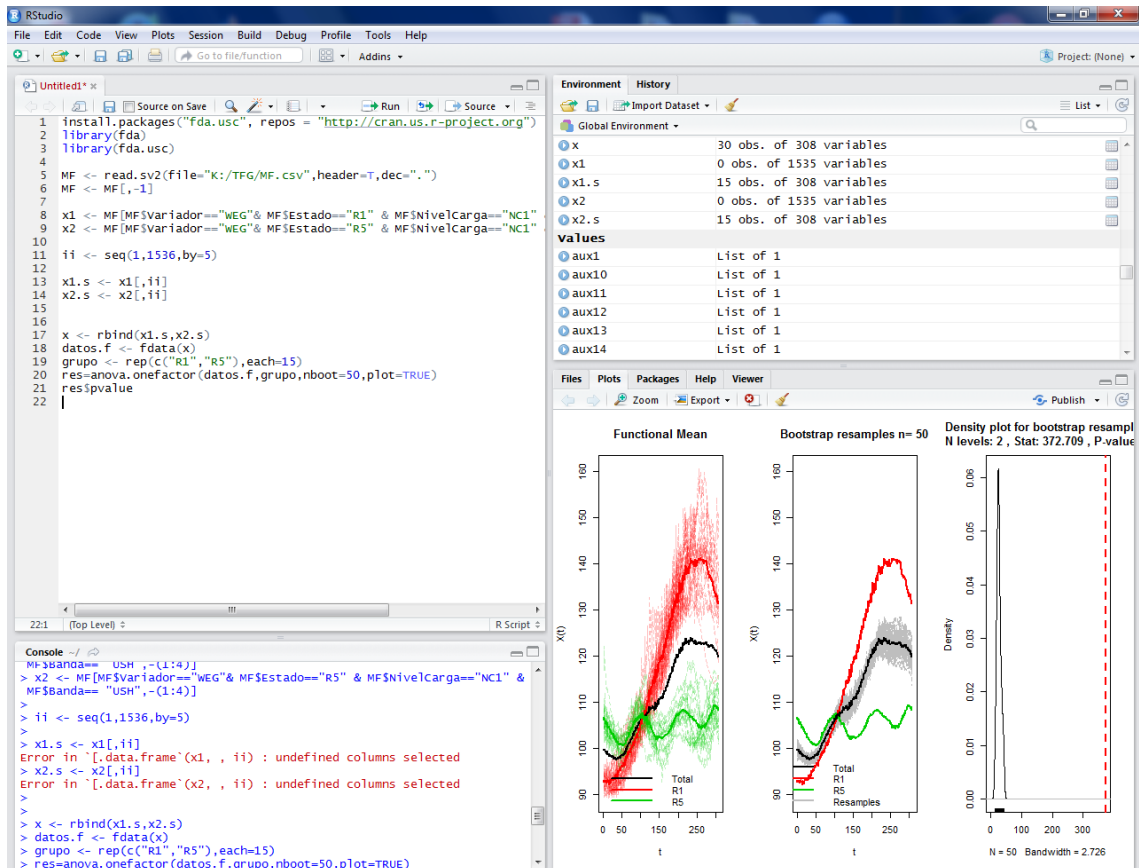


Figura 4.13 Interfaz del lenguaje de programación R (RStudio).

Para trabajar de una manera más sencilla y eficaz se ha utilizado un interfaz del programa R llamado *RStudio* (<https://www.rstudio.com/>). Como se puede observar en la Figura 4.13, este interfaz es sencillo y está compuesto básicamente por 4 ventanas y una barra de comandos. La ventana superior izquierda consiste en una consola donde el usuario introduce el código de programación. Debajo de esta ventana aparece el código escrito por el usuario mostrando los posibles errores en rojo. En la ventana superior derecha se visualizan todas las variables utilizadas en el código de programación, pudiendo ser vectores, matrices, etc. En la ventana inferior derecha se visualizan las gráficas solicitadas en el código introducido por el usuario.

4.2.4.2 Paquetes de R

Como hemos comentado en la sección anterior, existe la posibilidad de cargar distintos paquetes adicionales en el programa para realizar determinadas funciones que no se podían usar. Nuestro trabajo se centra en el uso de datos funcionales. Para programar en R las diferentes técnicas empleadas fue necesaria la instalación de dos paquetes adicionales denominados `fda` y `fda.usc` como se puede ver en la parte superior del código de la Figura 4.13. El paquete `fda` contiene numerosos procedimientos estadísticos tradicionales y es seguramente el más usado en este campo. El nombre de `fda` proviene de *Functional Data Analysis*. Por otro lado, la terminación `usc` del segundo paquete proviene de la Universidad de Santiago de Compostela, ya que este paquete ha sido creado por dicha universidad.

El paquete `fda` incluye conjuntos de datos y archivos de secuencias de comandos. En nuestro trabajo lo hemos instalado con el objetivo de usar la función `fbplot`. Esta función produce bloques funcionales o bloques funcionales mejorados de los datos funcionales dados y también se puede utilizar para realizar el ordenamiento de datos funcionales basado en la profundidad de la banda. Para una mayor información acerca de este paquete se puede dirigir al siguiente pdf <https://cran.r-project.org/web/packages/fda/fda.pdf>.

El paquete `fda.usc` (Febrero-Bande y Oviedo de la Fuente (2012)) permite llevar a cabo un análisis exploratorio y descriptivo de los datos funcionales explorando sus características más importantes: como las mediciones de profundidad o la detección de outliers funcionales, entre otras. También ayuda a explicar y modelar la relación entre una variable dependiente e independiente (modelos de regresión) y hacer predicciones. Además se incluyen métodos para la clasificación supervisada o no supervisada de un conjunto de datos funcionales con respecto a una característica de los datos. Finalmente, puede realizar análisis de modelo de varianza (ANOVA) para datos funcionales. Para una mayor información acerca de este paquete se puede dirigir al siguiente documento pdf <https://cran.r-project.org/web/packages/fda.usc/fda.usc.pdf>.

Capítulo 5

Resultados

En este capítulo se mostrarán los resultados más significativos obtenidos de la experimentación. Se puede visualizar todos los resultados obtenidos de la experimentación en el Anexo A.

A continuación expondremos las gráficas resultantes de las técnicas de datos funcionales explicadas en el capítulo anterior aplicadas a nuestros datos basados en la monitorización de motores.

5.1 Estudio descriptivo

Como hemos comentado con anterioridad, nuestro trabajo se centra exclusivamente en obtener información acerca del estado de nuestro motor de inducción. Pero también hay ciertos factores que pueden influir en nuestro objetivo como son el nivel de carga, los armónicos y los inversores. En esta sección, se compara todos los posibles factores de influencia de la experimentación además del estado del motor.

Vamos a recordar como denominábamos a cada factor de influencia y al estado del motor.

- **Inversores:** Recordamos que teníamos cinco clases de inversores: Inversor PowerFlex 40 de Allen Bradley (*AB*), Inversor ACS355 de ABB (*ABB*), Inversor Micromaster 420 de Siemens (*SIE*), Inversor Altivar 66 de Télémécanique (*TM*) e Inversor CFW 11 de WEG (*WEG*).
- **Estado del motor:** El motor se puede encontrar en perfectas condiciones (*R1*) o bien puede tener rota una barra del rotor (*R5*).
- **Nivel de carga:** Existen dos posibles niveles de carga, uno bajo (*NC1*) y el otro alto (*NC2*).
- **Armónicos:** En este estudio solo se estudian los dos bandas más cercanas al fundamental que son la banda superior *upper-sideband harmonic* (*USH*) y la banda inferior *lower-sideband harmonic* (*LSH*).

Las siglas puestas entre paréntesis sirven para saber más fácilmente y rápidamente cual estamos estudiando en cada momento. Cabe destacar que en el orden en el que han sido explicadas también es el orden en el cual se las denomina. Por ejemplo si vamos a estudiar es estado del motor con un inversor Siemens, con nivel de carga bajo y su banda superior se denominará *SIENC1USH*. Esta notación ha sido especialmente aplicada al reportar los resultados en el Anexo A.

Partiendo del ejemplo anterior, se mostrará su gráfica a continuación.

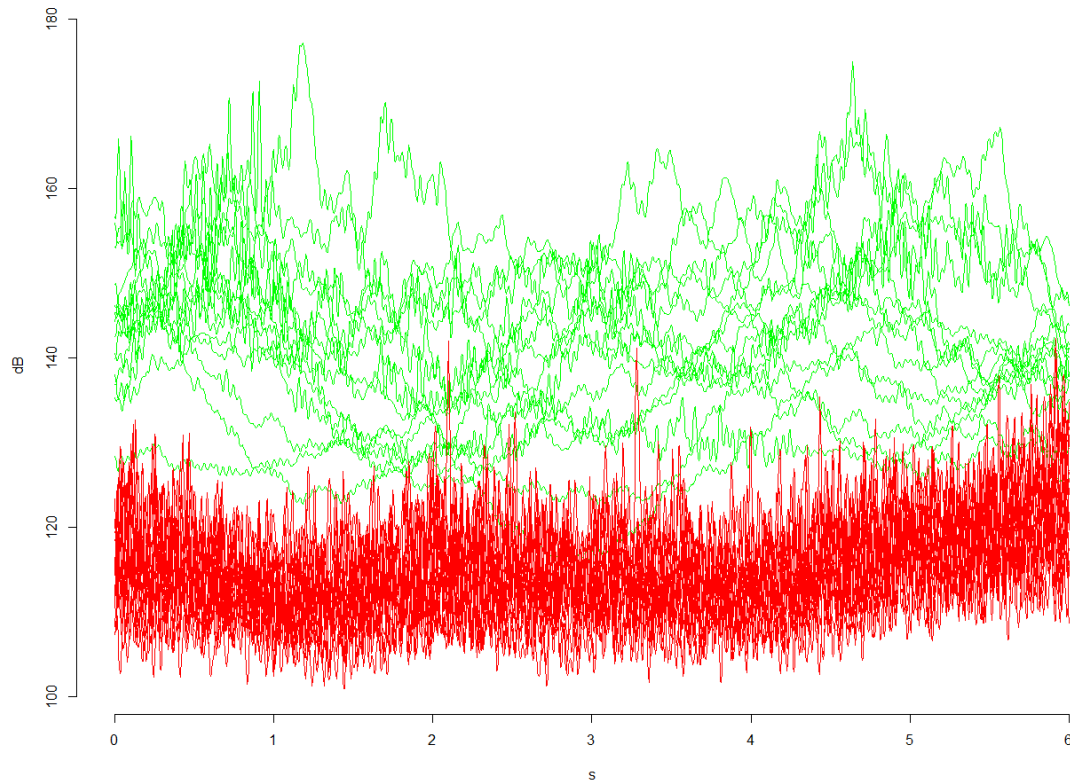


Figura 5.1 SIENC1USH: Inversor Siemens, con nivel de carga bajo y su banda superior usando el color rojo para el motor dañado y verde para el sano.

Esta gráfica corresponde a la comparación del estado de un motor con un inversor Siemens, con nivel de carga alto y su banda superior donde el color verde significa que el motor está sano y el color rojo lo contrario.

El eje de ordenadas representa la densidad de energía medida en decibelios (dB) y el eje de abscisas representa el tiempo medido en segundos (s). La densidad de energía representa la energía que posee cada curva. La unidad es el dB porque se mide la altura de los picos de energía observado en LSH y USH en valor relativo respecto a la altura del pico observado en la componente principal y que se consideraría como un valor cero. Así, un valor “bajo” en la variable representada en todos los gráficos incluidos en esta Sección, significan que el pico LSH o USH asociado ha sido “alto” ya que se ha aproximado más al valor del pico correspondiente al FC.

Como ya comentamos en el Capítulo 3, el tiempo total de señal capturada era de 30s, pero en nuestro estudio se tomaban solamente 6s del estado transitorio. Estos 6s del transitorio son los que se representan en el eje de abscisas. Este eje será fijo y estará siempre comprendido entre el 0 y 6 segundos en todas las gráficas. Por otro lado, el eje de ordenadas puede estar comprendido entre diferentes valores con el objetivo de

una visualización óptima para cada gráfica. En este caso está comprendido entre 100 y 180 dB, pero pudiera darse el caso que fuese mayor o menor.

En las siguientes secciones compararemos descriptivamente todos los factores de influencia y obviamente, el estado de nuestro motor, diferenciándolos con distintos colores.

5.1.1 Comparación de inversores

Como hay cinco inversores, hemos comparado todos a la vez para ver las posibles diferencias que existen entre ellos. Para diferenciarlos, hemos asignado diferentes colores a cada inversor:

- **AB**: Color Rojo.
- **ABB**: Color Azul.
- **SIE**: Color Verde.
- **TM**: Color Negro.
- **WEG**: Color Amarillo.

Solo pondremos algún gráfico para observar simplemente las diferencias que hay entre cada inversor.

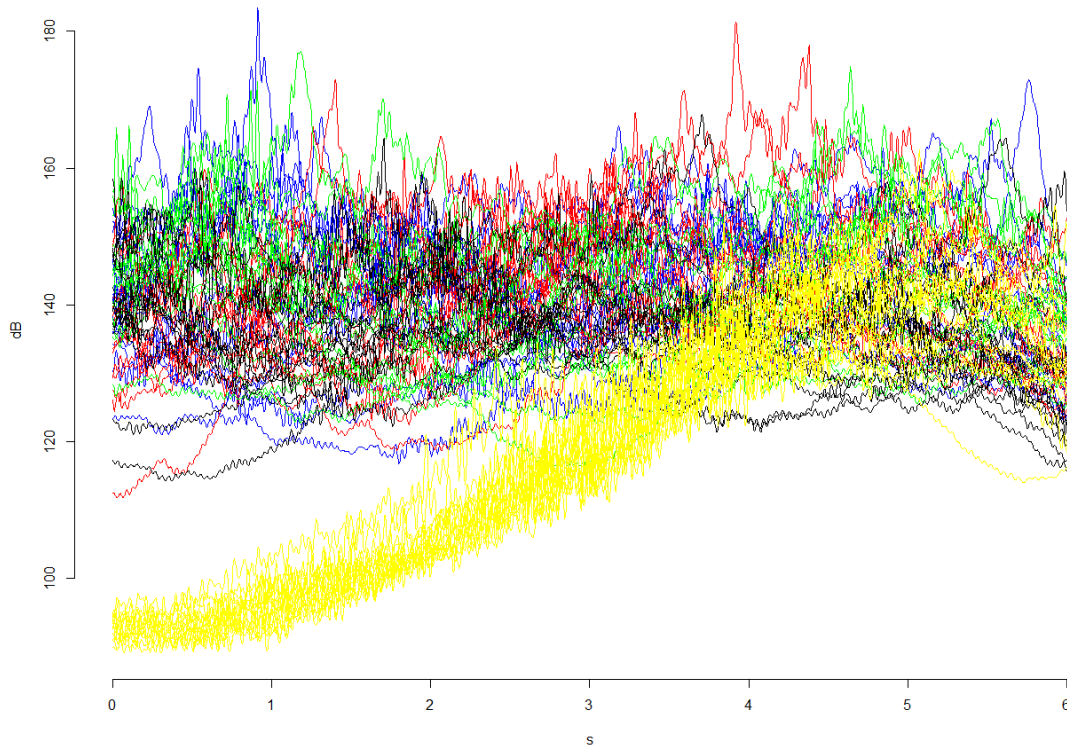


Figura 5.2 R1NC1USH: Motor sano, con nivel de carga bajo y su banda superior usando el color rojo para el inversor Allen Bradley, el azul para el ABB, el verde para el Siemens, el negro para el Télémécanique y el amarillo para el WEG.

El ejemplo anterior muestra la comparación de los cinco inversores con el motor sano, un nivel de carga bajo y la banda superior. Se ha querido mostrar esta gráfica para que se pueda visualizar que todos los inversores tienen un comportamiento similar salvo el inversor WEG. Vemos como el inversor WEG parte de una densidad de energía de 80 dB y llega a aumentar hasta los 160 dB, mientras los otros inversores se encuentran a lo largo de todo el periodo entre los 120 y 170 dB, siendo éstos más regulares.

A continuación se podrá observar otra gráfica donde se puede visualizar lo anteriormente mencionado. El inversor WEG en este caso es más regular, pero sigue estando muy por debajo, en cuanto a densidad de energía se refiere, respecto a los otros inversores. Se puede observar también como el inversor ABB está un poco por encima del resto de los inversores, pero sin ser muy elevada dicha diferencia.

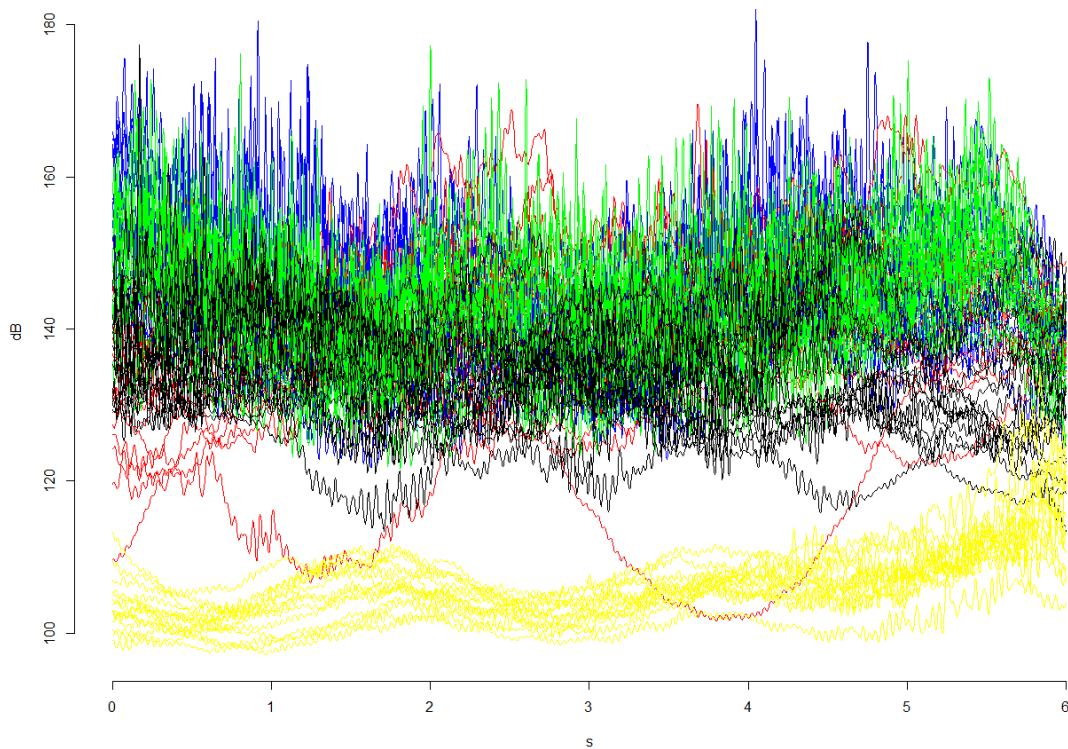


Figura 5.3 R5NC1LSH: Motor dañado, con nivel de carga bajo y su banda inferior usando el color rojo para el inversor Allen Bradley, el azul para el ABB, el verde para el Siemens, el negro para el Télémécanique y el amarillo para el WEG.

Concluyendo esta sección de comparación de inversores, cabe destacar el claro comportamiento diferenciado del inversor WEG respecto a los otros inversores. Esto puede acarrear algún problema en las siguientes comparaciones, ya que existe una gran diferencia.

5.1.2 Comparación del estado del motor

Esta sección es la que trata el objetivo principal de este trabajo. Para la ilustración algo más detallada de las técnicas de datos funcionales utilizadas nos centraremos en este caso particular de comparaciones del estado de los motores.

Como en todas las gráficas, es necesario diferenciar lo que se compara con colores:

- **Motor sano (R1):** Color Verde.
- **Motor con la barra del rotor rota (R5):** Color Rojo.

Vamos a mostrar, como ejemplo, algunas gráficas con diferencias niveles de carga, diferentes armónicos e inversores. Todas las posibles combinaciones de niveles en estas variables pueden ser consultadas en el Anexo A.

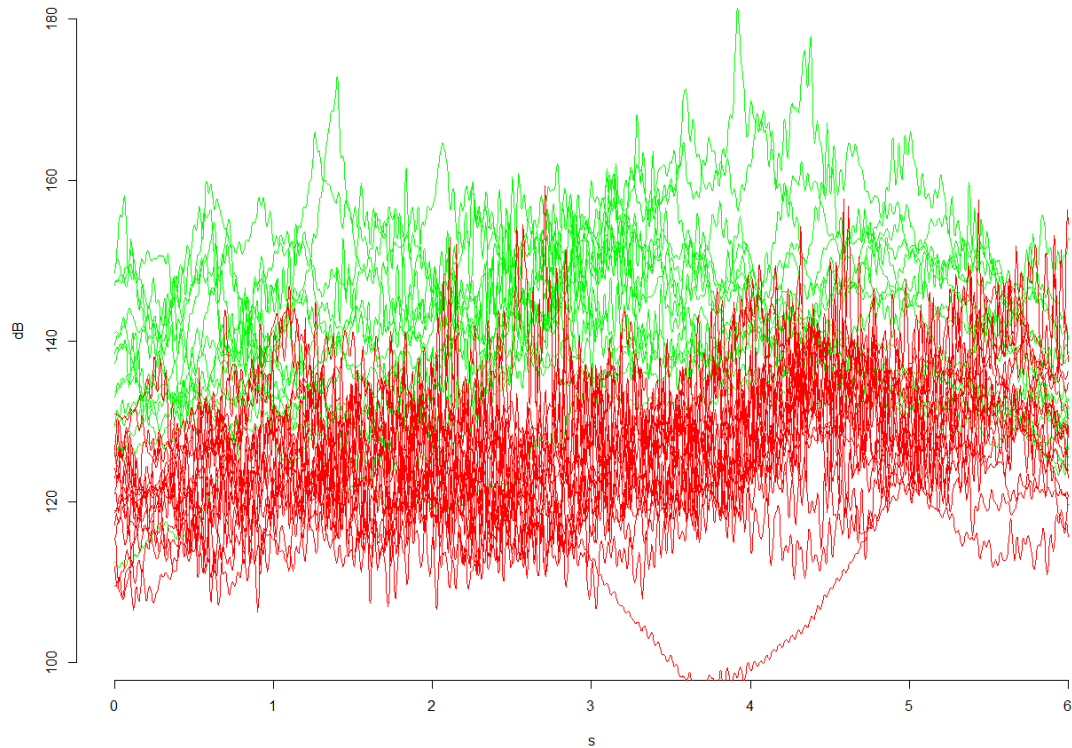


Figura 5.4 ABNC1USH: Inversor Allen Bradley, con nivel de carga bajo y su banda superior usando el color rojo para el motor dañado y verde para el sano.

La primera gráfica muestra el inversor Allen Bradley, con un nivel de carga bajo y la banda superior. Se pueden apreciar diferencias significativas, ya que apenas hay superposición del motor sano y dañado. El motor sano tiene una menor altura de picos en los armónicos respecto a los dañados, por eso se encuentra en la parte superior de la gráfica.

Podemos sacar la conclusión de que o bien el inversor, el nivel de carga bajo o la banda superior favorece esta diferenciación. Como ya explicamos en la sección anterior, los inversores trabajan prácticamente igual salvo el WEG, por lo que nos quedan dos posibles factores de influencia.

Continuamos con el estudio, para observar si ambos, alguno o ninguno de los factores tiene influencia en el estudio. La siguiente gráfica contiene al inversor ABB, nivel de carga bajo y la banda inferior.

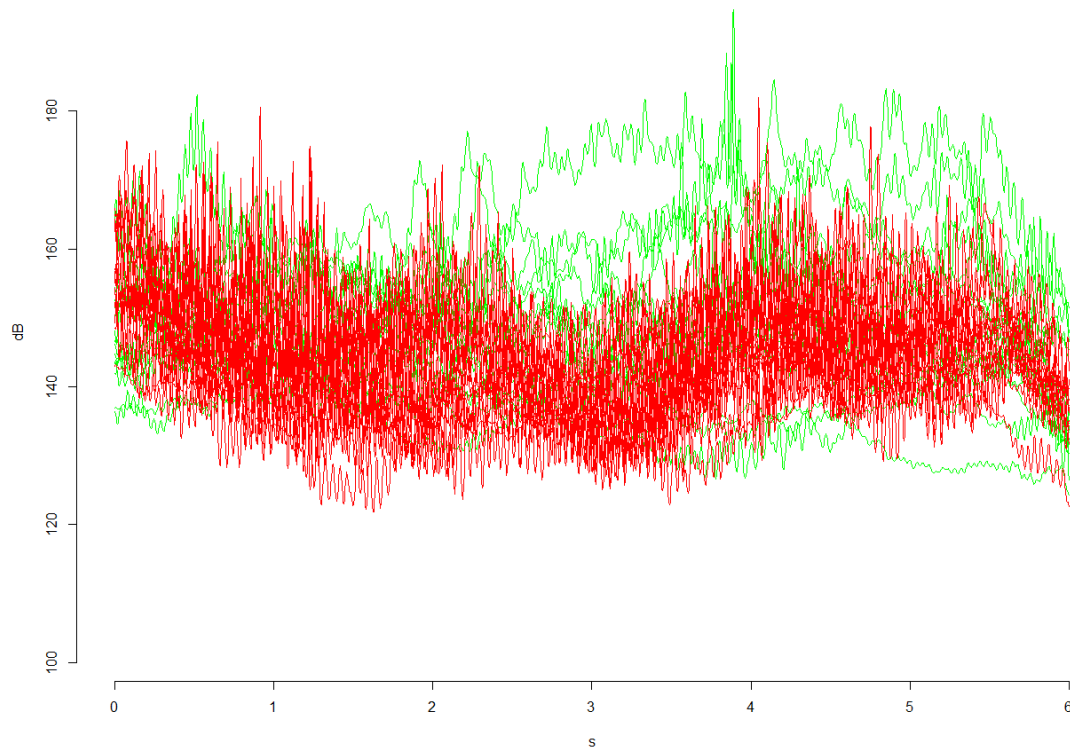


Figura 5.5 *ABBNC1LSH: Inversor ABB, con nivel de carga bajo y su banda inferior usando el color rojo para el motor dañado y verde para el sano.*

En esta gráfica se mantiene el mismo nivel de carga y cambiamos la banda. También cambiamos de inversor simplemente para enseñar gráficas de los diferentes inversores con los que se ha realizado la experimentación. En la gráfica se puede observar que apenas hay diferencias, en la parte de la izquierda hay superposición y en la de la derecha vemos como el motor sano aparece ligeramente por arriba y por debajo del motor dañado por lo que concluimos que no hay diferenciación.

Como solo hemos cambiado la banda, esto nos hace indicar que el nivel de carga no influye en la salud del motor ya que manteniendo el mismo nivel de carga, en este caso no se aprecia diferenciación. Esto nos hace pensar que dependiendo de qué banda se utilice, pueden existir diferencias o no. Con la USH sí que hemos apreciado diferencias, mientras que con la LSH no.

Como con el USH sí hemos apreciado diferencias, vamos a ilustrar una gráfica con esta banda. También cambiamos al nivel de carga alto por si fuera éste el que es de influencia y escogemos otro inversor.

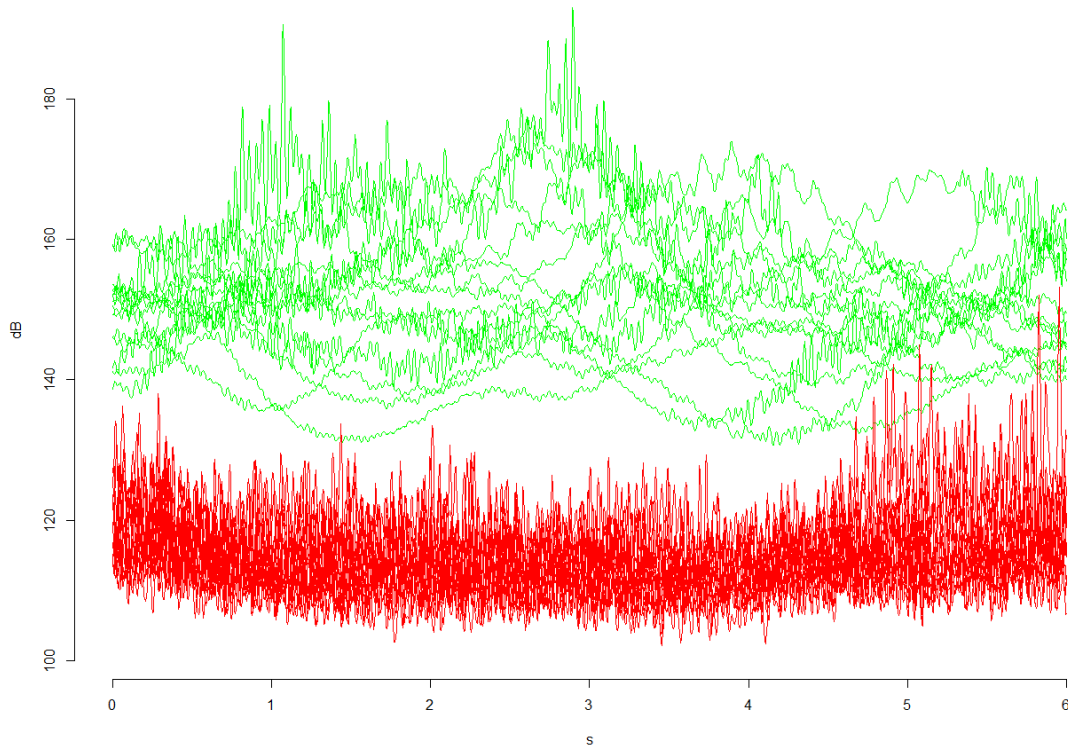


Figura 5.6 SIENC2USH: Inversor Siemens, con nivel de carga alto y su banda superior usando el color rojo para el motor dañado y verde para el sano.

Observamos como claramente hay diferencias entre el estado del motor. El sano se encuentra en un intervalo de diferencia de picos comprendido entre 140 y 180 dB, mientras que el de la barra rota está situado entre 100 y 130 dB, apenas hay contacto entre ambas funciones salvo, ligeramente, en la parte final.

Las conclusiones que hemos ido obteniendo apuntan en una misma dirección. Cuando estudiamos la banda superior, vemos como se aprecian diferencias. Por otro lado, con la banda inferior hay superposición y no podemos diferenciar entre motores sanos y dañados.

En principio, el nivel de carga no influye como hemos comentado con anterioridad. Como solo hemos utilizado una vez el nivel de carga alto, lo usaremos otra vez para ver si puede ser de influencia. La siguiente gráfica está compuesta por el inversor Télémécanique, con un nivel de carga alto y la banda inferior.

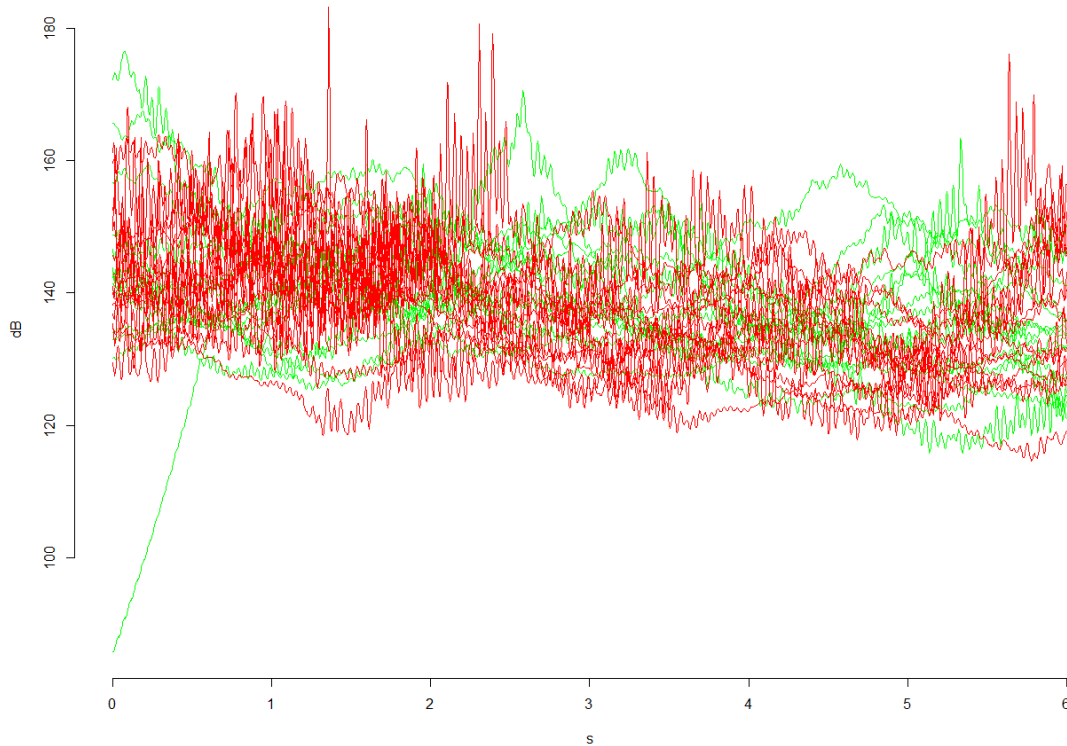


Figura 5.7 *TMNC2LSH: Inversor Télémécanique, con nivel de carga alto y su banda inferior usando el color rojo para el motor dañado y verde para el sano.*

El resultado de la gráfica es el esperado con lo comentado anteriormente. No se aprecian diferencias debido a que existe superposición a lo largo de toda la gráfica. Una primera conclusión podría ser que el nivel de carga no influye en el estado del motor. Además, cuando utilizamos el LSH no existen tampoco diferencias, por lo que la elección de las diferentes bandas puede ser significativa a la hora de apreciar diferencias en el estado de los motores. En las siguientes secciones intentaremos confirmar estas conclusiones.

Como se puede observar, no hemos puesto ninguna gráfica del inversor WEG, eso se debe a que es muy diferente a los otros cuatro inversores y no seguía el patrón que hemos comentado en el párrafo anterior. De todos modos, en el Anexo A se pueden observar sus gráficas.

5.1.3 Comparación de los niveles de carga

Partiendo de las conclusiones anteriormente obtenidas, en esta sección nos vamos a dedicar a comprobar si corroboran que el nivel de carga no influye en la determinación del estado del motor. Como en las secciones anteriores, es necesario hacer diferenciación de niveles de carga con colores:

- **Nivel de carga bajo (NC1)**: Color Azul.
- **Nivel de carga alto (NC2)**: Color Naranja.

En primer lugar visualizaremos la gráfica correspondiente al inversor Allen Bradley, con el motor sano y la banda inferior.

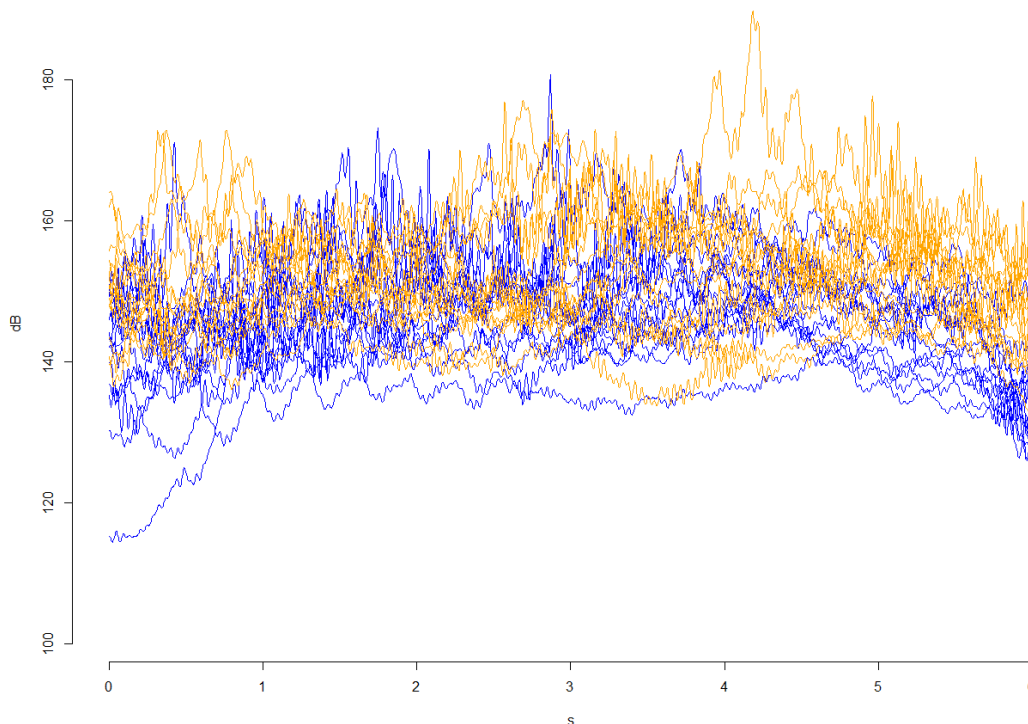


Figura 5.8 ABR1LSH: Inversor Allen Bradley, con motor sano y su banda inferior usando el color azul para el nivel de carga bajo y naranja para el alto.

No apreciamos diferencia entre los niveles de carga, por lo que de momento los resultados coinciden con la sección anterior.

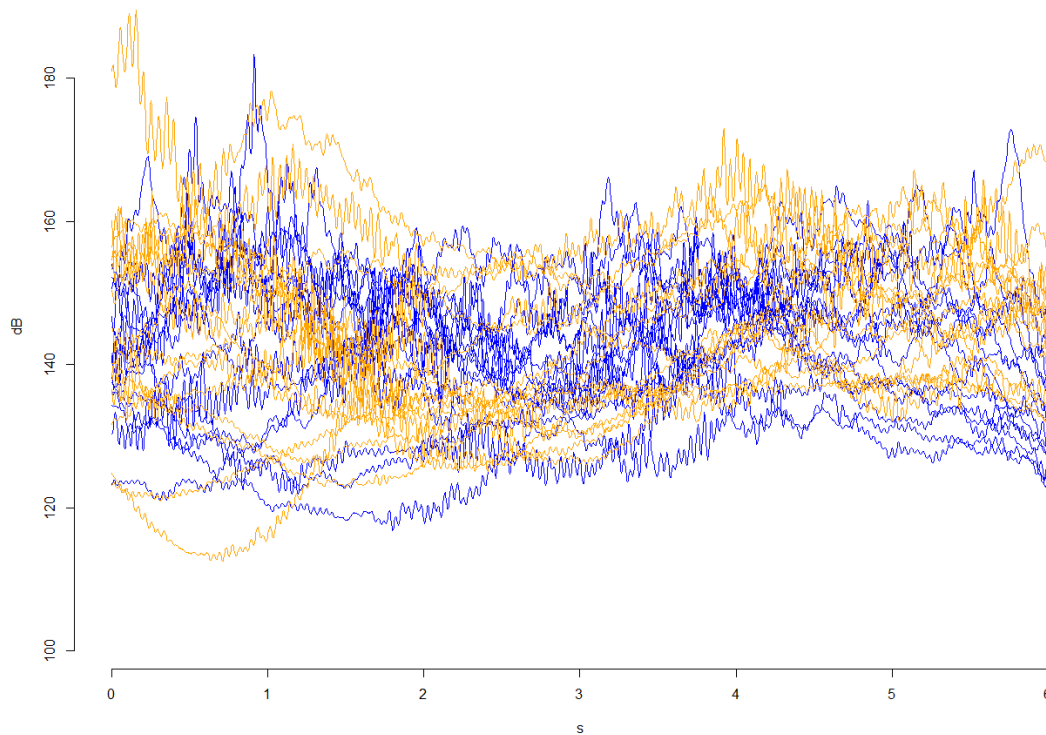


Figura 5.9 ABBR1USH: Inversor ABB, con motor sano y su banda superior usando el color azul para el nivel de carga bajo y naranja para el alto.

En la anterior gráfica cambiamos como siempre de inversor y también de banda, manteniendo el mismo estado del motor. Tampoco se aprecian diferencias entre los niveles de carga.

Para acabar, vamos a observar la última gráfica de esta sección con el motor dañado para ver si en ese caso puede influir el nivel de carga.

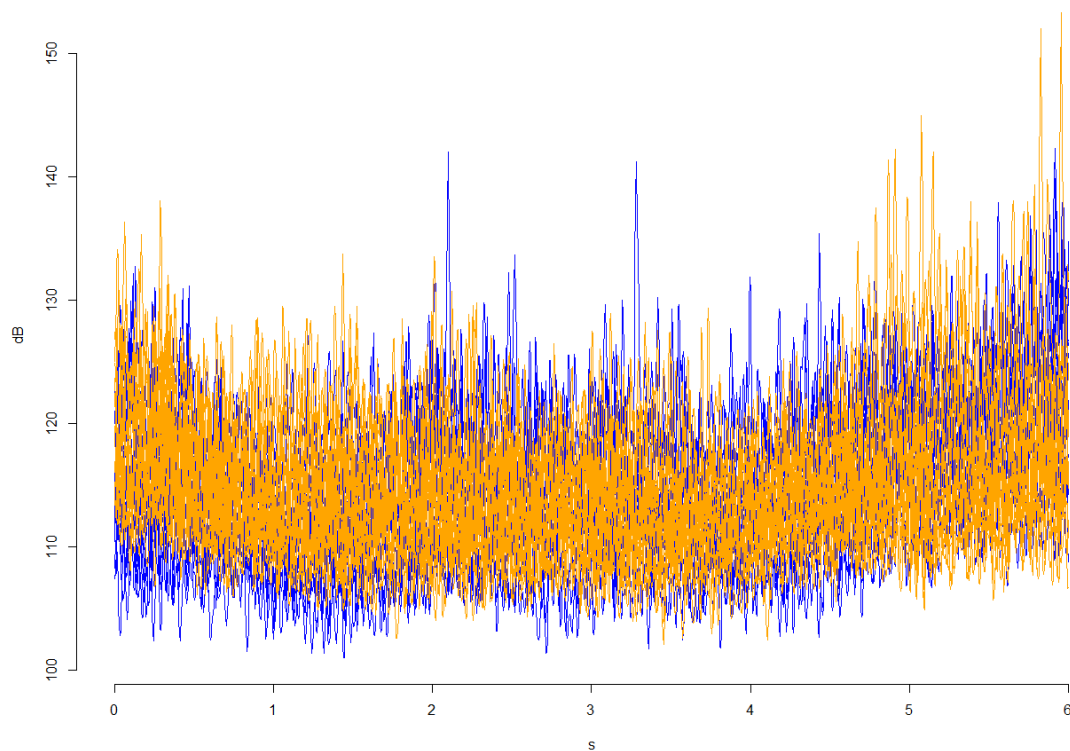


Figura 5.10 *SIER5USH: Inversor Siemens, con motor dañado y su banda superior usando el color azul para el nivel de carga bajo y naranja para el alto.*

En este caso con el inversor Siemens tampoco se aprecian diferencias, de hecho se superpone una función a la otra durante todo el periodo. Concluimos con que el nivel de carga no influye en el estado del motor.

5.1.4 Comparación de los armónicos

Al contrario que el nivel de carga, los diferentes armónicos sí que tenían influencia en el estado del motor según los resultados obtenidos. En esta sección vamos a estudiar cuando existen mayores diferencias, si cuando el motor está sano o cuando está dañado. Diferenciamos las diferentes bandas en colores:

- **Banda superior (USH)**: Color Azul.
- **Banda inferior (LSH)**: Color Rojo.

La primera gráfica que vamos a observar es la del inversor Allen Bradley, con el motor sano y un nivel de carga bajo.

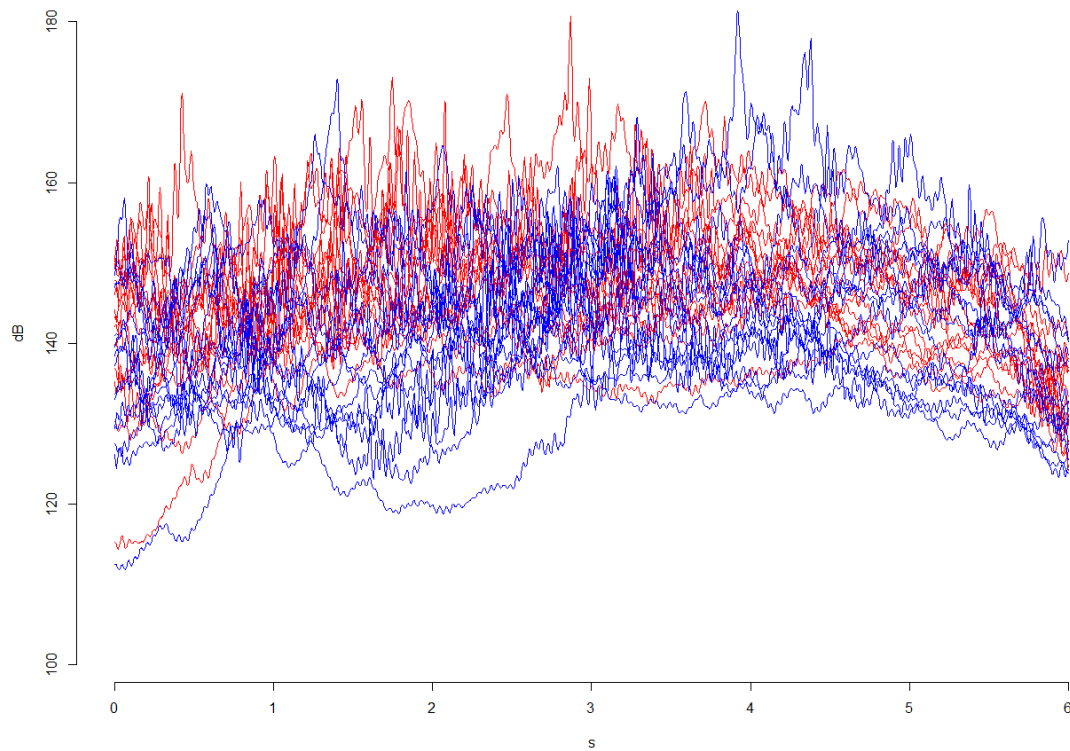


Figura 5.11 ABR1NC1: Inversor Allen Bradley, con motor sano y nivel de carga bajo usando el color azul para la banda superior y rojo para la inferior.

En la gráfica no se pueden apreciar diferencias entre las diferentes bandas. Esto se puede deber simplemente a que cuando el motor está sano, es indiferente la banda que se utilice.

La siguiente gráfica corresponde a la de un inversor ABB, con el motor dañado y un nivel de carga bajo.

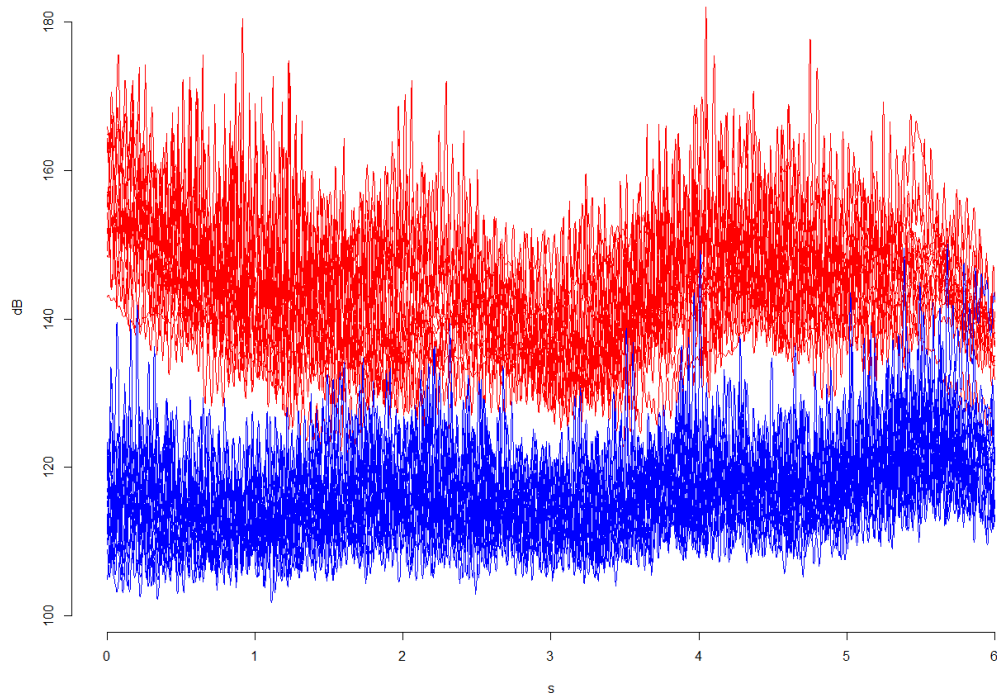


Figura 5.12 ABBR5NC1: Inversor ABB, con motor dañado y nivel de carga bajo usando el color azul para la banda superior y rojo para la inferior.

Como hemos comentado, con el motor dañado si existen diferencias entre las diferentes bandas. Vamos a comprobarlo para un nivel de carga alto.

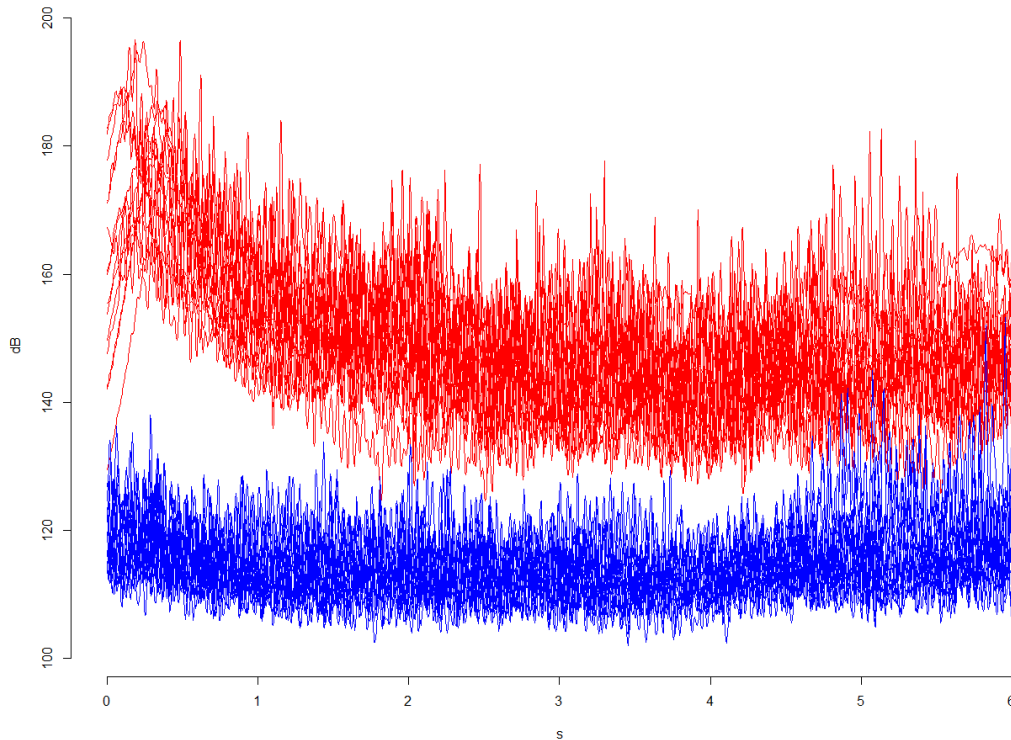


Figura 5.13 *SIER5NC2: Inversor Siemens, con motor dañado y nivel de carga alto usando el color azul para la banda superior y rojo para la inferior.*

Confirmamos que el nivel de carga no tiene influencia y que cuando existe rotura de barra se pueden apreciar diferencias entre las distintas bandas.

5.2 Boxplots funcionales

Una vez realizado el estudio descriptivo, pasamos a realizar el estudio con una de las dos técnicas de datos funcionales utilizadas en este proyecto, los boxplots funcionales. El estudio descriptivo anteriormente realizado nos ha servido para obtener una ligera idea de donde pueden existir las diferencias. Con esta técnica descriptiva vamos a poder comprobar más claramente si dicha idea es correcta o por lo contrario, estábamos equivocados. Nótese que la superposición de líneas al representar estas curvas puede hacernos complicado detectar diferencias más sutiles.

En esta sección nos vamos a centrar exclusivamente en la comparación del estado del motor, que es el objetivo principal de este trabajo. La denominación de las gráficas es exactamente igual a la anterior sección, utilizando las siglas descritas.

Vamos a observar una gráfica para explicar en qué consisten.

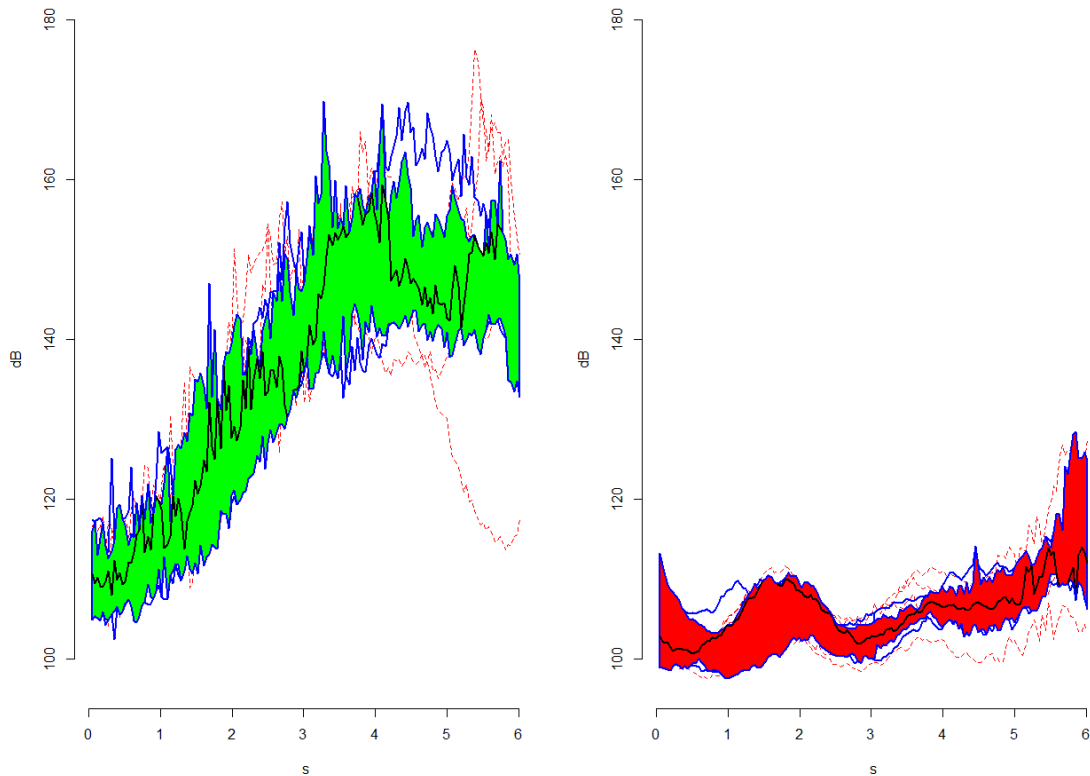


Figura 5.14 Boxplot funcional de WEGNC1LSH: Inversor WEG, con nivel de carga bajo y su banda inferior; usando el color verde para el motor sano situado a la izquierda y rojo para el dañado situado a la derecha.

Esta imagen corresponde al boxplot funcional utilizando un inversor de la marca WEG, un nivel de carga bajo y la banda inferior. Al igual que en la anterior sección, el eje de ordenadas y el de abscisas representan lo mismo. Recordamos que el de ordenadas nos muestra la densidad de energía de las curvas medida en decibelios y el de abscisas el tiempo medido en segundos. Para que no estemos mezclando colores, hemos empleado los mismos que en la sección anterior, color verde para el motor sano y color rojo para el motor dañado.

En las gráficas podremos observar una región coloreada (verde o roja) dependiendo del estado del motor. Dicha región, denominada región central, representa el 50% de los datos más profundos y es el análogo al intervalo intercuartílico de un boxplot clásico. Las curvas de color azul representan el borde de la región central y se define como la envoltura que representa la caja en un boxplot clásico. Se puede observar también varias curvas discontinuas de color rojo. Dichas curvas representan los candidatos a outliers. Por último, vemos una curva de color negro, esta curva es la mediana que representa la curva más profunda (central) de todos los datos.

A continuación vamos a ilustrar una serie de gráficas para ver si llegamos a las mismas conclusiones que en la sección anterior. Sólo mostraremos las gráficas más relevantes, el resto de gráficas se pueden visualizar en el Anexo A.

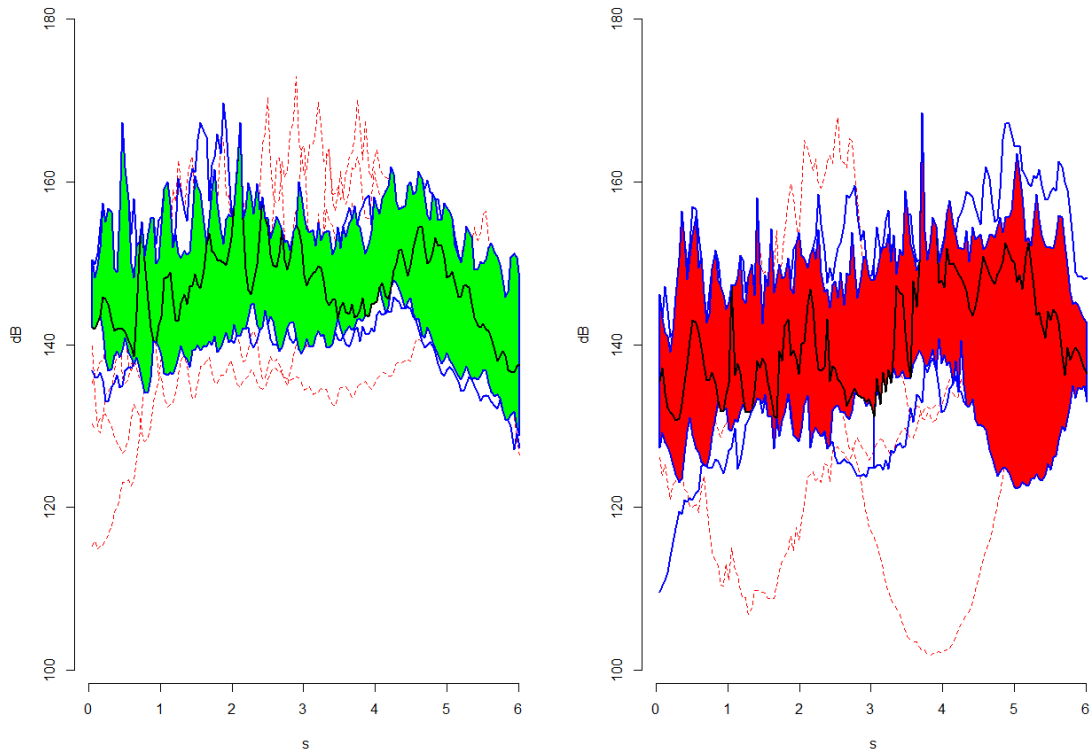


Figura 5.15 *Boxplot funcional de ABNC1LSH: Inversor Allen Bradley, con nivel de carga bajo y su banda inferior; usando el color verde para el motor sano situado a la izquierda y rojo para el dañado situado a la derecha.*

En la anterior imagen se puede ver el boxplot correspondiente al de un inversor Allen Bradley, con un nivel de carga bajo y la banda inferior. Se puede observar como existen unas ligeras diferencias entre la gráfica de la izquierda (motor sano) y la de la derecha (motor dañado).

El boxplot funcional izquierdo está comprendido entre los 135 y 160 dB mientras que el de la derecha está entre los 125 y 155 dB. Estas diferencias son mínimas, por lo que consideramos que no hay ninguna influencia por el nivel de carga bajo ni por la banda inferior.

A continuación cambiamos el nivel de carga, manteniendo la banda inferior. Como esta banda no tiene influencia, en el caso de que existieran diferencias entre los boxplots funcionales, podríamos afirmar que el nivel de carga alto tiene cierto grado de influencia. Por otra parte, si no se aprecian diferencias, confirmaremos que los niveles de carga no son un factor influyente en el estado del motor.

En la Figura 5.16 se compara dos boxplots funcionales que corresponden con los de un inversor ABB, un nivel de carga alto y la banda inferior.

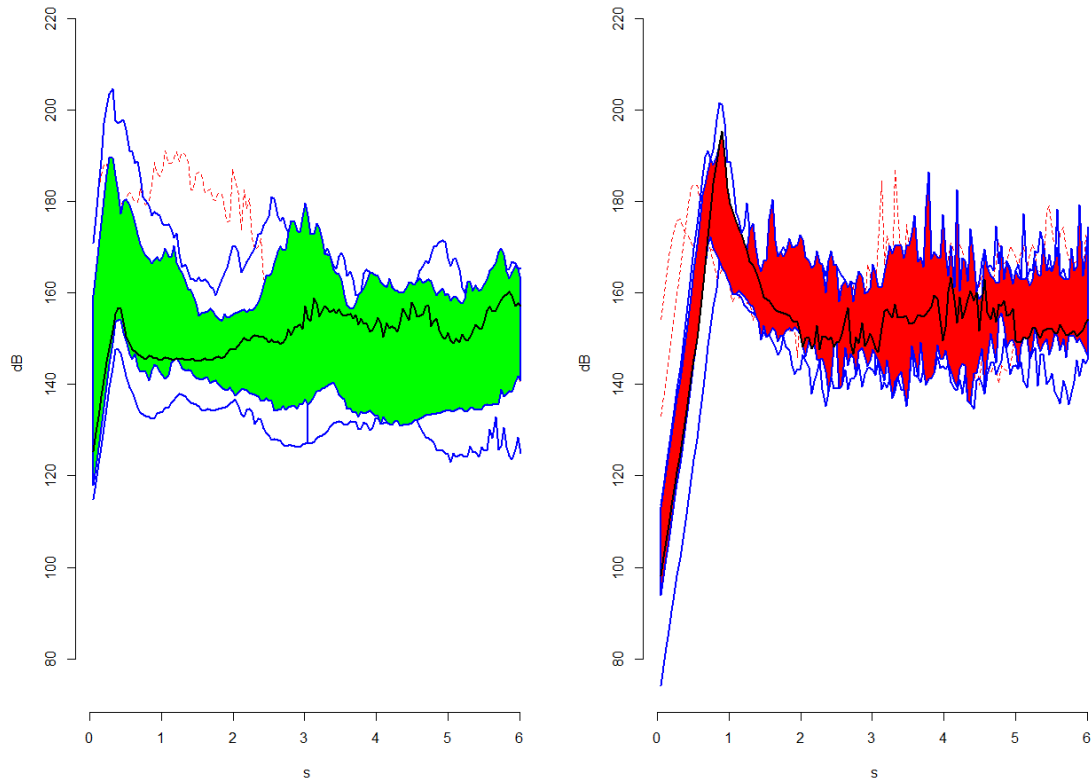


Figura 5.16 *Boxplot funcional de ABBNC2LSH: Inversor ABB, con nivel de carga alto y su banda inferior; usando el color verde para el motor sano situado a la izquierda y rojo para el dañado situado a la derecha.*

No se aprecian diferencias, ambos boxplots son muy semejantes por lo que podemos confirmar que los niveles de carga no tienen influencia.

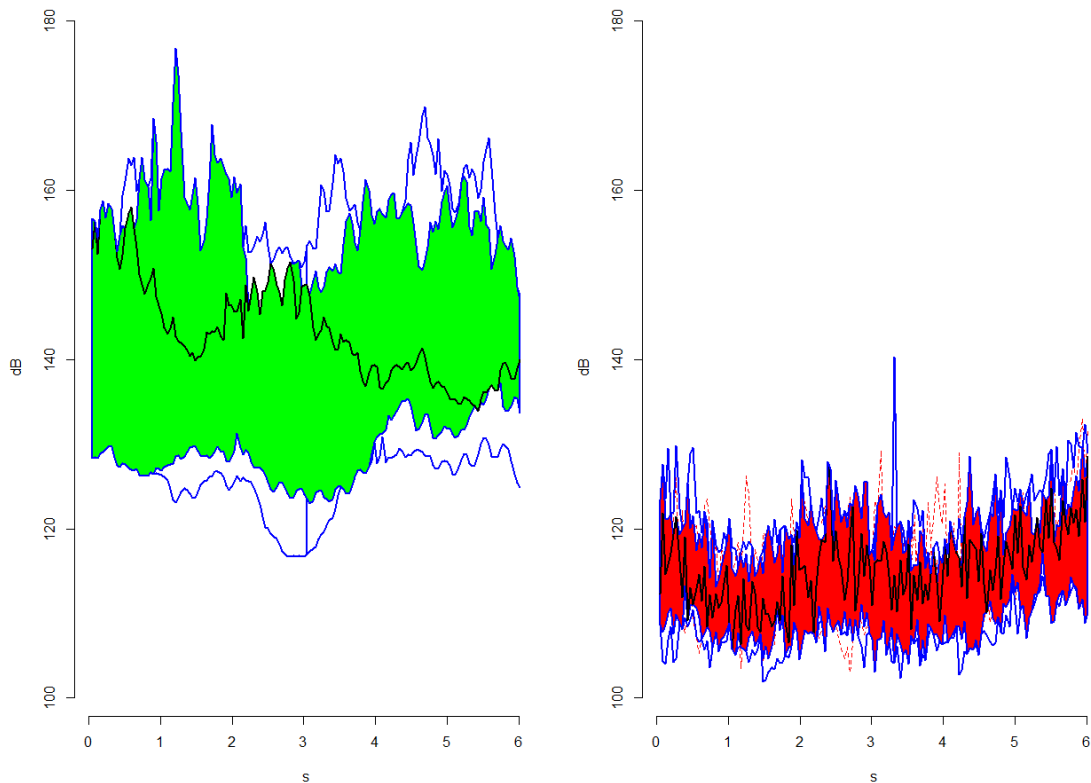


Figura 5.17 *Boxplot funcional de SIENC1USH: Inversor Siemens, con nivel de carga bajo y su banda superior; usando el color verde para el motor sano situado a la izquierda y rojo para el dañado situado a la derecha.*

La anterior Figura representa el boxplot funcional correspondiente a un inversor Siemens, con el nivel de carga bajo y la banda superior. En este caso, hemos cambiado la banda para estudiar si dicho cambio puede influir en el estado del motor. En la imagen se puede apreciar fácilmente las diferencias. El boxplot funcional del motor sano tiene unos valores comprendidos entre los 130 y 160 dB mientras que el motor enfermo está entre 105 y 125 dB. Esto denota una clara diferenciación entre ambos boxplots. Como el nivel de carga no tenía influencia en el estado del motor, lo que hace que existan diferencias es la banda superior.

Para comprobar lo anteriormente explicado vamos a ilustrar una última gráfica con la banda superior y con un nivel de carga alto. Si las conclusiones anteriores fueran ciertas, debería haber diferencias entre ambos boxplots ya que estamos estudiando el USH, independientemente del nivel de carga empleado.

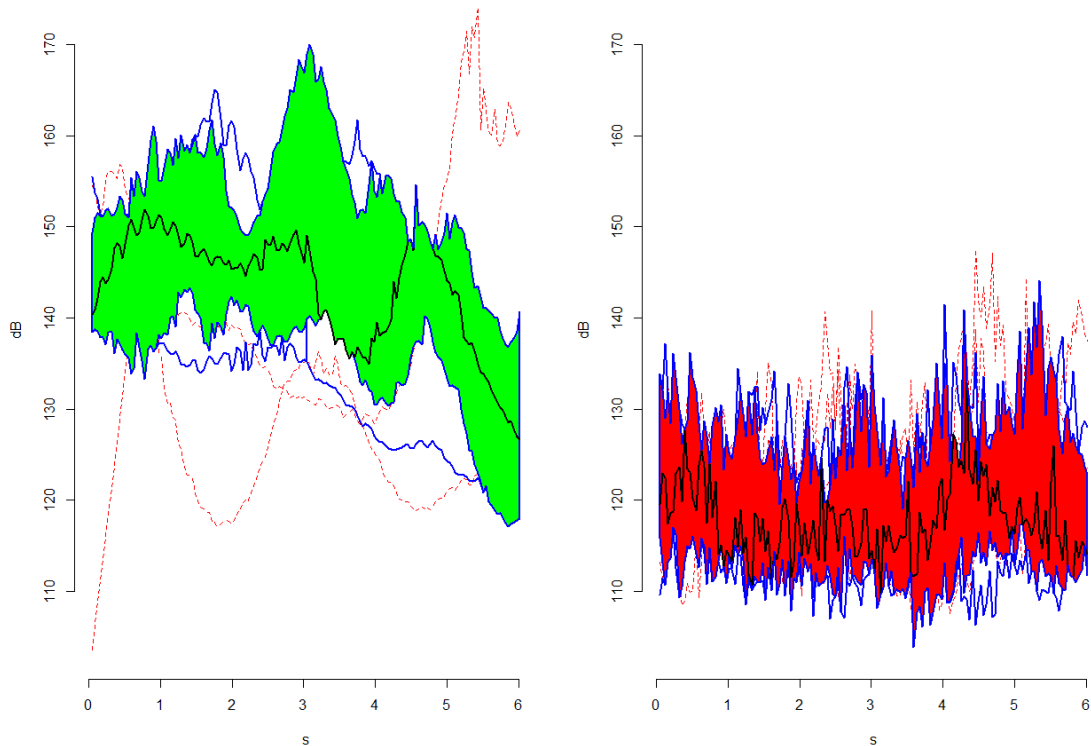


Figura 5.18 Boxplot funcional de TMNC2USH: Inversor Télémécanique, con nivel de carga alto y su banda superior; usando el color verde para el motor sano situado a la izquierda y rojo para el dañado situado a la derecha.

Como bien habíamos intuido, existe una clara diferenciación entre ambos boxplots. Finalizando esta sección, llegamos a las mismas conclusiones que en el estudio descriptivo, y es que cuando se estudia el USH, las funciones correspondientes al motor sano y dañado tienen unas evidentes diferencias.

5.3 ANOVA funcional

Una vez finalizado el estudio de los boxplots funcionales, pasamos a realizar el estudio con la técnica restante de datos funcionales utilizada en este proyecto, el ANOVA funcional. El estudio de los boxplots funcionales nos reforzó la idea que obtuvimos en los simples gráficos de curvas acerca de las diferencias entre el estado de los motores. Nuestra idea en esta sección es ver si se pueden detectar diferencias estadísticamente significativas entre medias mediante un procedimiento inferencial que nos proporcionará p-valores obtenidos por remuestreo “bootstrap”. Al igual que en la sección anterior se han realizado 20 contrastes, aunque en esta sección sólo ilustraremos las más significativas. Las gráficas restantes se podrán observar en el Anexo A.

Vamos a mostrar una gráfica para explicar que se representa en estos gráficos.

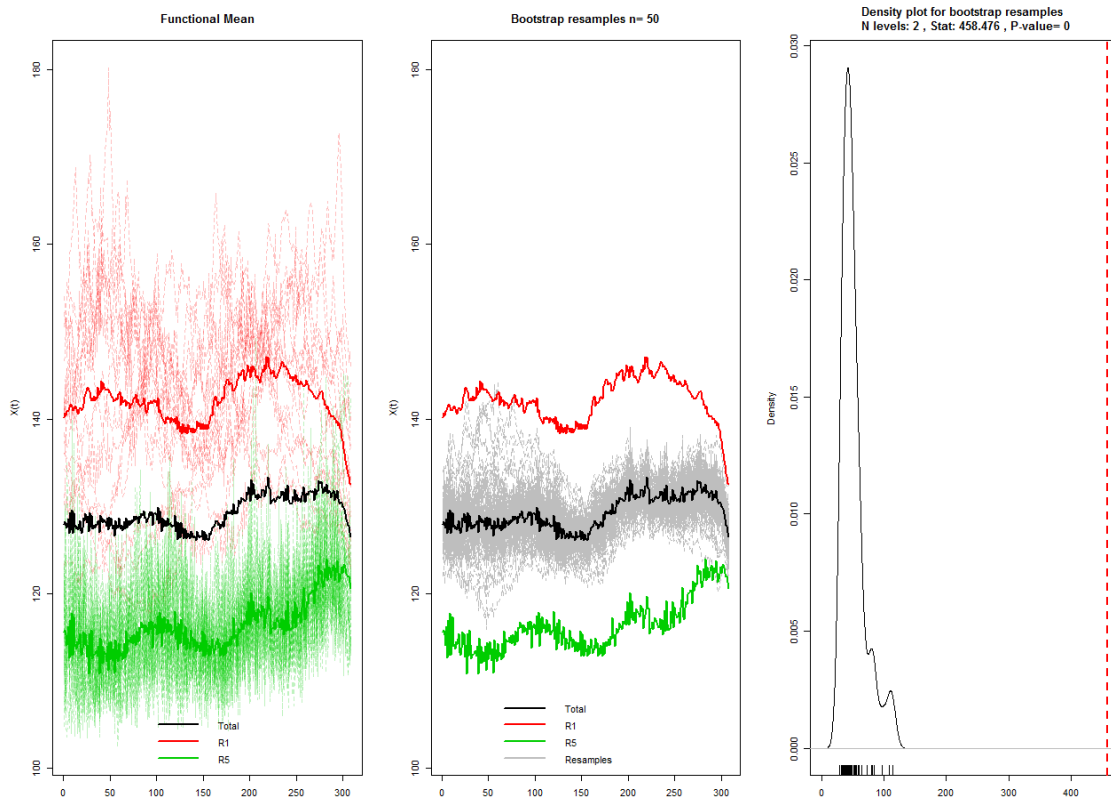


Figura 5.19 ANOVA funcional de ABBNC1USH: Inversor ABB, con nivel de carga bajo y su banda superior; usando el color verde para el motor dañado, rojo para el sano, gris para la simulación de una muestra bootstrap y negro para la media total.

En la librería R utilizada, el color rojo representa al motor sano y el color verde al motor enfermo, al contrario de lo que veníamos haciendo habitualmente. En los dos primeros gráficos, el eje de ordenadas es el mismo que en las secciones anteriores y representa la energía que tiene cada curva. También, es importante notar el eje de abscisas no representa el tiempo tal cual se realizó en las secciones anteriores y simplemente representa el orden en el que aparecen los datos. Como al realizar esta función en el programa R tardaba un tiempo excesivo (el método utilizado puede ser catalogado como un método de Computación Intensiva en Estadística), decidimos coger los datos de cinco en cinco para acelerar el proceso. Debido a esto, el eje de abscisas está comprendido entre 0 y 300 en lugar de 0 y 1500.

Como acabamos de comentar, este eje no representa exactamente el tiempo. Cabe recordar que en nuestro experimento el tiempo total de la señal capturada era de 30 segundos, pero sólo se toman 6 de esos segundos del estado transitorio. Como la frecuencia de la señal es de 256 Hz, al multiplicarlo por el tiempo se obtendrán un total de 1536 puntos que es lo que se representaría en este eje si se hubieran tomado todos los datos en lugar de tomarlos de cinco en cinco.

El gráfico situado más a la izquierda es igual que el realizado en el estudio descriptivo salvo que se añade tres curvas que representan las curvas medias para cada estado del motor (verde y roja) y la curva media global (negra).

El gráfico central solo se queda con las curvas medias anteriormente mencionadas y añade una serie de curvas de color gris que representa la zona donde se deberían encontrar las curvas rojas y verdes si no existieran diferencia de medias entre ellas y si la variabilidad observada fuera exclusivamente debida al azar. Como se puede observar, en la Figura 5.19 ninguna de estas dos curvas se encuentran ni si quiera cerca de las curvas de color gris, por lo que nos está contando es que si existen diferencias significativas entre las medias.

El gráfico de la derecha nos representa estadísticamente si dicha diferencia es significativa o no. Si el p-valor mostrado queda pequeño (<0.05 o <0.01) podemos afirmar que existen diferencias significativas de las medias de estos grupos. En este caso podemos observar como el estadístico observado queda muy lejos de los valores que hubiéramos obtenido si no hubiera diferencias de medias. En este caso, como el p-valor es aproximadamente 0, se puede afirmar estadísticamente que existen diferencias entre las medias.

A continuación vamos a observar algunas gráficas más para ver si existen diferencias entre las medias.

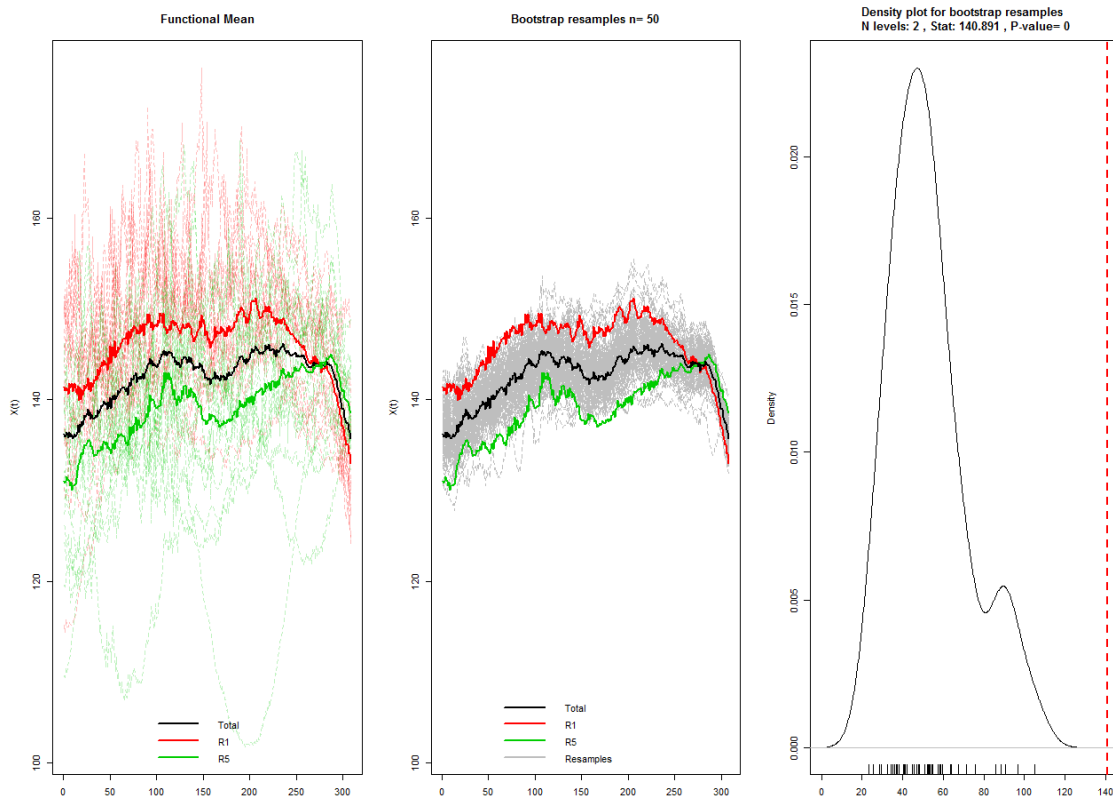


Figura 5.20 ANOVA funcional de ABNC1LSH: Inversor Allen Bradley, con nivel de carga bajo y su banda inferior; usando el color verde para el motor dañado, rojo para el sano, gris para la simulación de una muestra bootstrap y negro para la media total.

En la Figura 5.20 se puede observar como las curvas medias de color rojo y verde ya se encuentran cerca de las curvas de color gris. Como explicamos anteriormente, esto significa que la diferencia entre medias disminuye, como se puede apreciar en la estimación de las densidades de la distribución del estadístico bajo la hipótesis nula de no existencia de diferencias significativas en medias. A pesar de esto, no están lo suficientemente juntas y observando que el p-valor es cercano a 0, podemos afirmar que en este gráfico también existen estadísticamente diferencias significativas entre las medias.

Por último, en el siguiente gráfico ya sí que se puede observar como las curvas de las medias, tanto del estado del motor como la global, se encuentran muy próximas. Vemos también como el valor observado del estadístico es bastante “compatible” con los observados en la estimación de las densidades de la distribución del estadístico bajo la hipótesis de igualdad de medias. Así, en este caso, el p-valor es de 0.22, por lo que estadísticamente no podemos afirmar que existan diferencias significativas entre las medias.

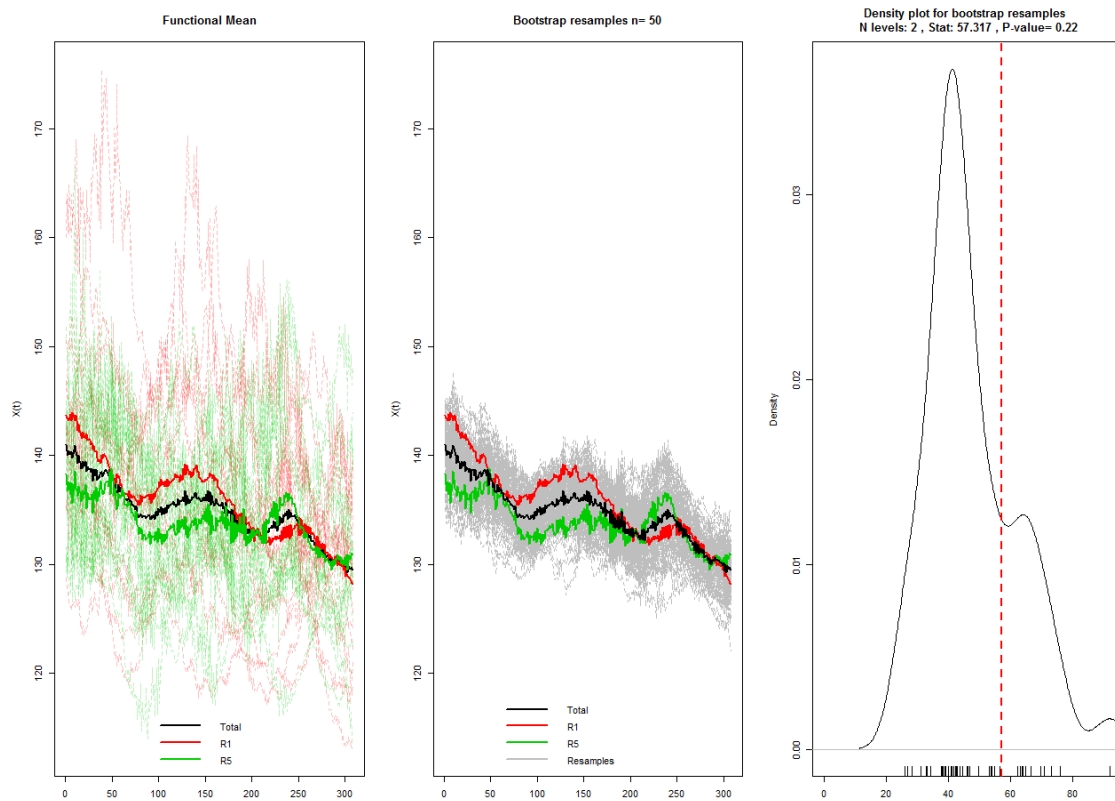


Figura 5.21 ANOVA funcional de TMNC1LSH: Inversor Télémécanique, con nivel de carga bajo y su banda superior; usando el color verde para el motor dañado, rojo para el sano, gris para la simulación de una muestra bootstrap y negro para la media total.

Entre todos los gráficos obtenidos, solo hay dos en los que no se puede afirmar estadísticamente que existan diferencias entre las medias, por lo que, en general podemos afirmar que existen diferencias significativas entre las medias.

Capítulo 6

Conclusiones

En este trabajo se ha realizado un estudio preliminar encaminado a analizar si es posible la detección de fallos en el rotor de un motor eléctrico en estado transitorio. En este estudio, el uso de técnicas de Análisis de Datos Funcionales ha tenido gran importancia ya que en el estado transitorio las características en el espectro, al no estar en estado estacionario, cambian con el tiempo.

En particular, el tipo de fallo en que se ha centrado el estudio ha sido concretamente el de rotura de barras. Dichas características detectadas en el espectro pueden servir en el futuro para establecer una metodología de detección temprana de dichas roturas de barras.

En este trabajo se han usado dos técnicas de datos funcionales que son el boxplot funcional y el ANOVA funcional. Antes de explicar y aplicar dichas las técnicas de datos funcionales, se ha realizado un análisis descriptivo del cual se extraían conclusiones que apuntaban hacia el interés de considerar esas características como monitorización del motor. El objetivo de este proyecto era el de comparar motores sanos y dañados y extraer conclusiones, pero como había otros factores de interés (inversores, niveles de carga y bandas), también han sido estudiados. Cuando se comparan las alturas de los picos en las bandas superiores (USH) con las bandas inferiores (LSH) se puede apreciar que existen diferencias más claras entre dichas alturas cuando el motor está dañado. Así, el estudio de si un motor está dañado o sano a través de la comparación de sus bandas podría suponer una posible línea de investigación futura.

Después del análisis descriptivo, la primera técnica de Análisis de Datos Funcionales utilizada fueron los boxplot funcionales. Gracias a esta técnica hemos podido hallar distintos patrones que pueden ser útiles en la detección de fallos en los motores de forma más cómoda que la simple representación de las curvas con el consiguiente solapamiento. En nuestro caso, la rotura de la barra es completa, por eso existen grandes diferencias en las gráficas. Para poder prevenir la rotura completa, sería necesario realizar estas comparaciones de forma secuencial y observar si se pueden ir gradualmente observando ligeras diferencias y actuar lo más rápidamente posible, para prevenir el fallo total, en caso de que dichas diferencias sean detectadas. Estas diferencias suelen venir dadas por un incremento en la altura de picos en USH para motores dañados mientras que en LSH éste incremento no está tan perfectamente marcado. Una posible línea de investigación futura podría ser averiguar por qué se aprecian diferencias en los motores dañados con la banda USH y no con la banda LSH.

La segunda técnica es la de ANOVA funcional. Con ella, llegamos a la conclusión de que en la mayoría de gráficas obtenidas existían diferencias estadísticamente significativas entre las medias. El método utilizado usa un procedimiento de remuestreo “bootstrap” adaptado a datos funcionales para contrastar estadísticamente si las curvas promedio de estas alturas son iguales o no. No obstante, habría que ver si estas diferencias son lo suficientemente grandes como para que nos permitan “discriminar” entre motores

sanos y dañados con unas tasas de clasificación lo suficientemente altas. Esto debe ser el objetivo de futuras investigaciones. Esta investigación puede ser considerada como un primer avance básico y fundamental en esta dirección.

Para concluir, hemos demostrado que parece posible la identificación temprana de roturas de barras en motores asíncronos en el estado transitorio y que el uso de técnicas para datos funcionales puede ser muy útil en dicha tarea, por lo que sería interesante continuar con este tipo de estudio con el objetivo de ayudar a las empresas a detectar posibles fallos en sus motores.

Anexo A

Resultado de los análisis

En el siguiente Anexo se pueden observar todas las gráficas de los resultados obtenidas en el programa R. A modo de recordatorio, vamos a explicar cómo nombramos a las diferentes gráficas de una forma más breve que en el Capítulo 5:

- **Inversores:** Recordamos que teníamos cinco clases de inversores: Inversor PowerFlex 40 de Allen Bradley (*AB*), Inversor ACS355 de ABB (*ABB*), Inversor Micromaster 420 de Siemens (*SIE*), Inversor Altivar 66 de Télémécanique (*TM*) e Inversor CFW 11 de WEG (*WEG*).
- **Salud del motor:** El motor se puede encontrar en perfectas condiciones (*R1*) o bien puede tener rota una barra del rotor (*R5*).
- **Nivel de carga:** Existen dos posibles niveles de carga, uno bajo (*NC1*) y el otro alto (*NC2*).
- **Armónicos:** En este estudio solo se estudian los dos bandas más cercanas al fundamental que son la banda superior *upper-sideband harmonic (USH)* y la banda inferior *lower-sideband harmonic (LSH)*.

A.1 Análisis descriptivo

En este apartado se visualizarán todas las gráficas correspondientes al análisis descriptivo.

A.1.1 Comparación de inversores

Como bien hemos explicado en el Capítulo 5, se diferencian los inversores con distintos colores tal que así:

- **AB:** Color Rojo.
- **ABB:** Color Azul.
- **SIE:** Color Verde.
- **TM:** Color Negro.
- **WEG:** Color Amarillo.

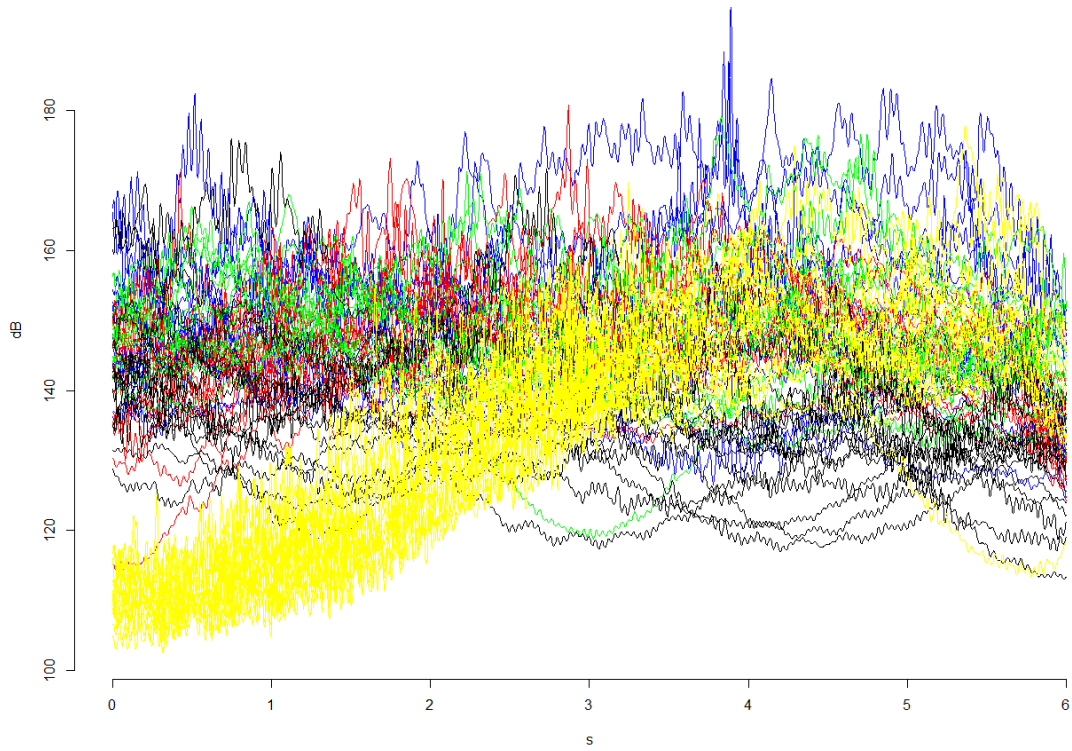


Figura A1 R1NC1LSH.

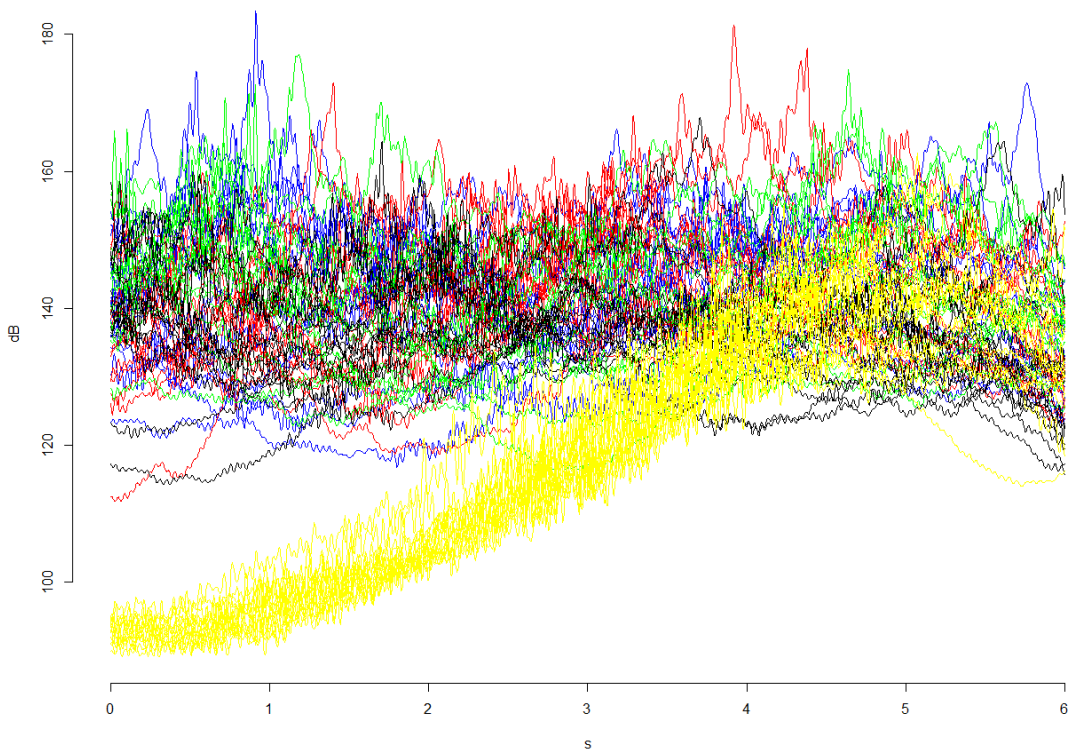


Figura A2 R1NC1USH.

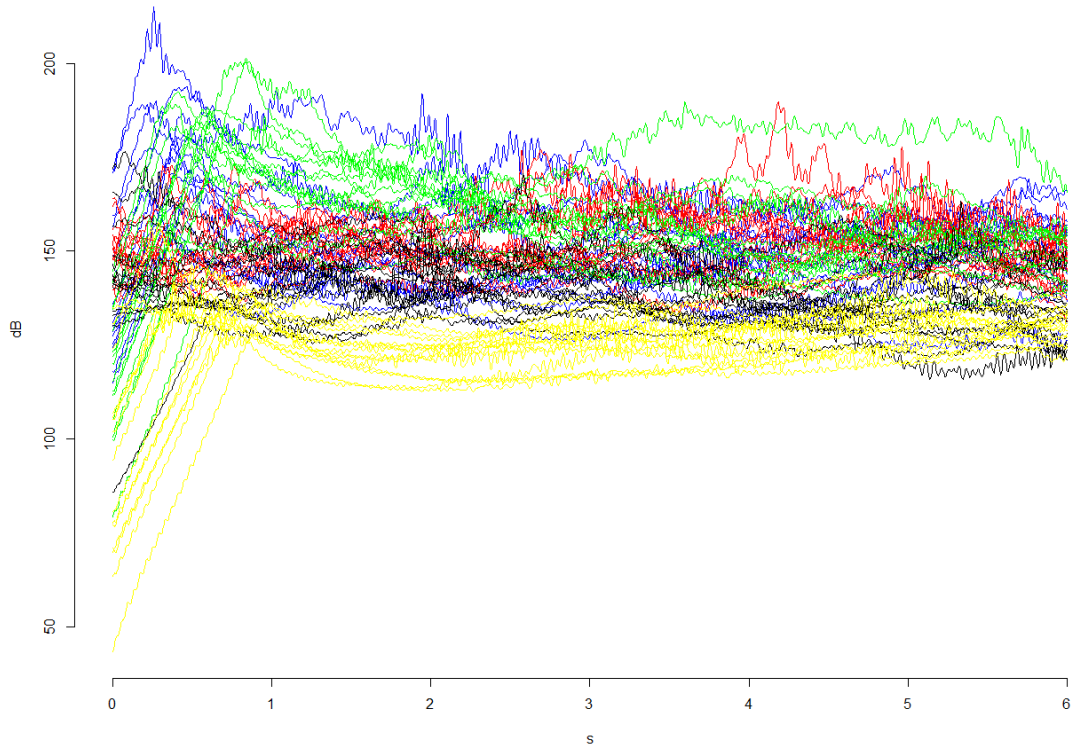


Figura A3 *R1NC2LSH*.

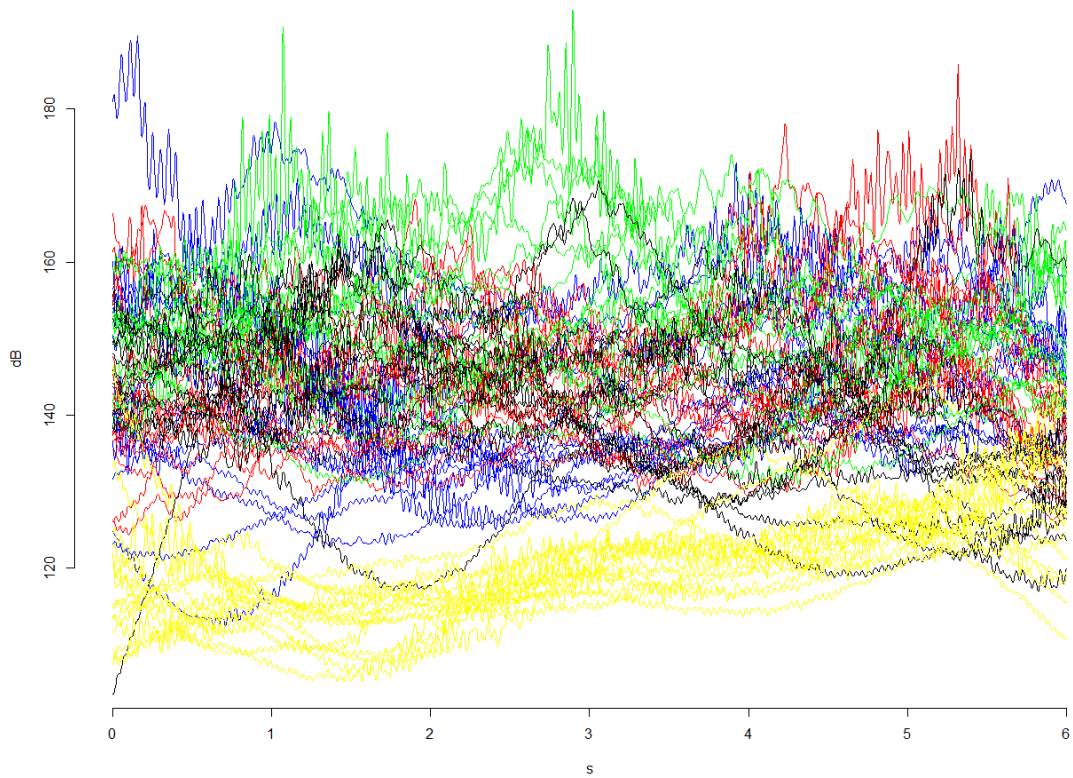


Figura A4 *R1NC2USH*.

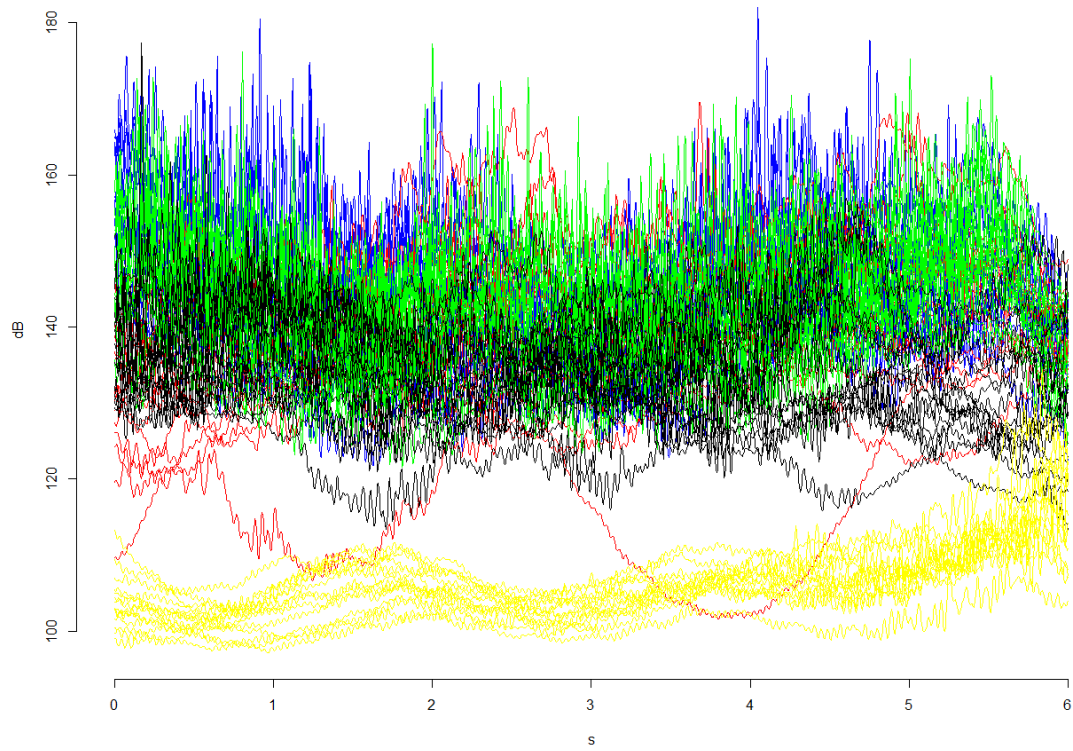


Figura A5 R5NC1LSH.

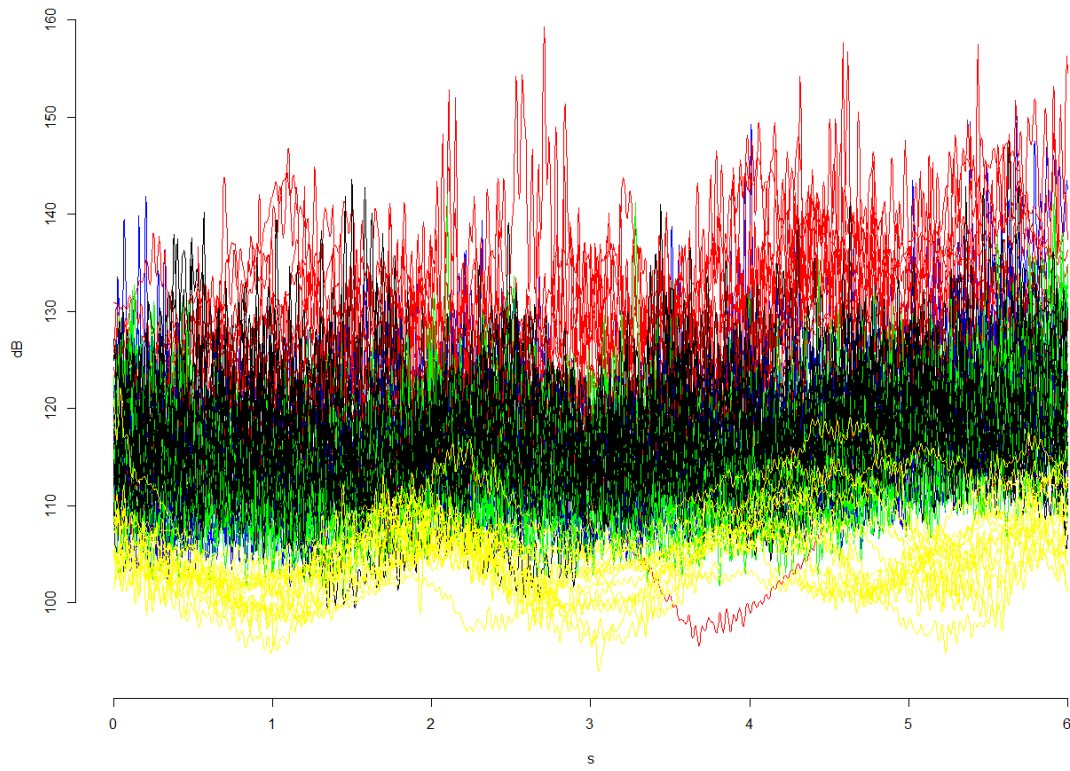


Figura A6 R5NC1USH.

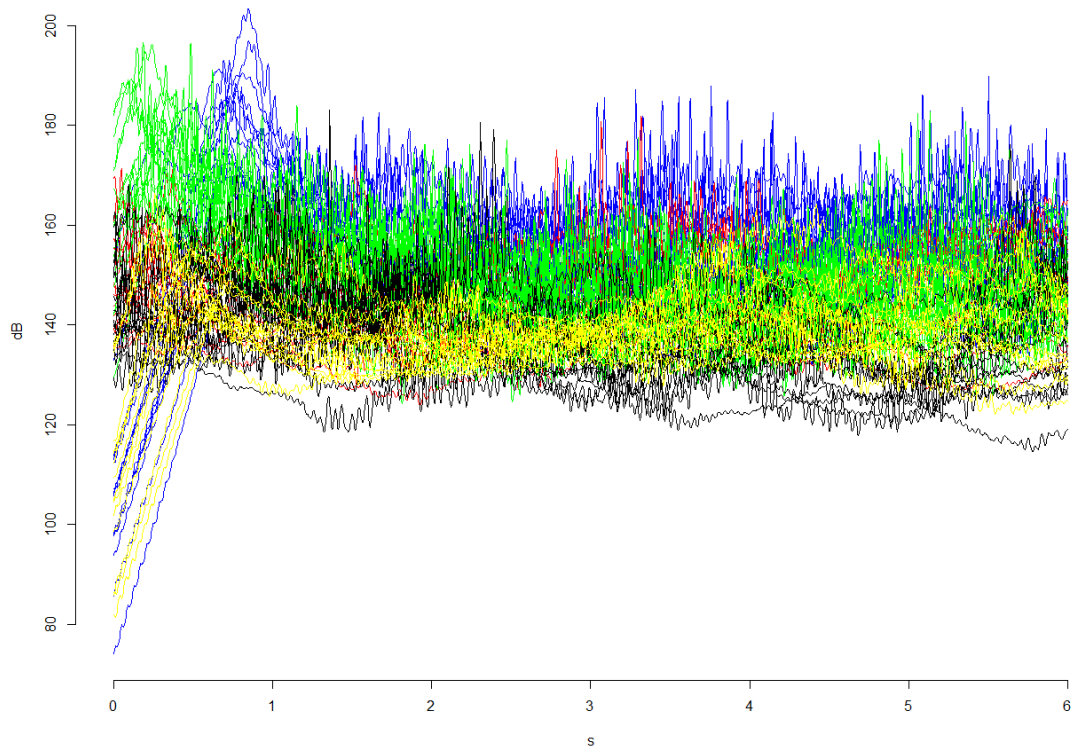


Figura A7 *R5NC2LSH*.

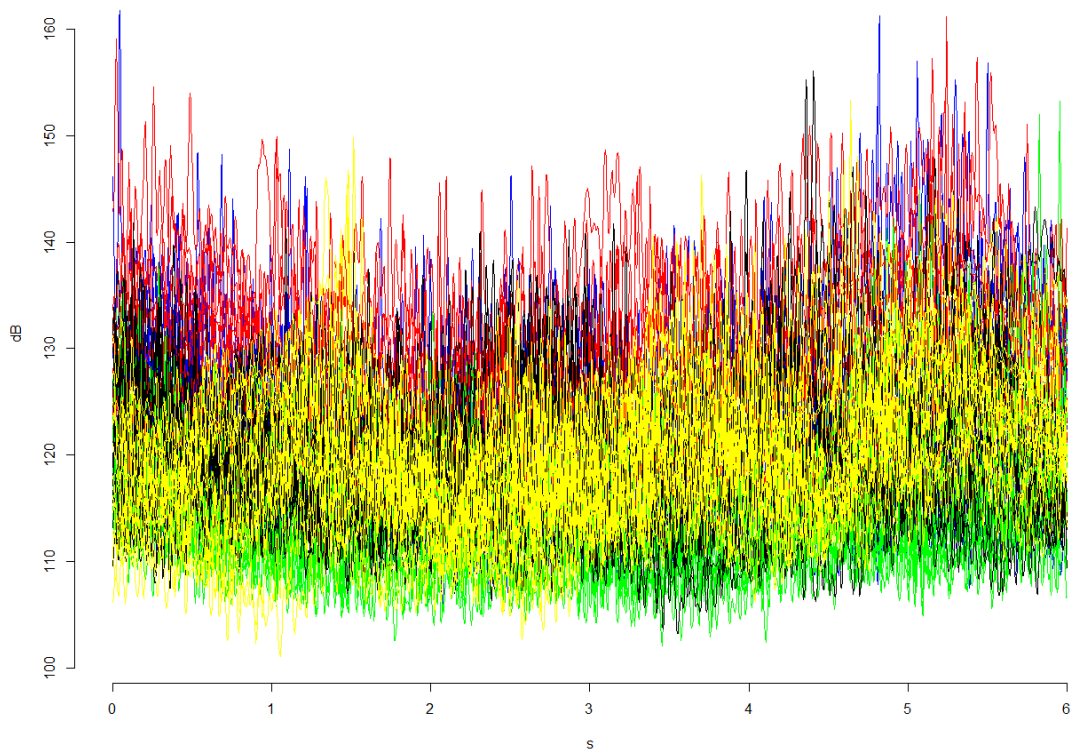


Figura A8 *R5NC2USH*.

A.1.2 Comparación de la salud del motor

Se diferencian los estados de la salud del motor con distintos colores tal que así:

- **Motor sano (R1):** Color Verde.
- **Motor con la barra del rotor rota (R5):** Color Rojo.

A continuación se expondrán todas las gráficas correspondientes a este apartado:

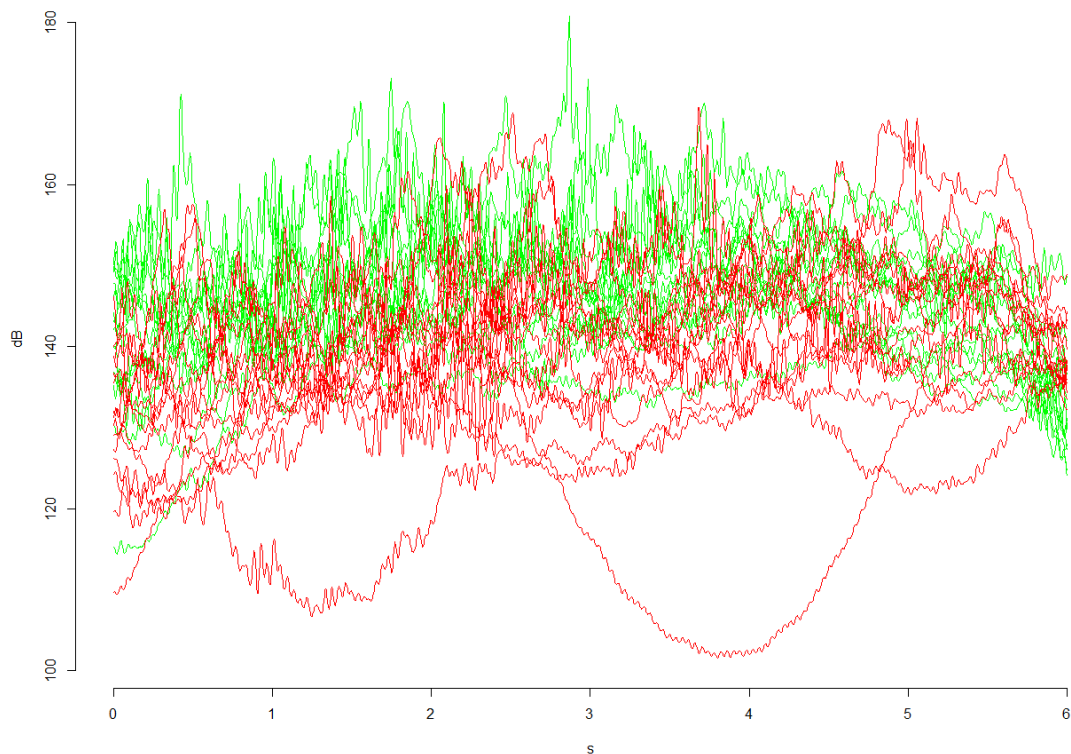


Figura A9 ABNC1LSH.

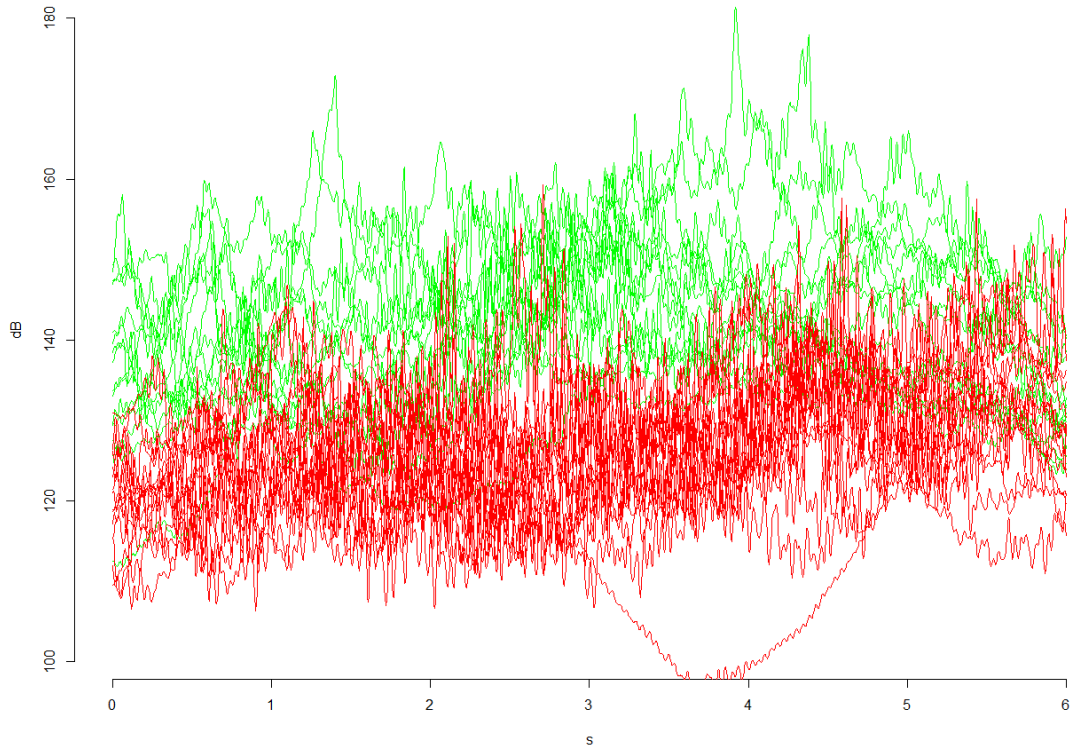


Figura A10 *ABNC1USH.*

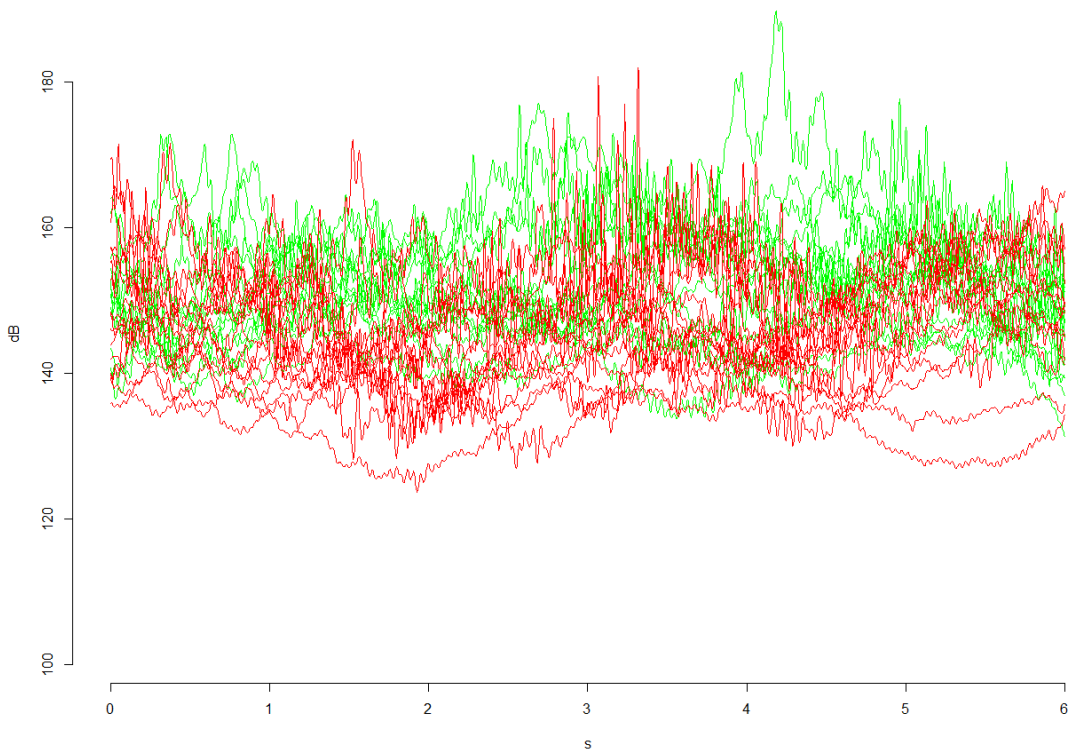


Figura A11 *ABNC2LSH.*

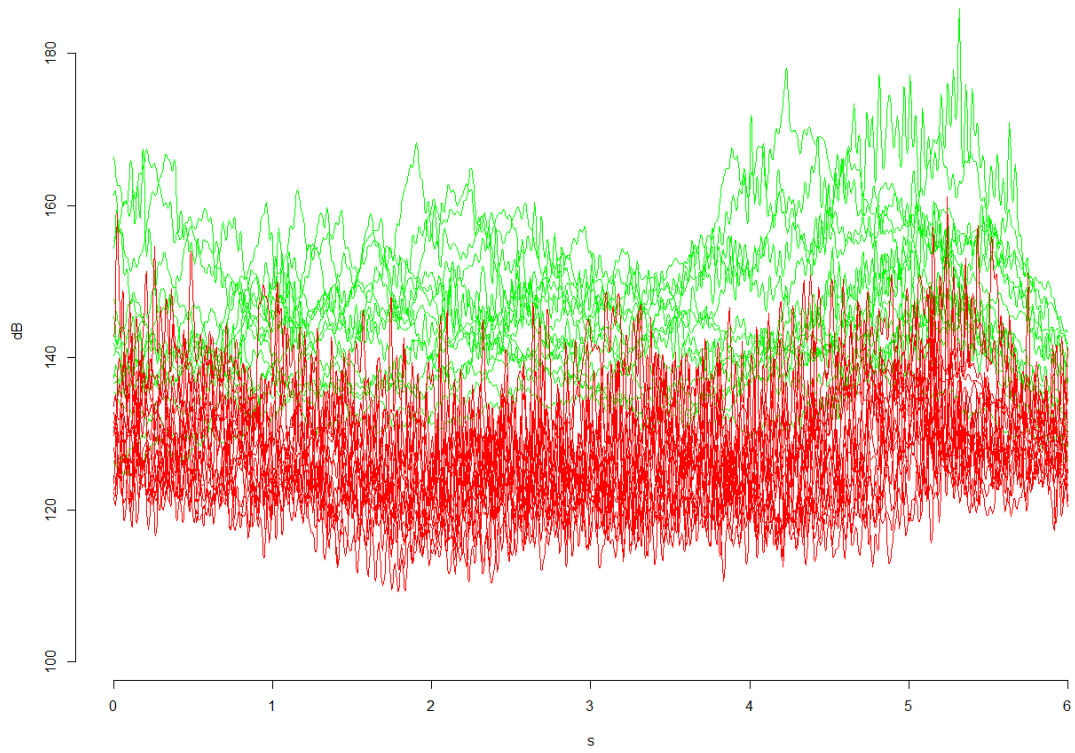


Figura A12 *ABNC2USH.*

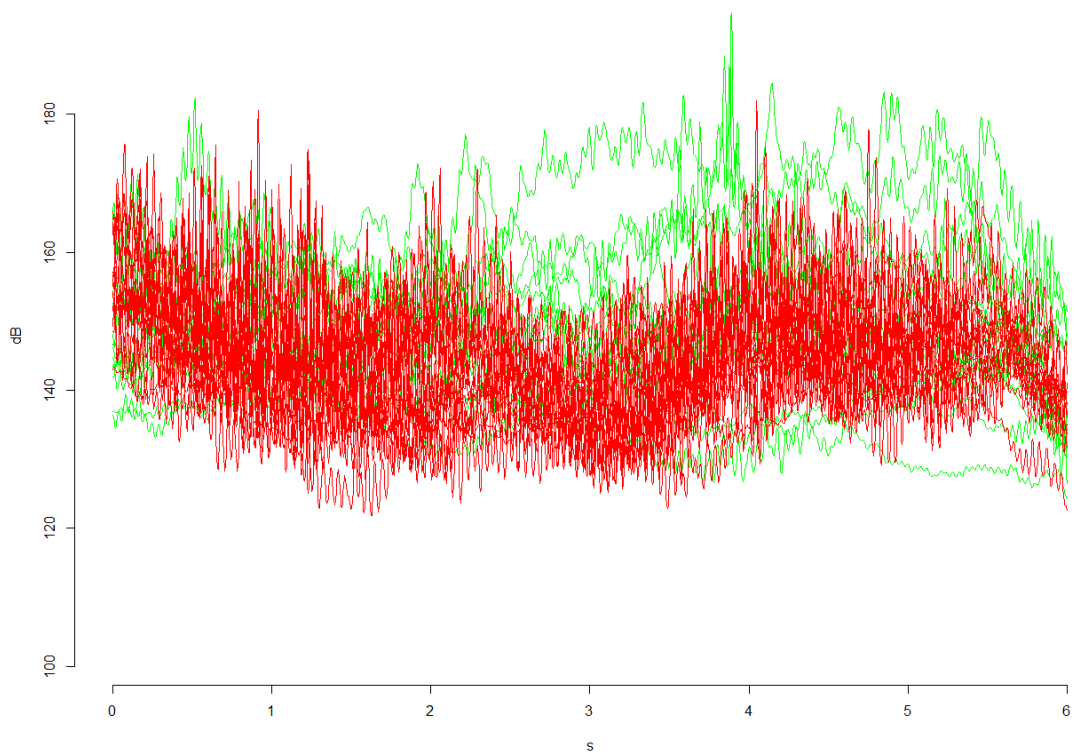


Figura A13 *ABBNC1LSH.*

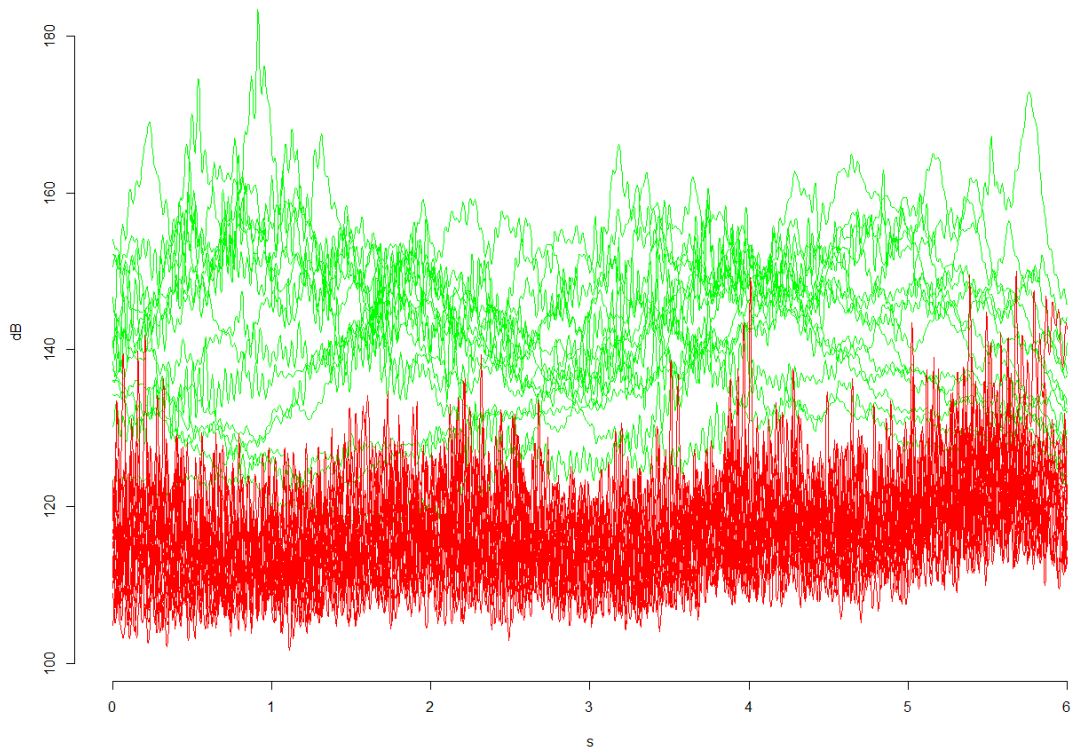


Figura A14 *ABBNC1USH.*

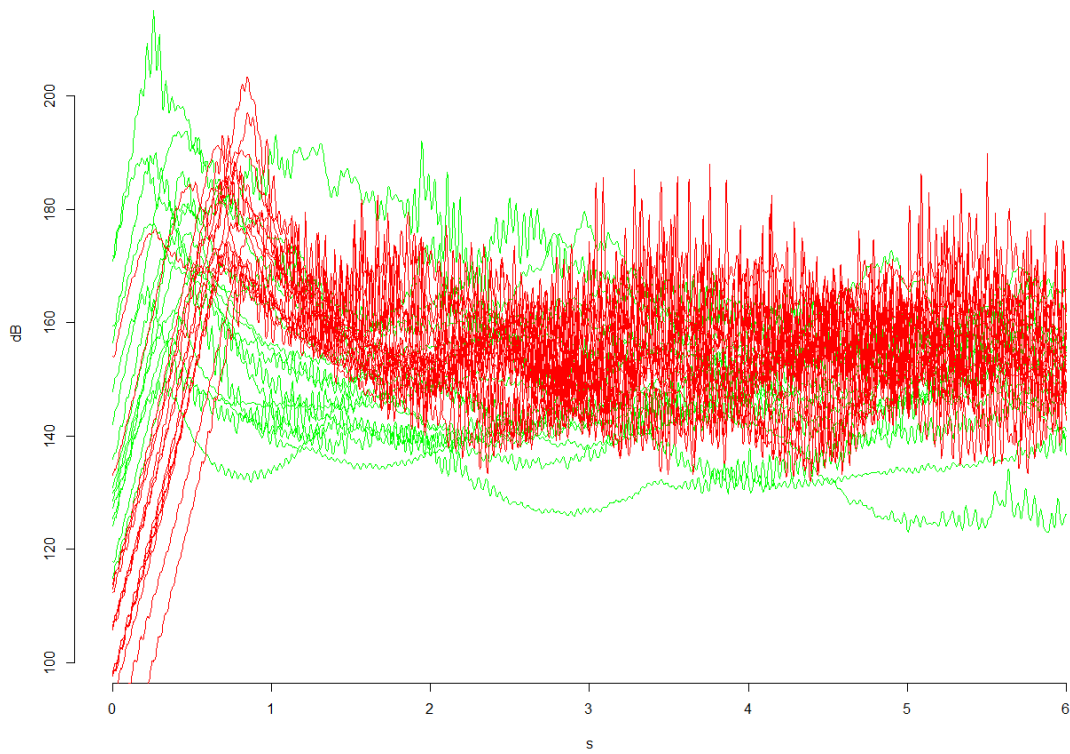


Figura A15 *ABBNC2LSH.*

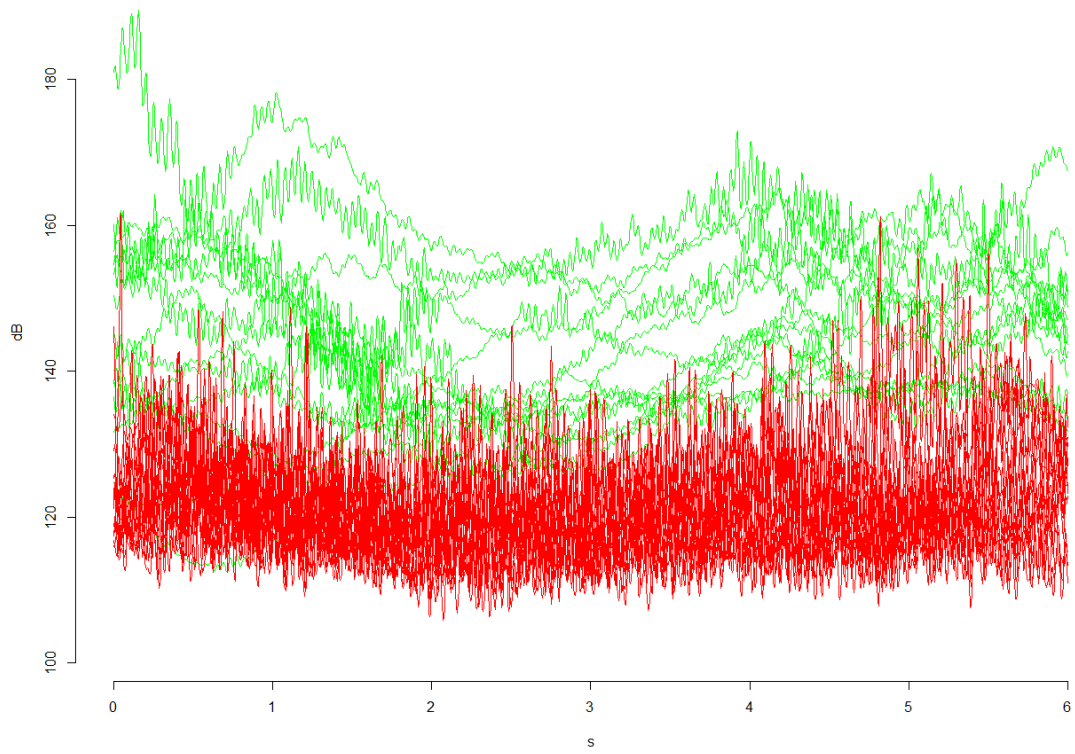


Figura A16 ABBNC2USH.

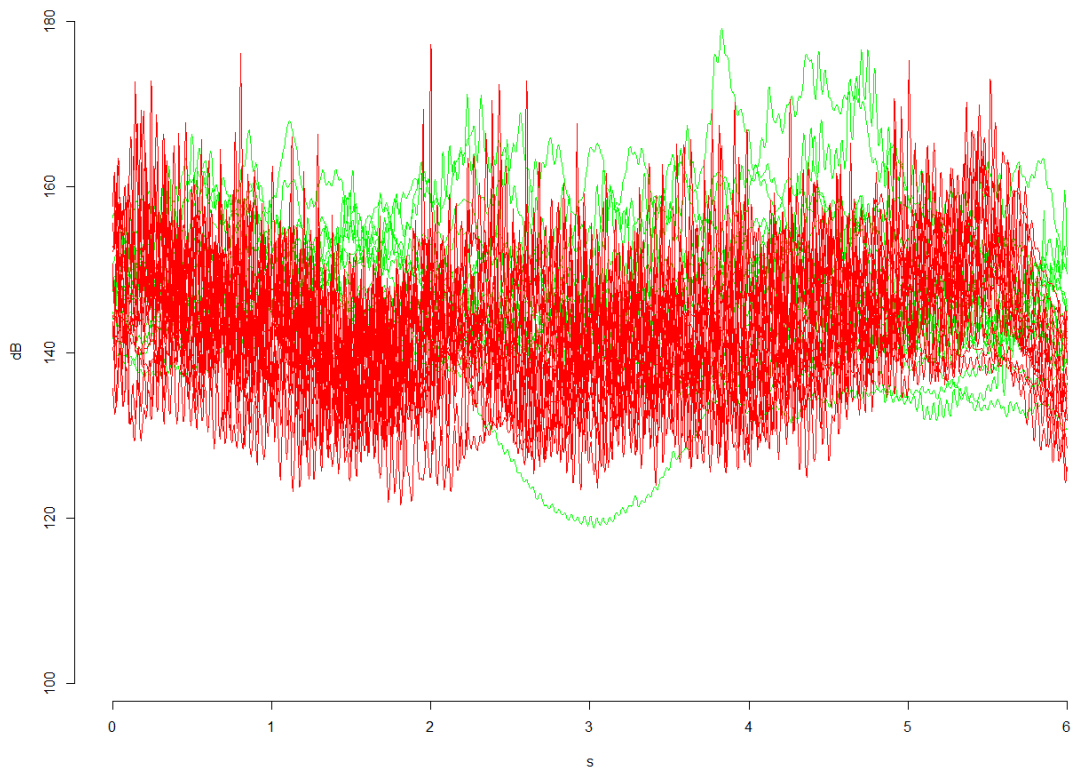


Figura A17 SIENC1LSH.

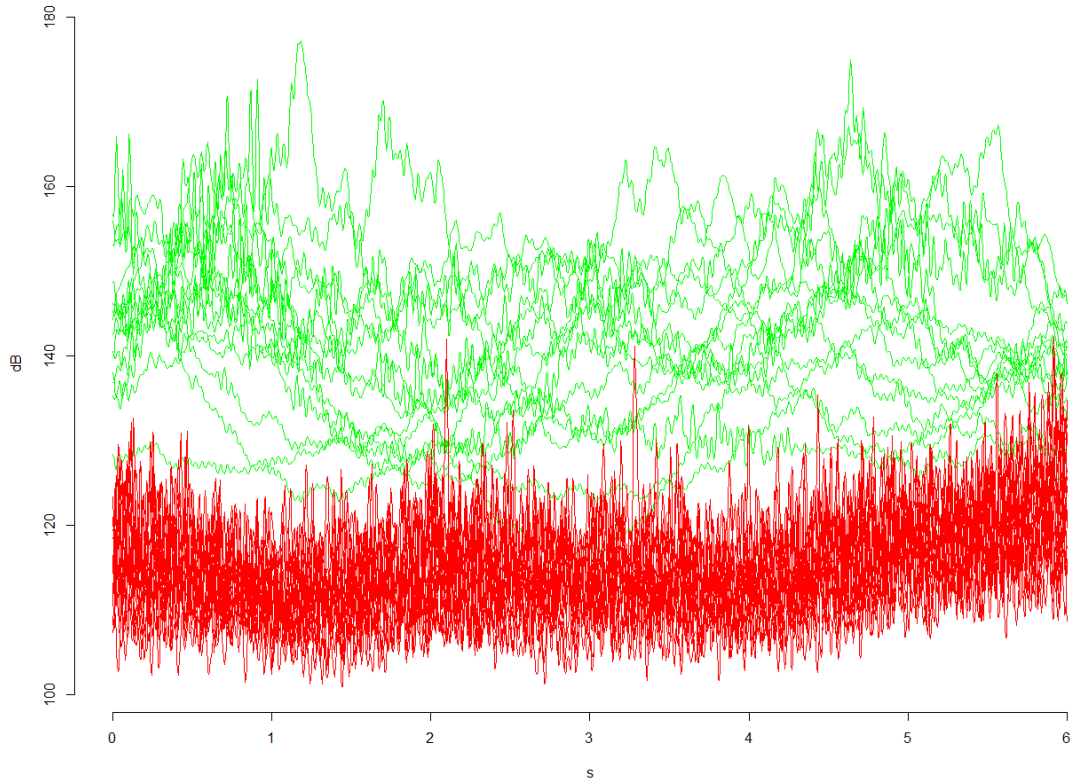


Figura A18 SIENC1USH.

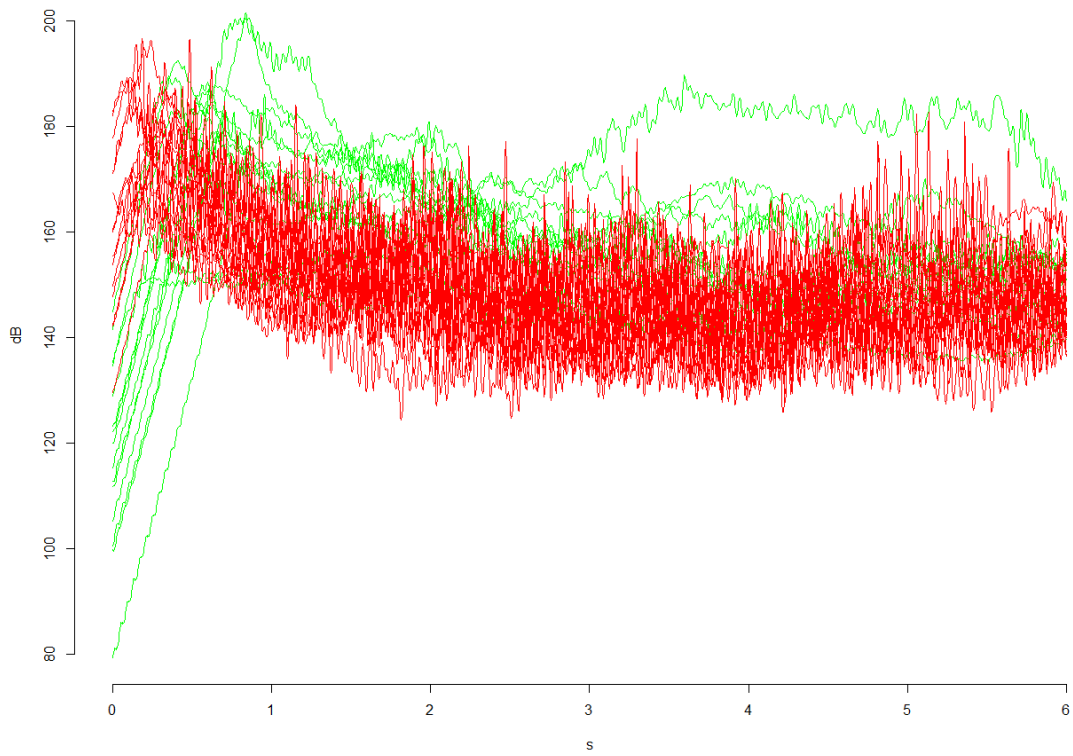


Figura A19 SIENC2LSH.

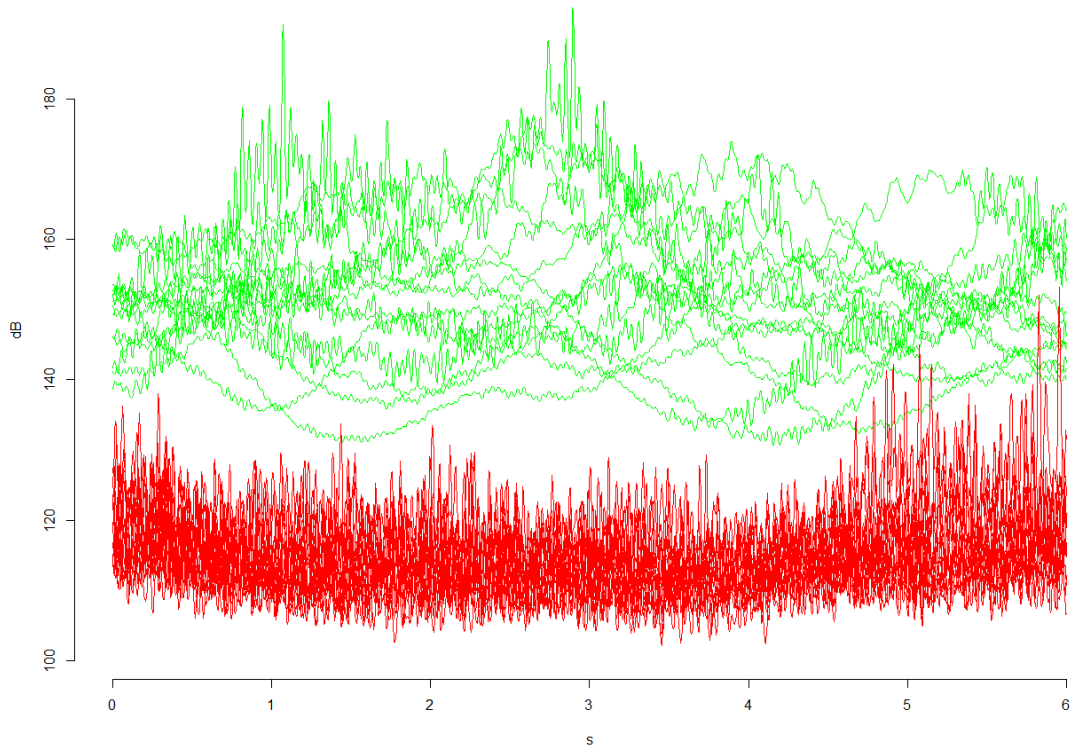


Figura A20 *SIENC2USH.*

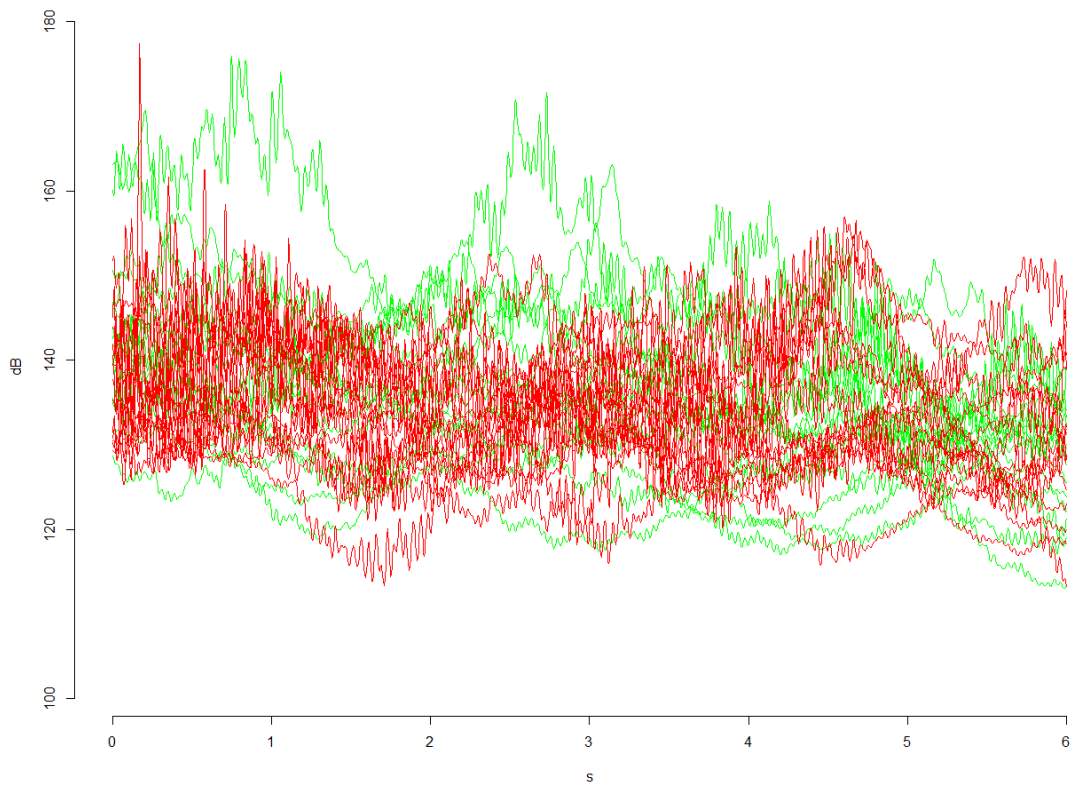


Figura A21 *TMNC1LSH.*

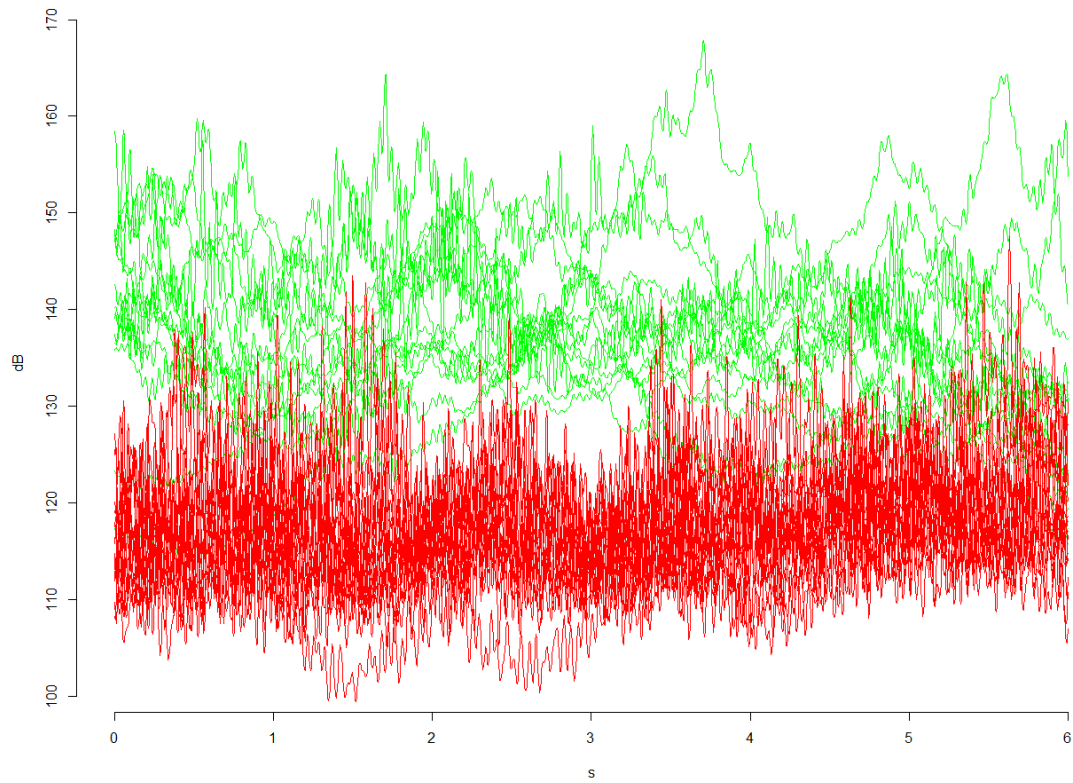


Figura A22 *TMNC1USH.*

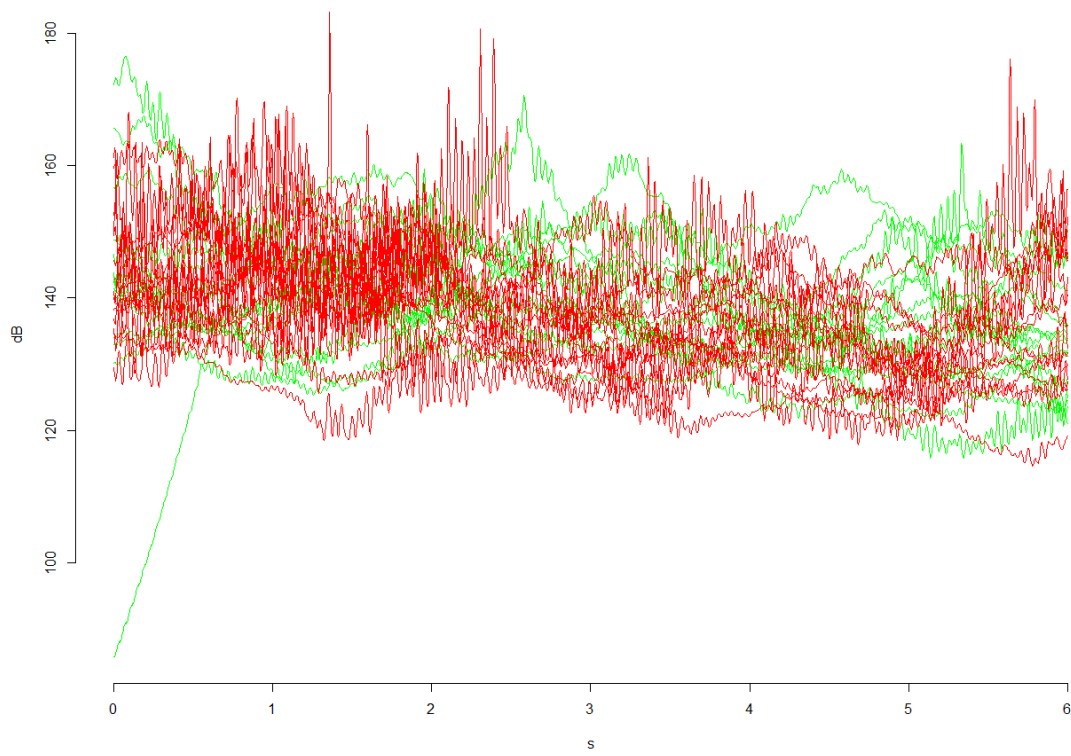


Figura A23 *TMNC2LSH.*

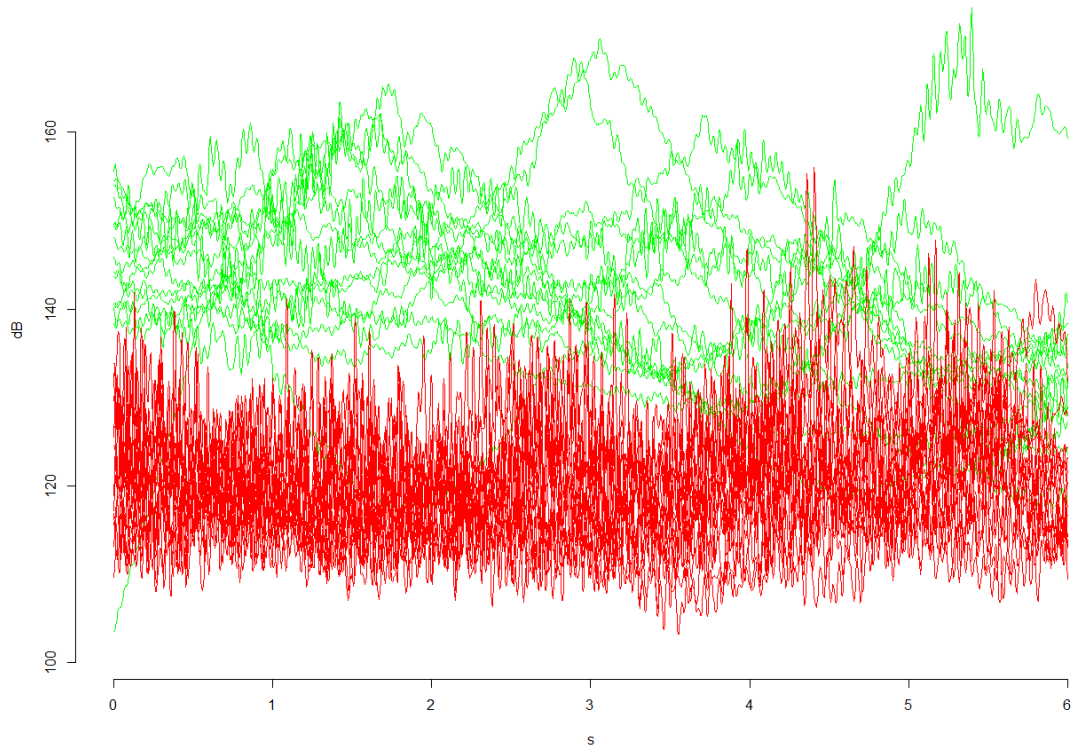


Figura A24 *TMNC2USH.*

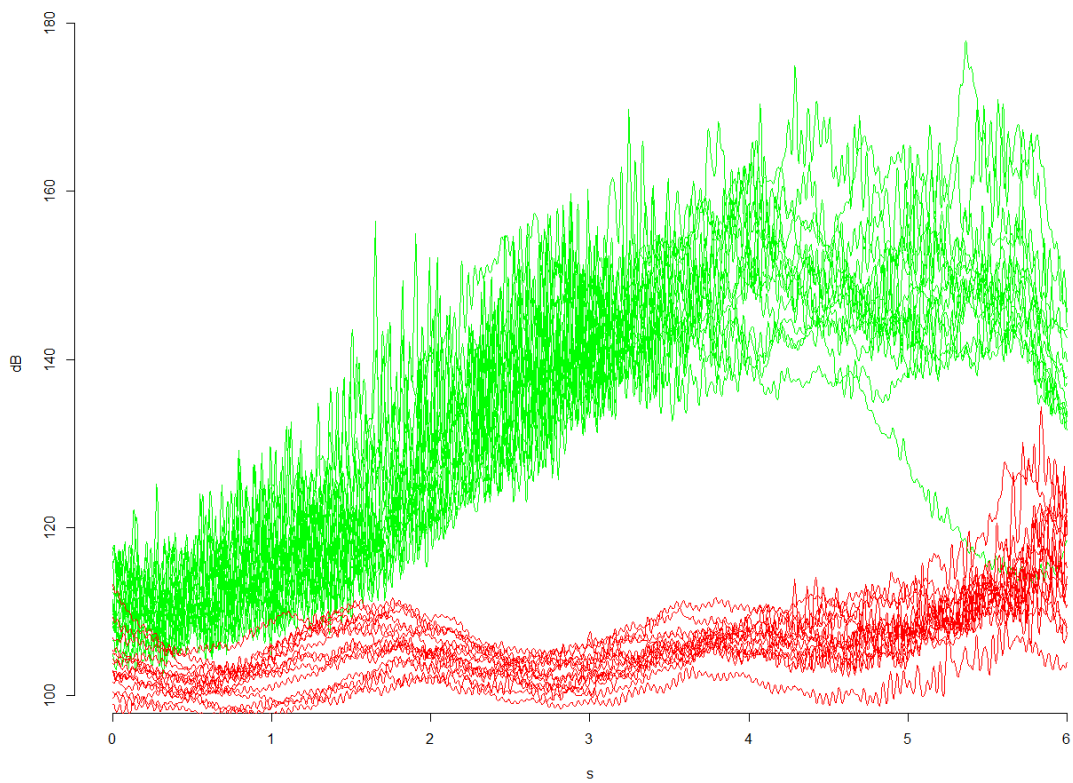


Figura A25 *WEGNC1LSH.*

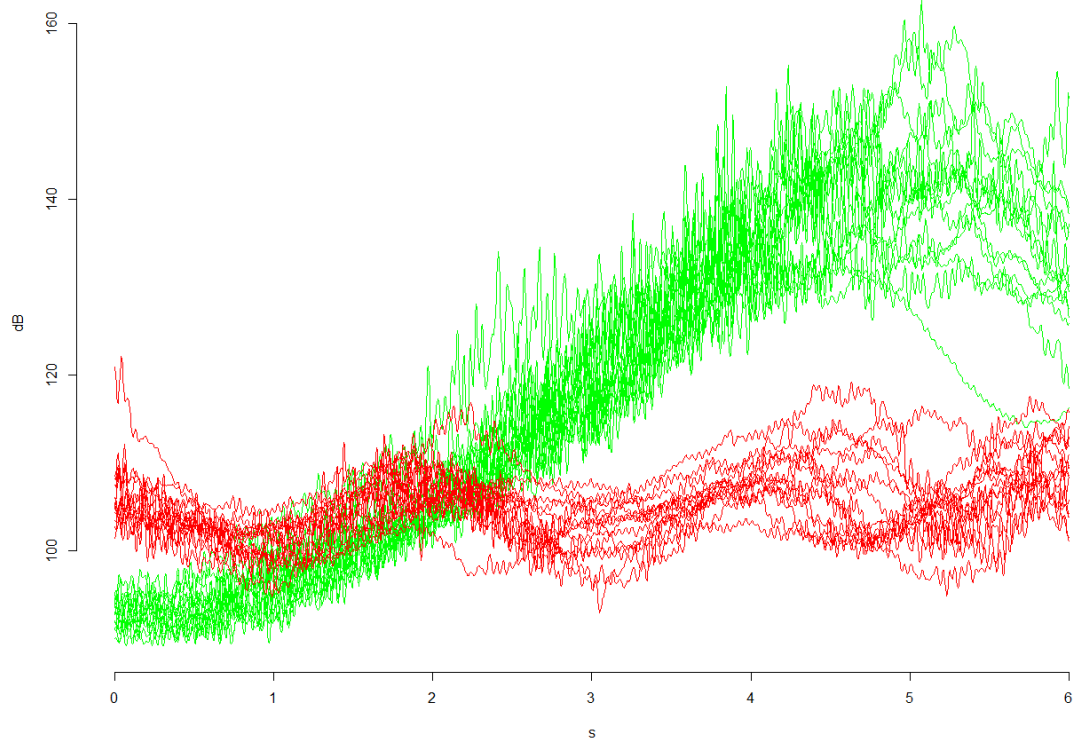


Figura A26 WEGNC1USH.

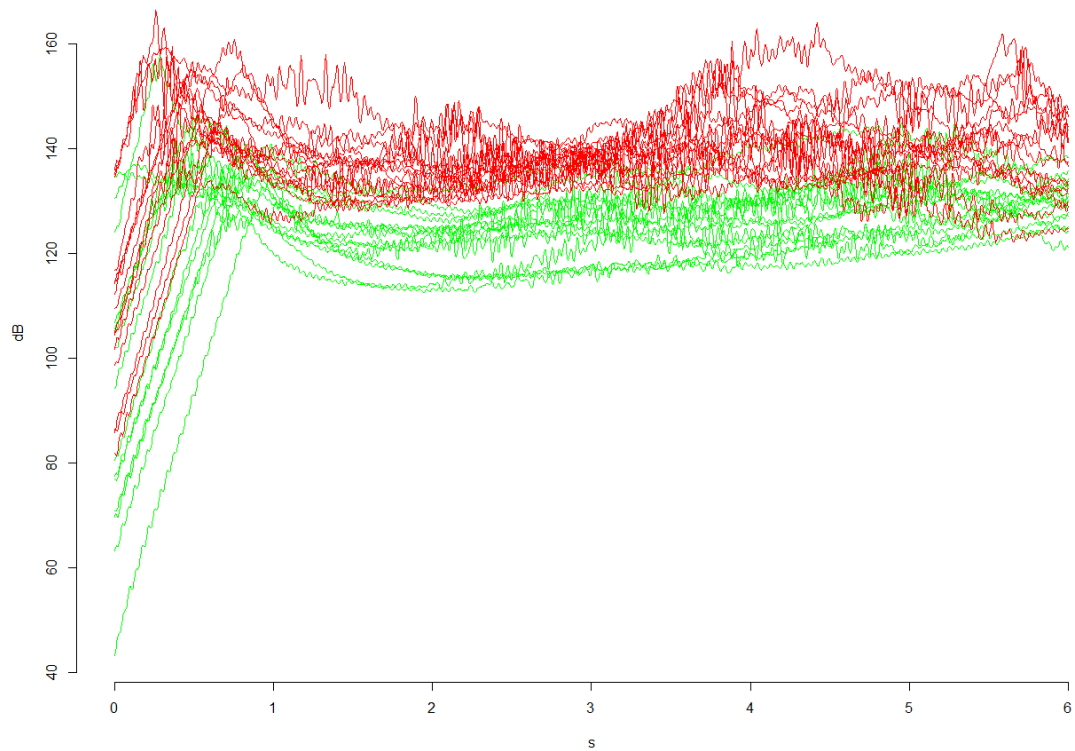


Figura A27 WEGNC2LSH.

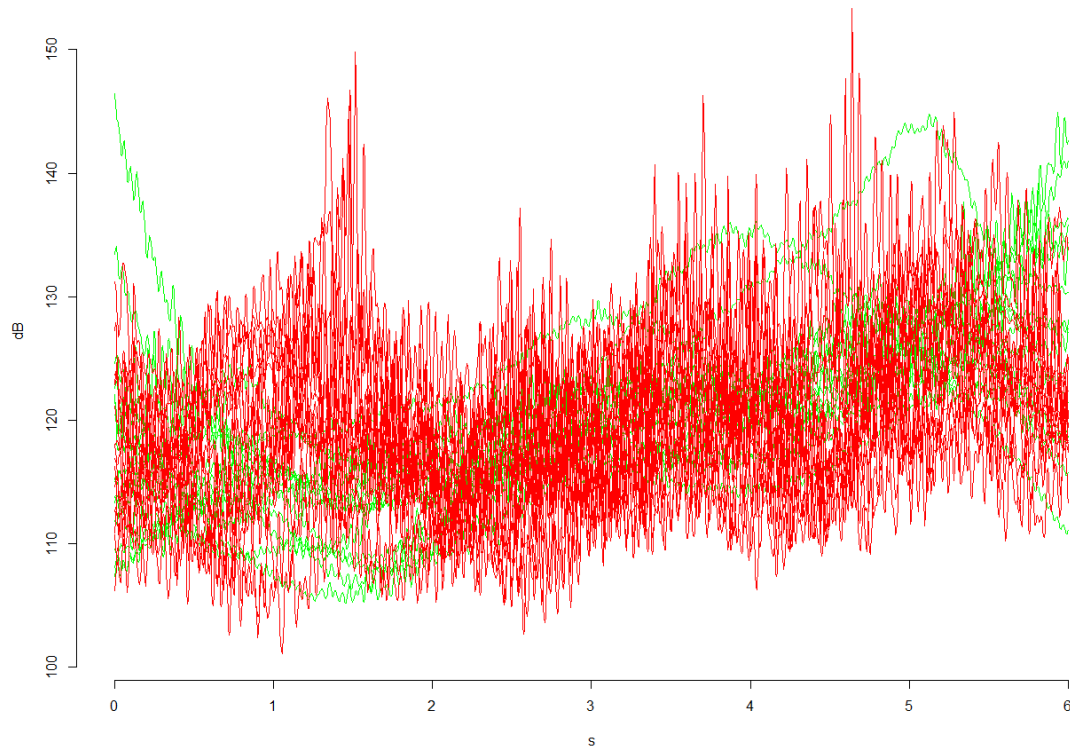


Figura A28 WEGNC2USH.

A.1.3 Comparación de los niveles de carga

Se diferencian los niveles de carga aplicados con distintos colores tal que así:

- **Nivel de carga bajo (NC1)**: Color Azul.
- **Nivel de carga alto (NC2)**: Color Naranja.

A continuación se expondrán todas las gráficas correspondientes a este apartado:

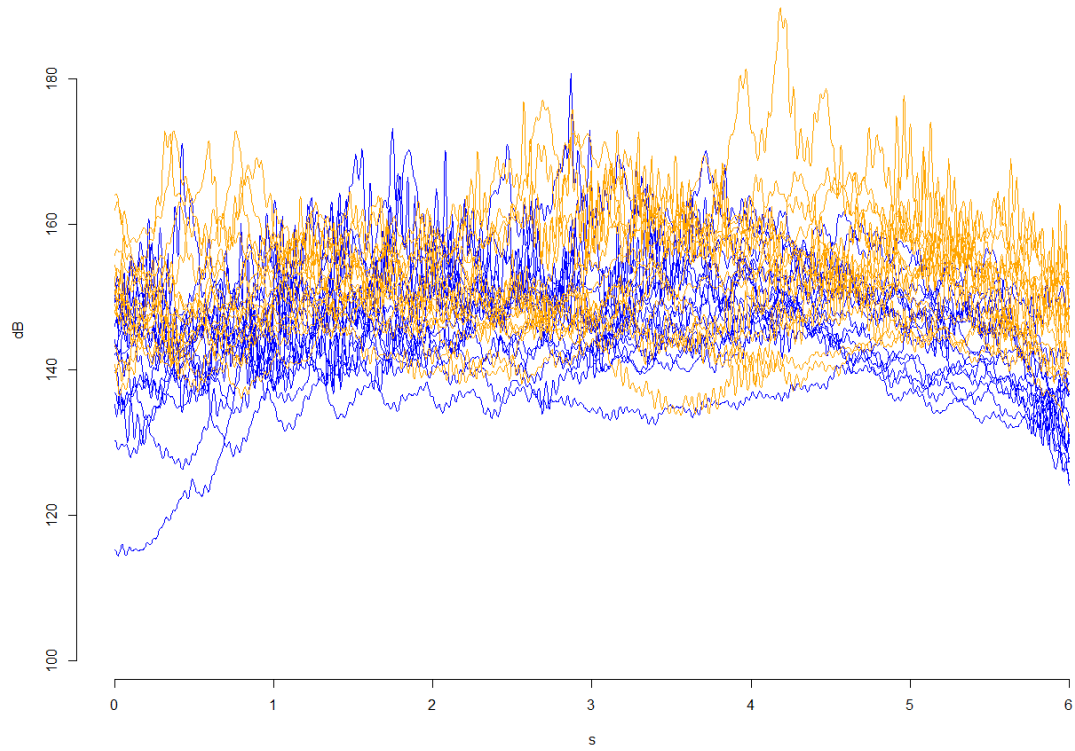


Figura A29 *ABR1LSH*.

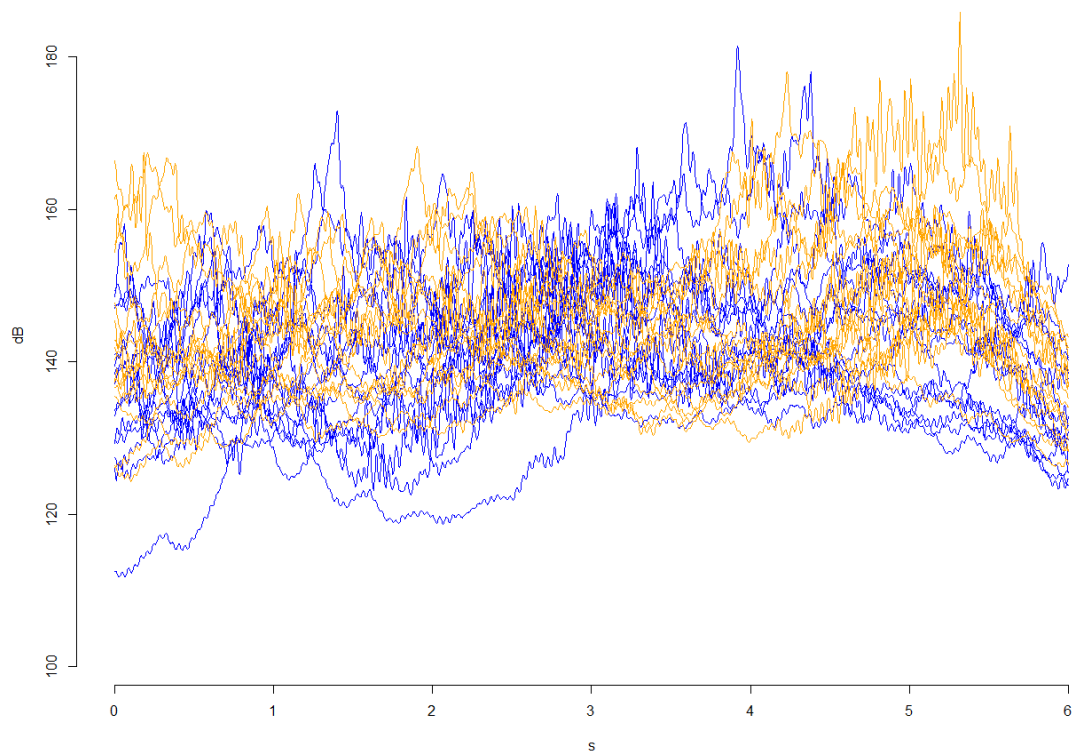


Figura A30 *ABR1USH*.

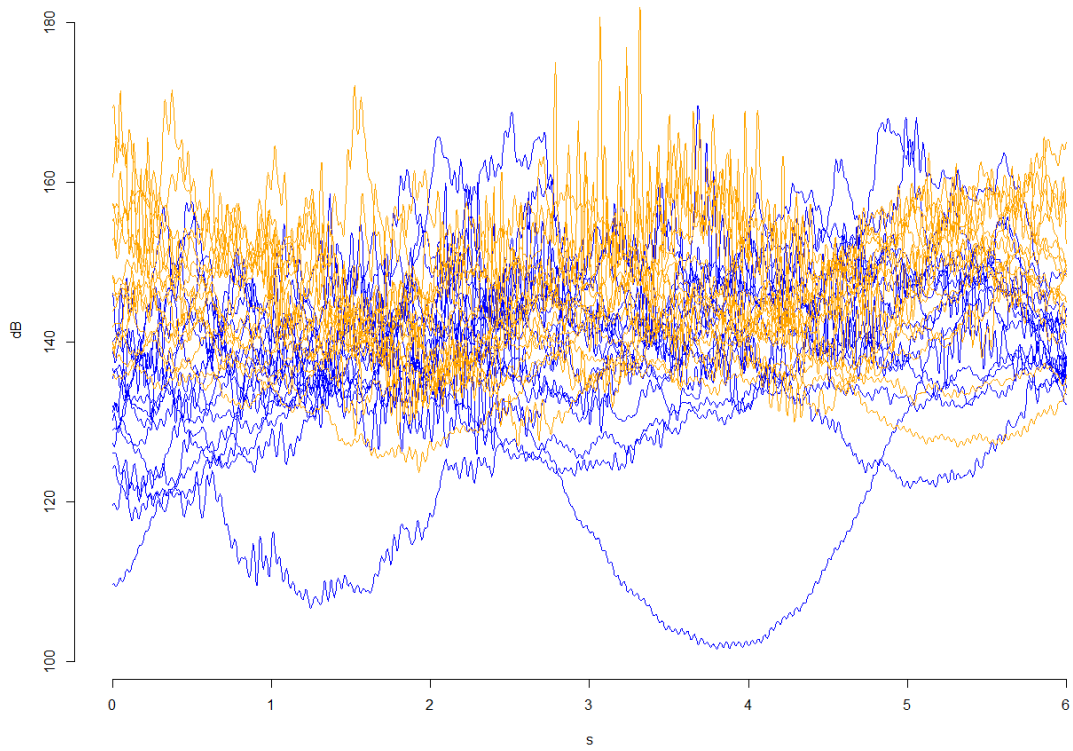


Figura A31 *ABR5LSH*.

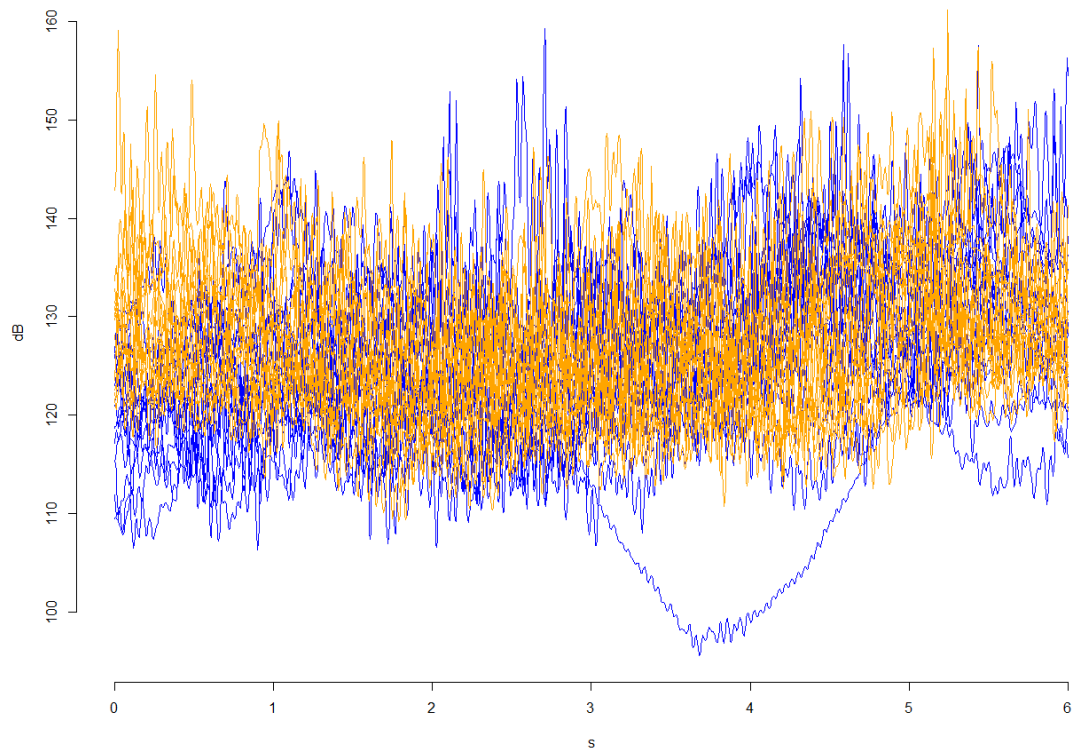


Figura A32 *ABR5USH*.

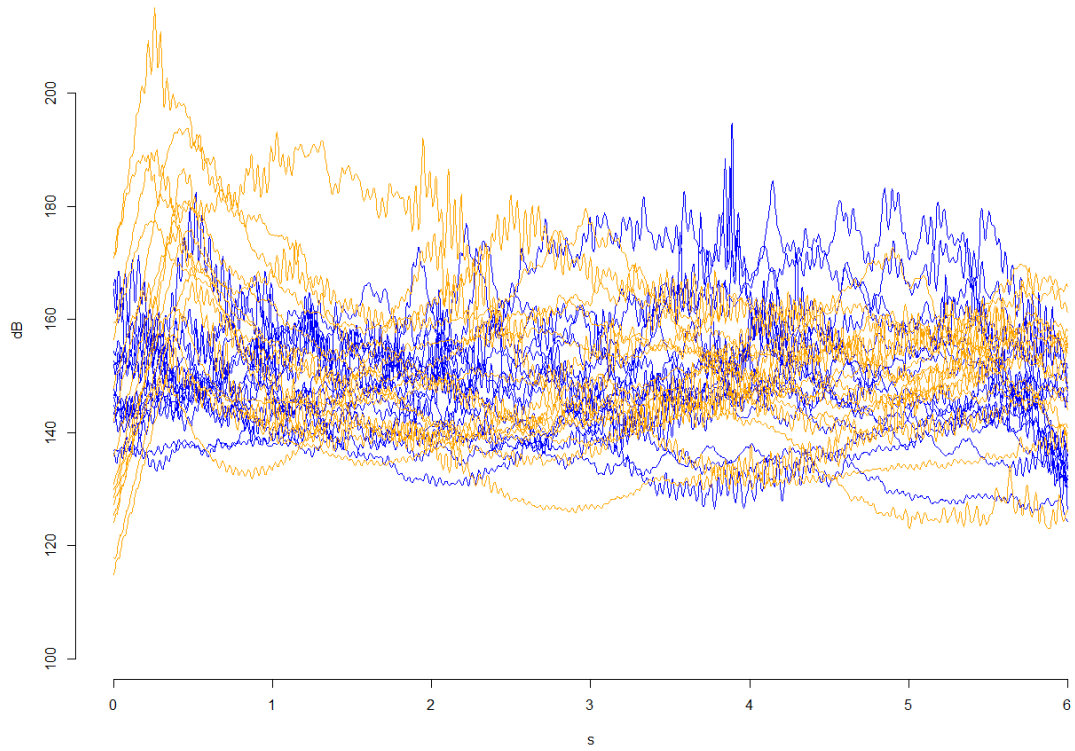


Figura A33 *ABBR1LSH.*

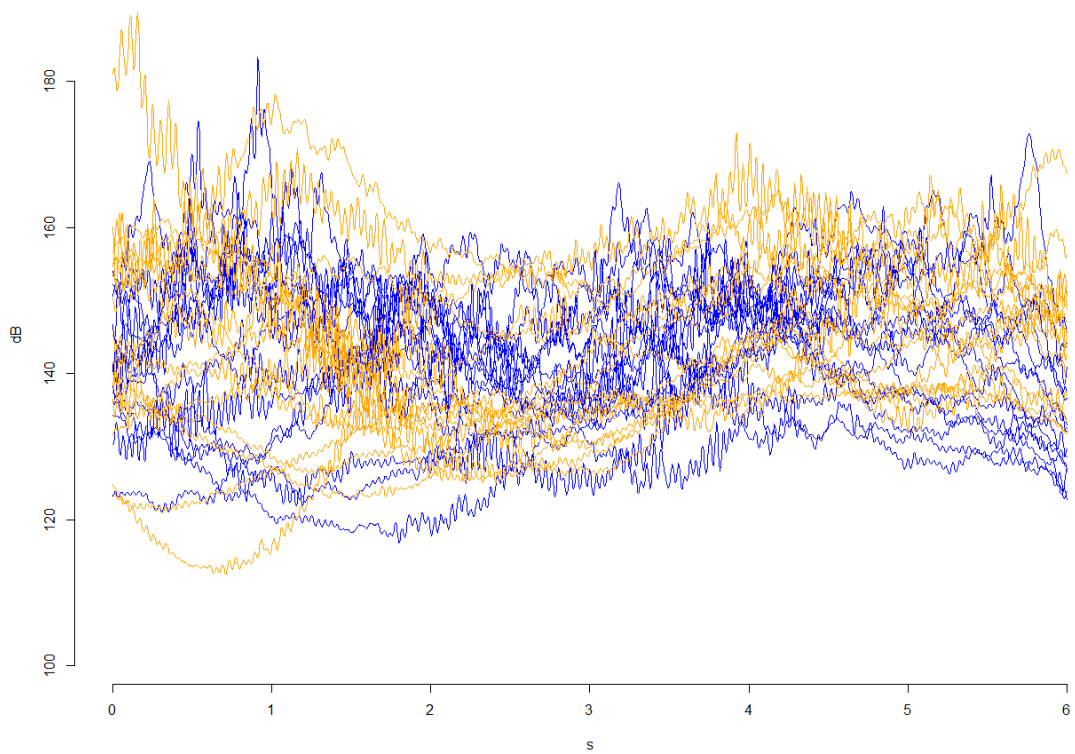


Figura A34 *ABBR1USH.*

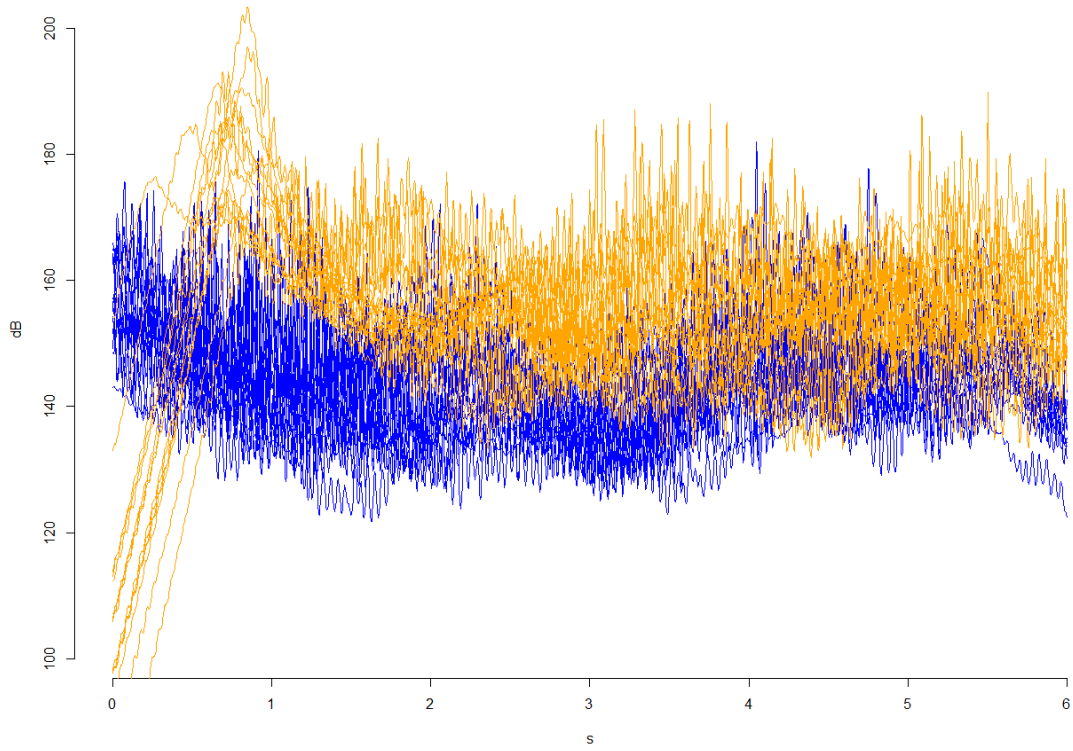


Figura A35 *ABBR5LSH*.

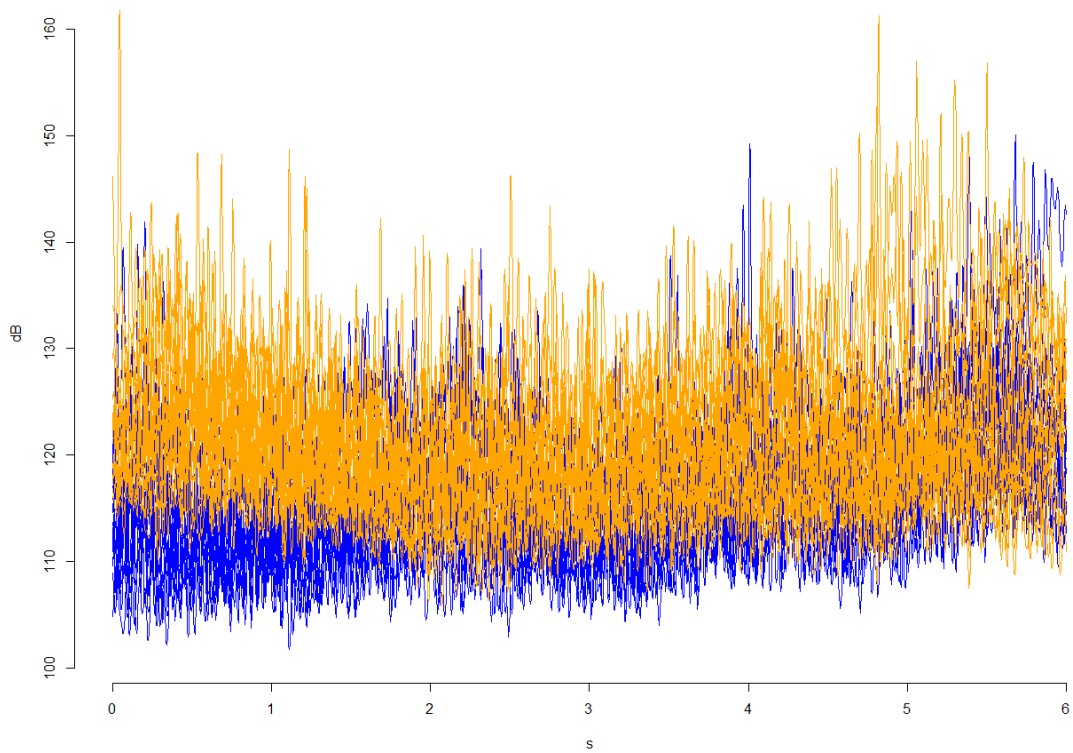


Figura A36 *ABBR5USH*.

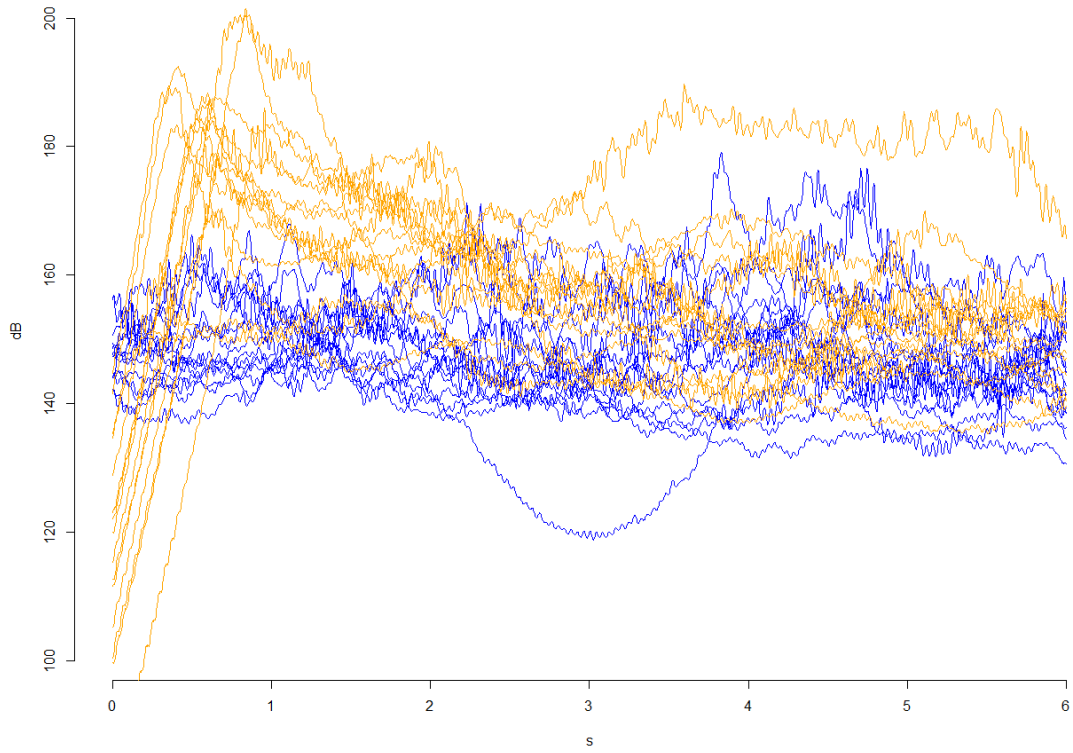


Figura A37 *SIER1LSH.*

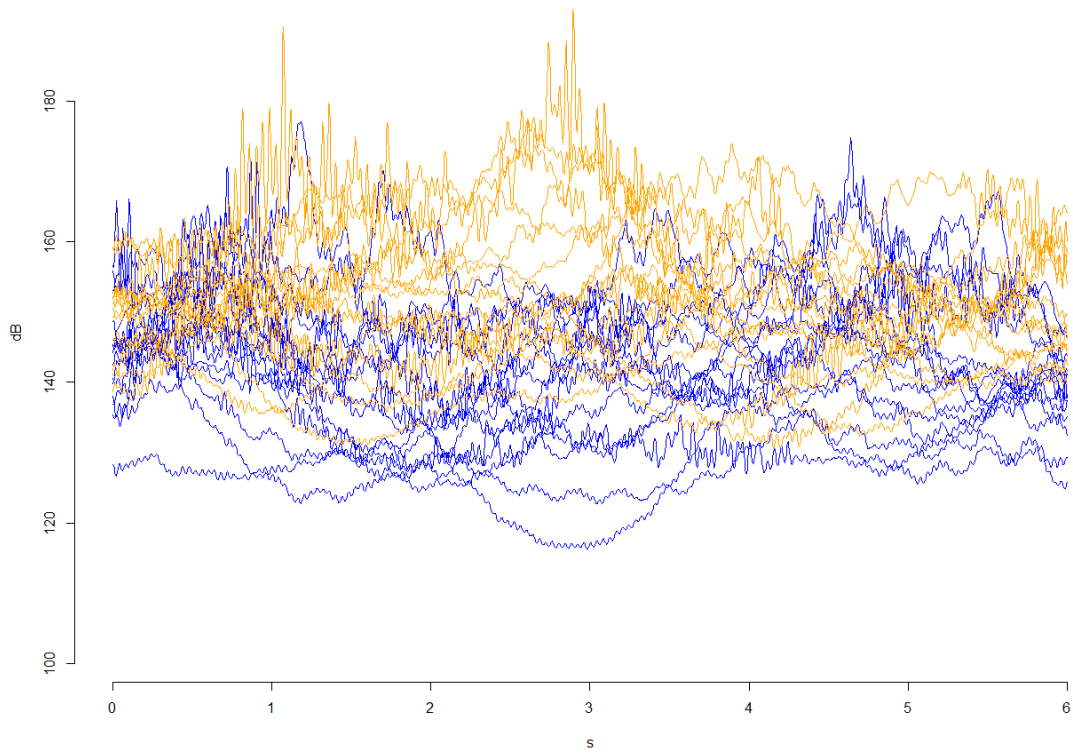


Figura A38 *SIER1USH.*

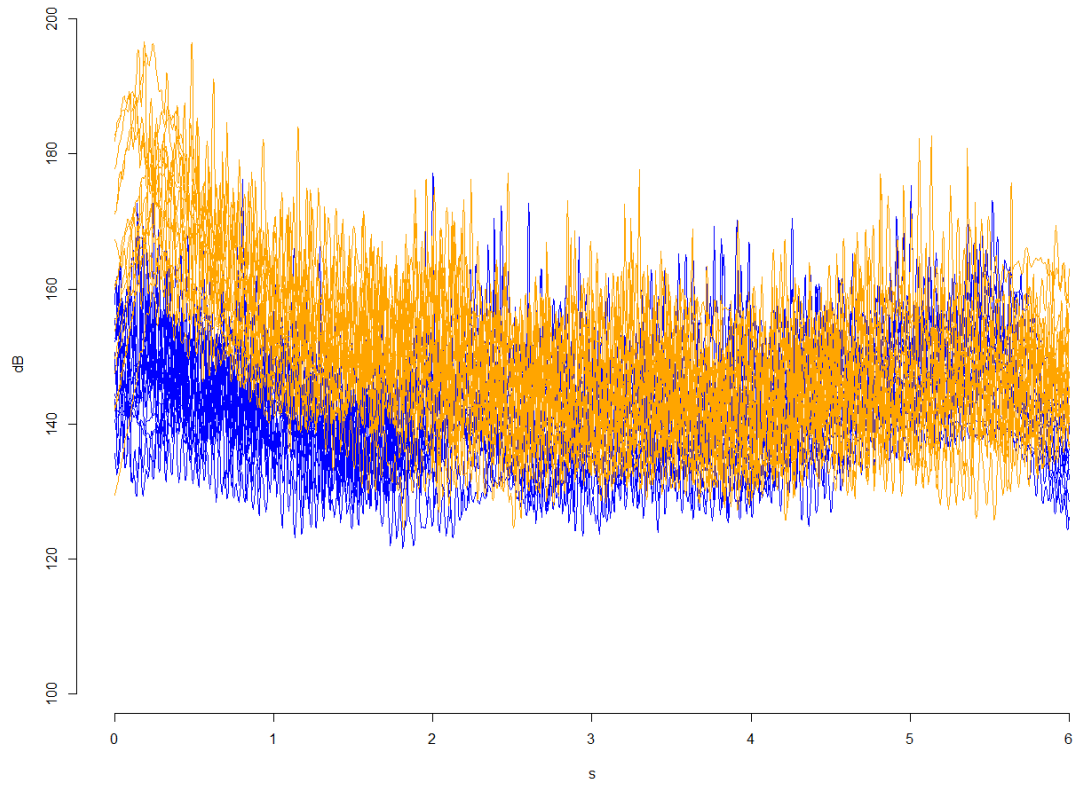


Figura A39 *SIER5LSH*.

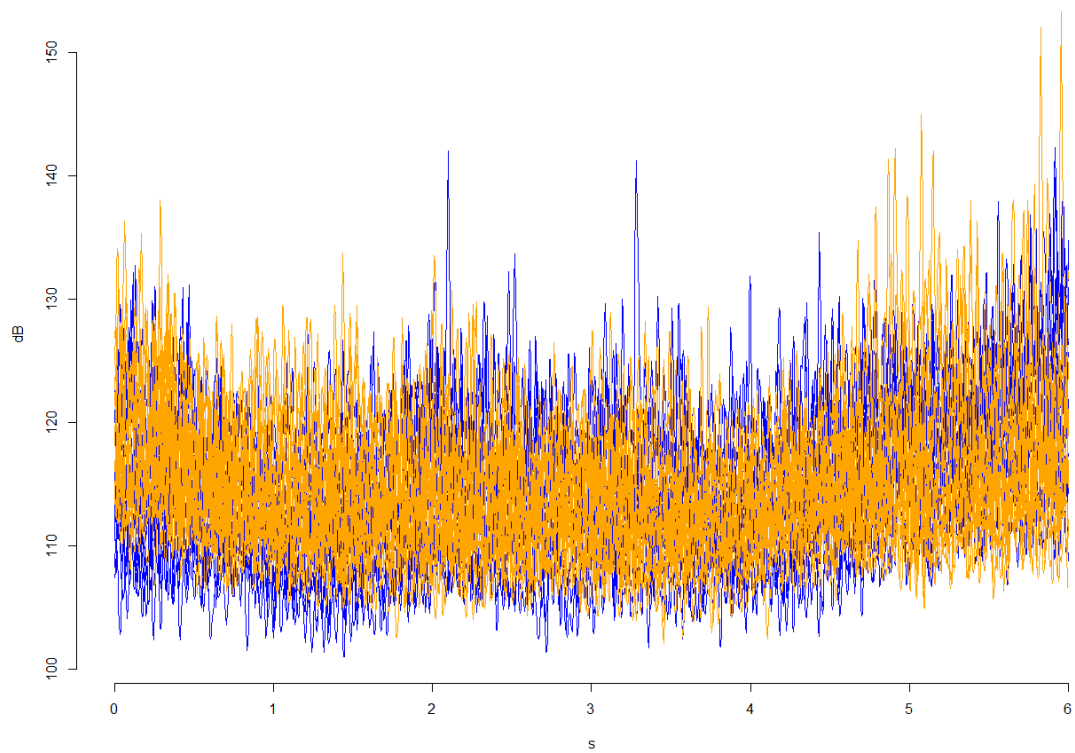


Figura A40 *SIER5USH*.

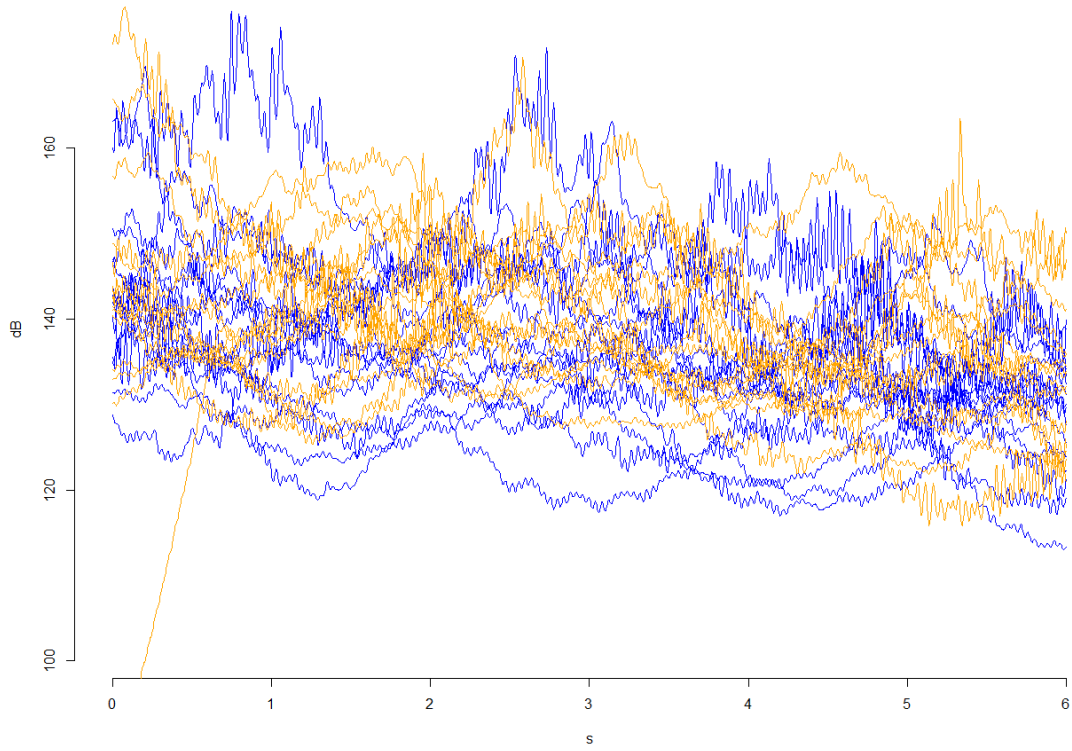


Figura A41 TMR1LSH.

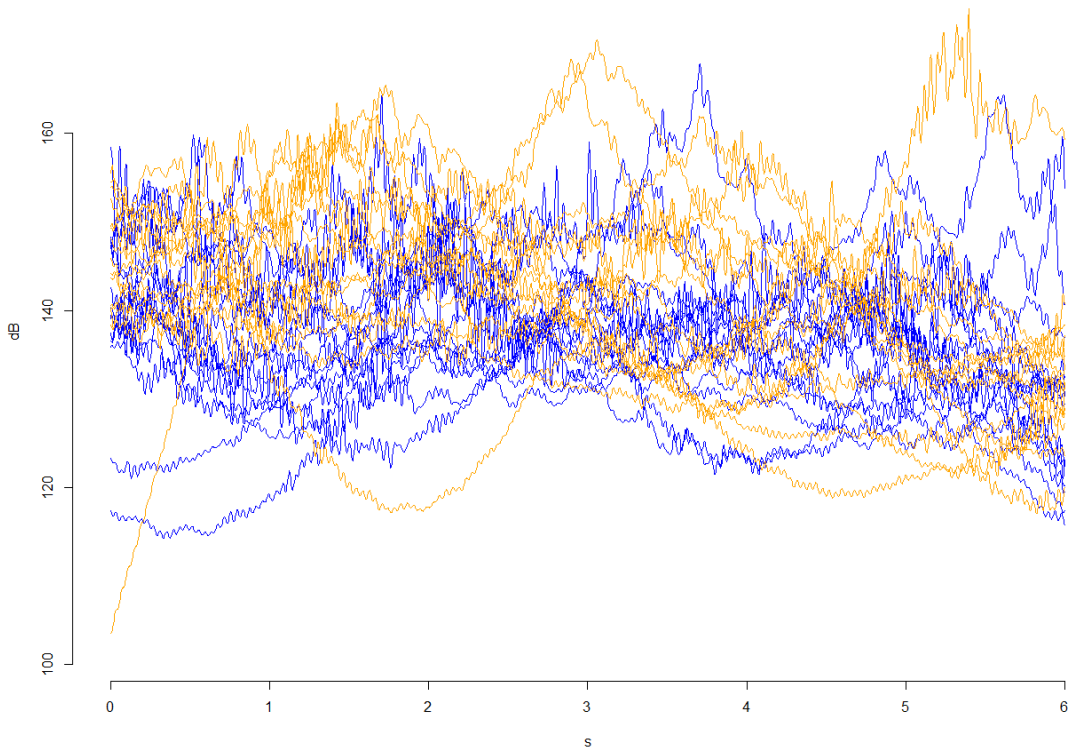


Figura A42 TMR1USH.

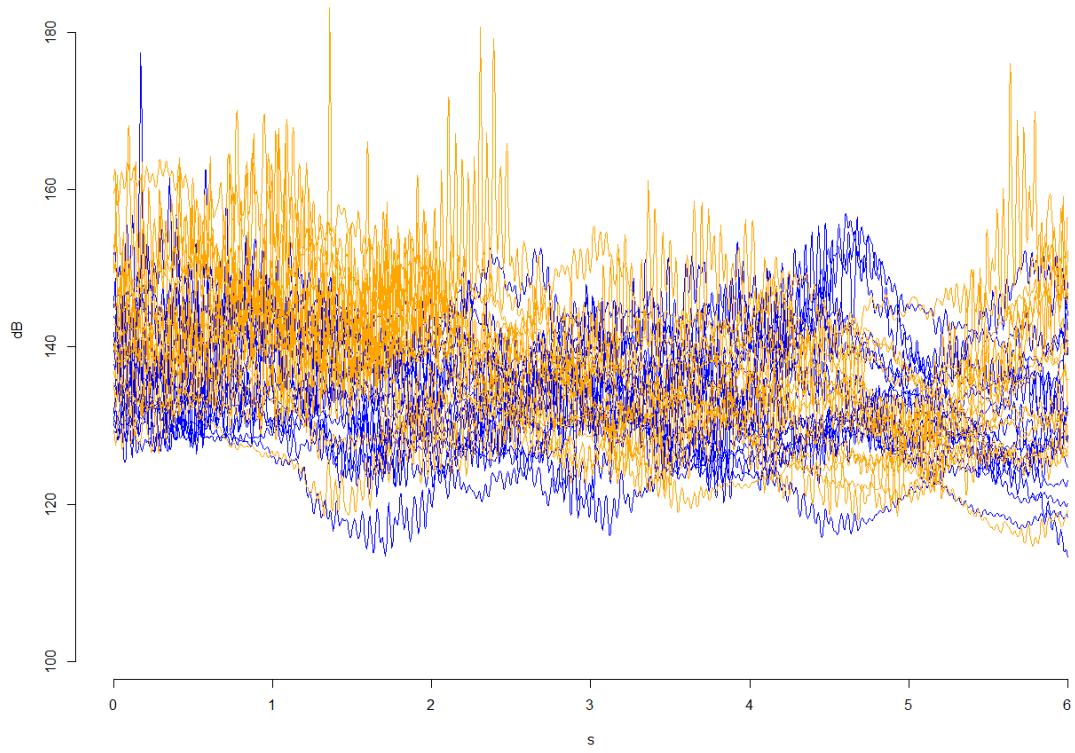


Figura A43 *TMR5LSH*.

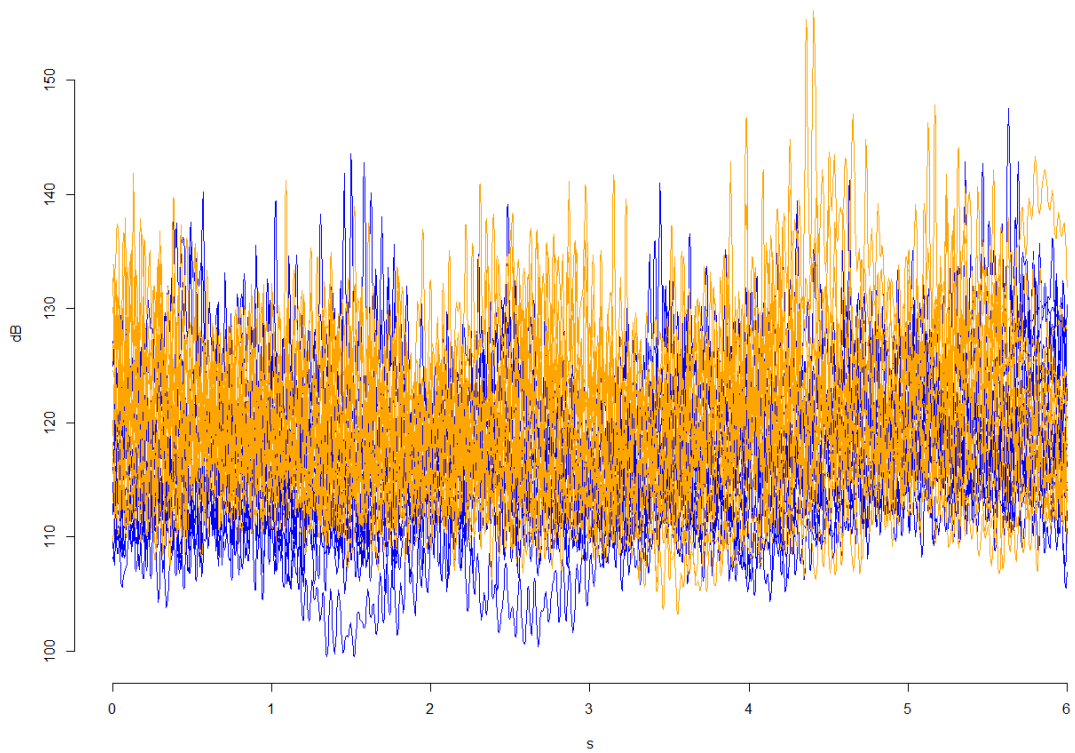


Figura A44 *TMR5USH*.

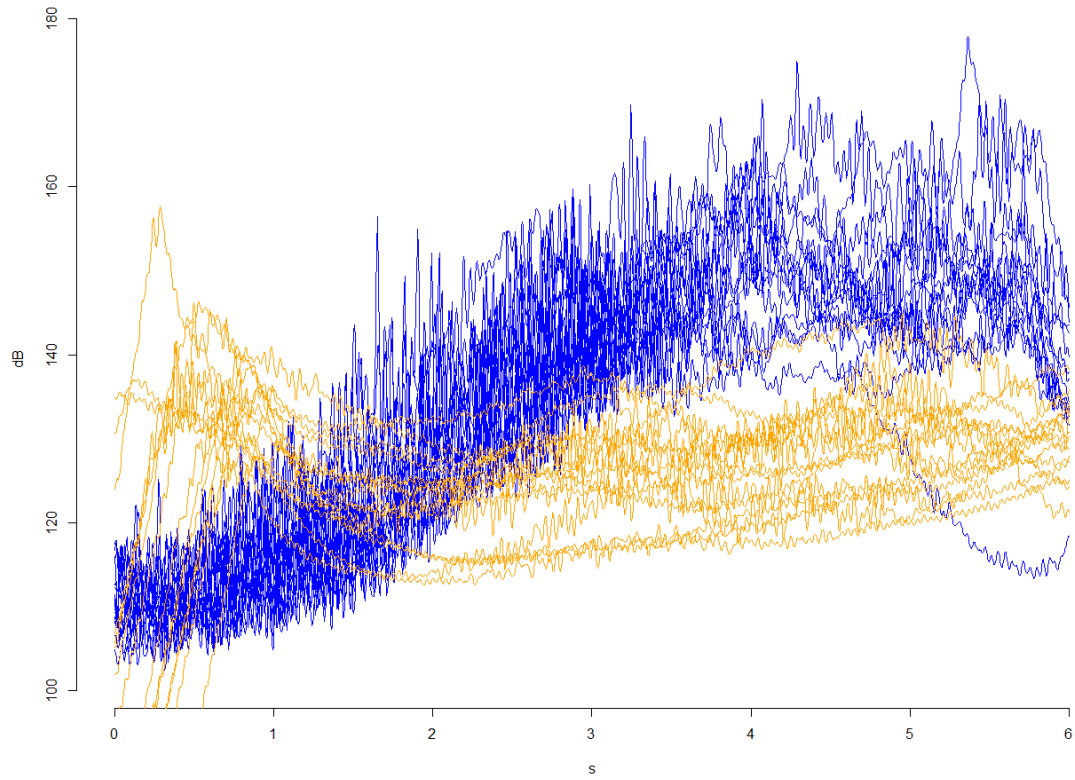


Figura A45 *WEGR1LSH.*

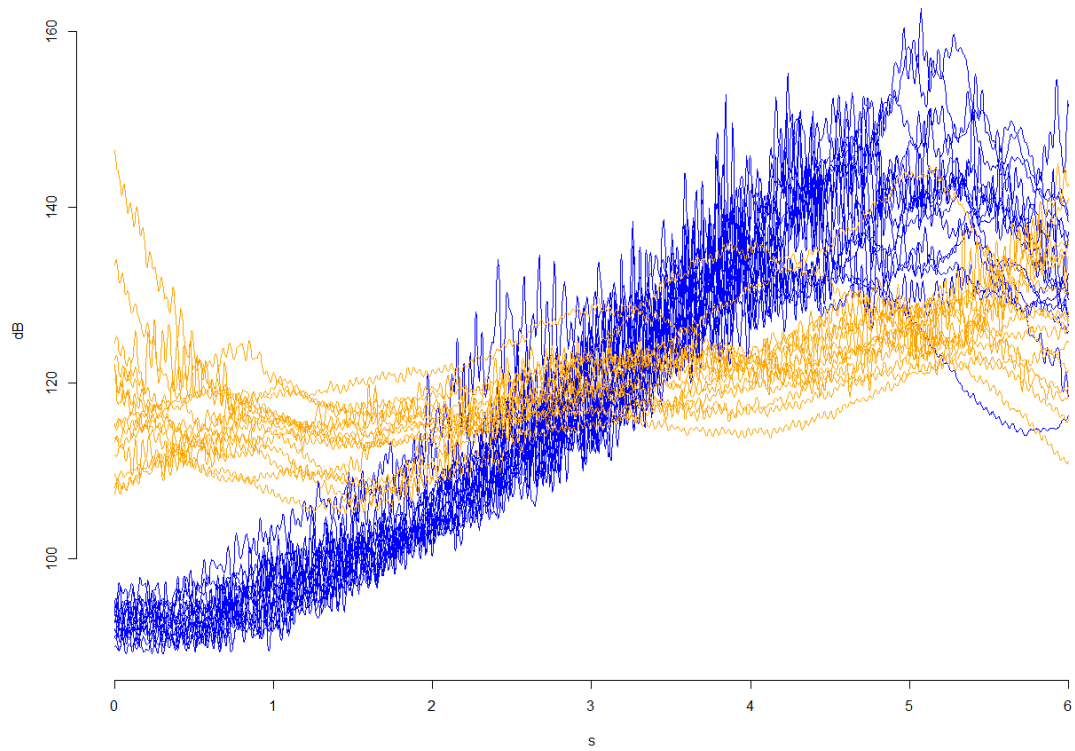


Figura A46 *WEGR1USH.*

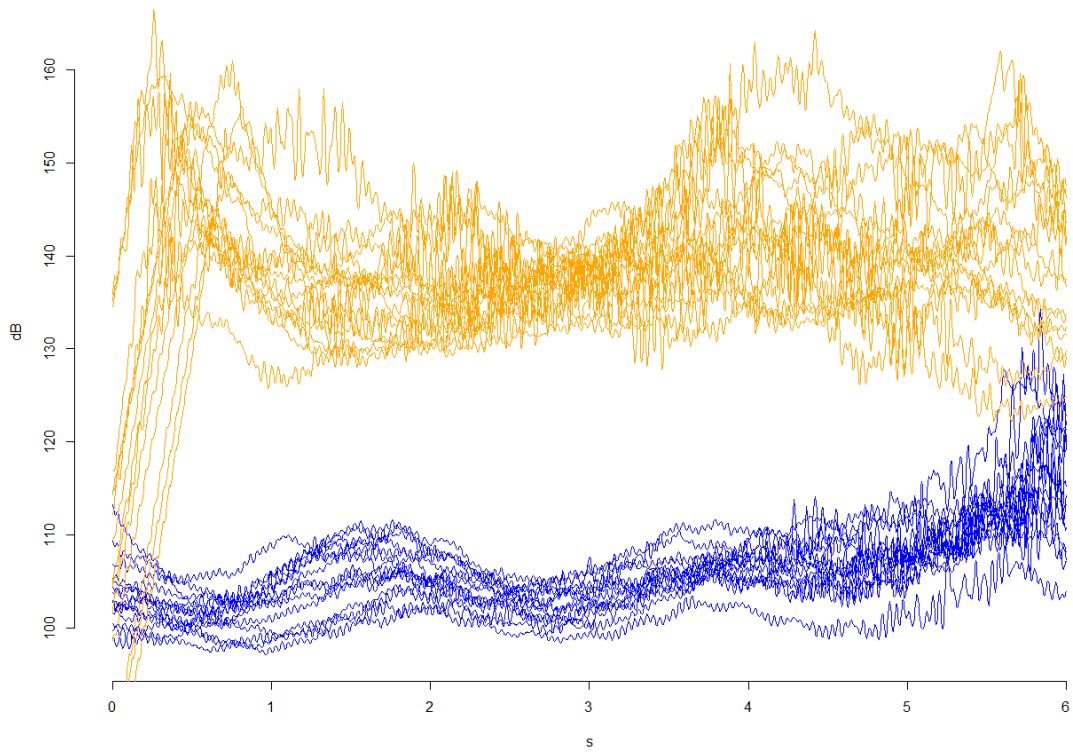


Figura A47 *WEGR5LSH.*

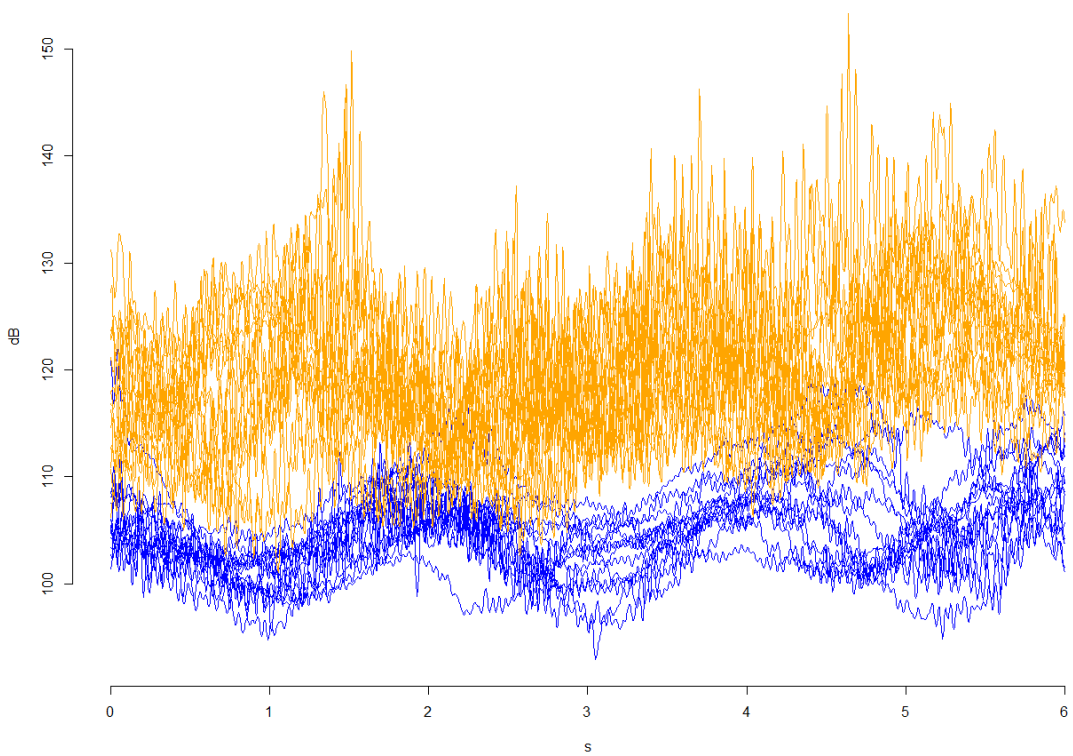


Figura A48 *WEGR5USH.*

A.1.4 Comparación de los armónicos

Se diferencian los armónicos con distintos colores tal que así:

- **Banda superior (USH)**: Color Azul.
- **Banda inferior (LSH)**: Color Rojo.

A continuación se expondrán todas las gráficas correspondientes a este apartado:

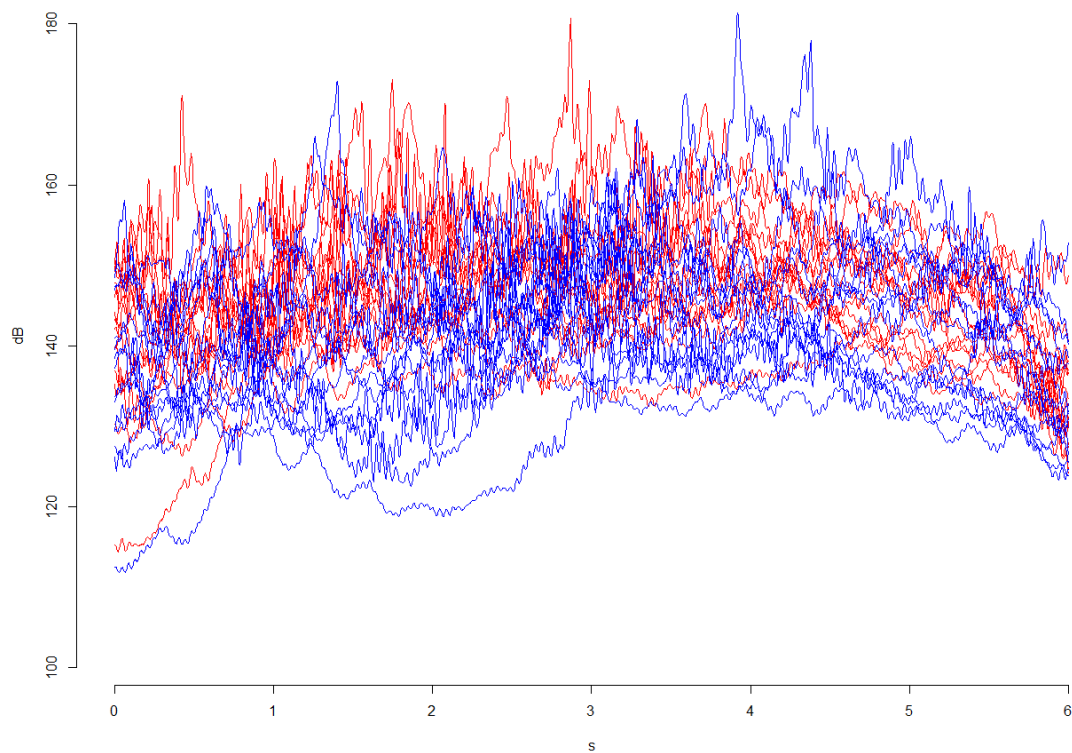


Figura A49 ABR1NC1.

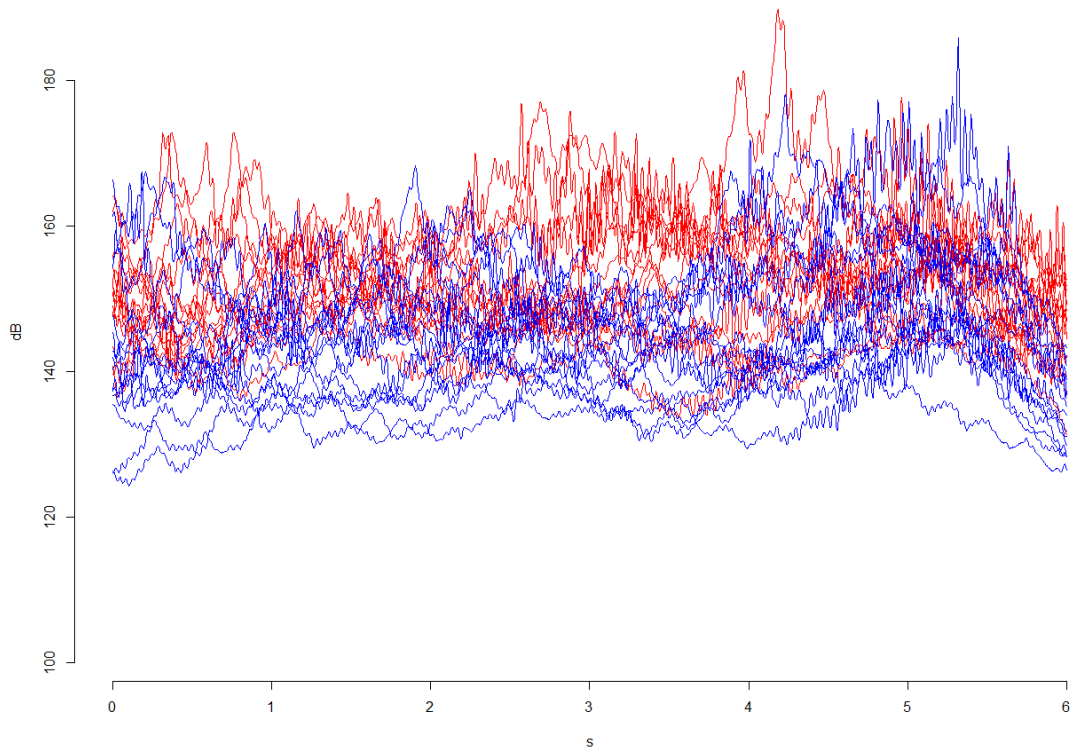


Figura A50 *ABR1NC2*.

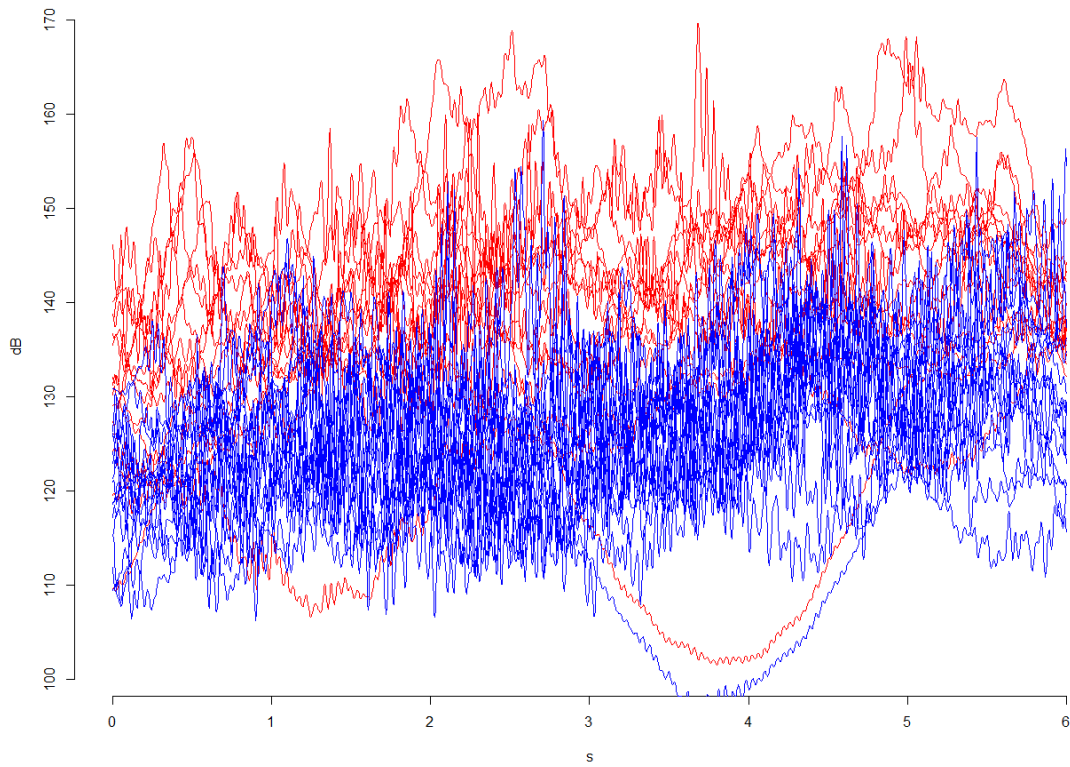


Figura A51 *ABR5NC1*.

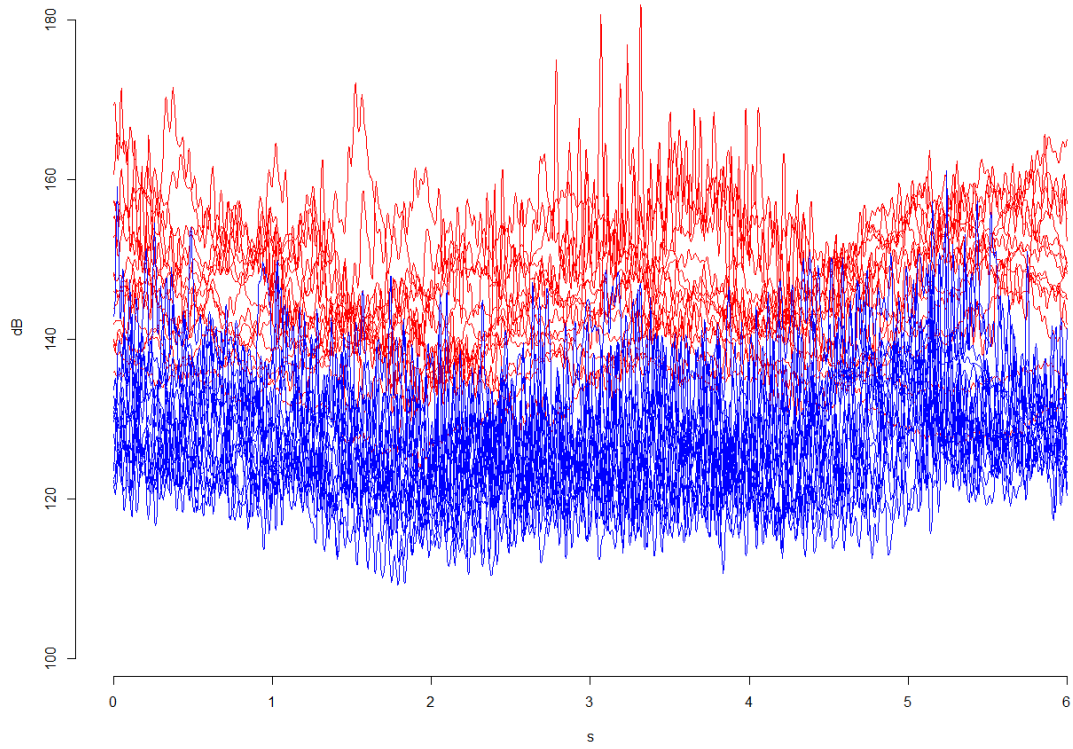


Figura A52 *ABR5NC2*.

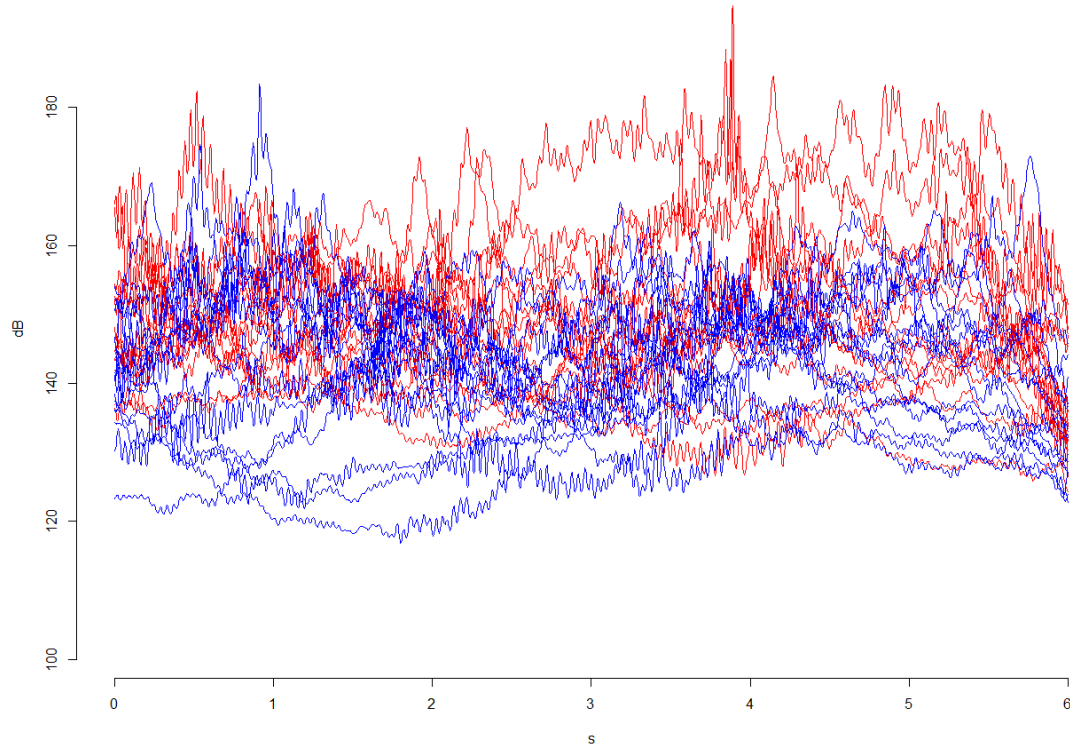


Figura A53 *ABBR1NC1*.

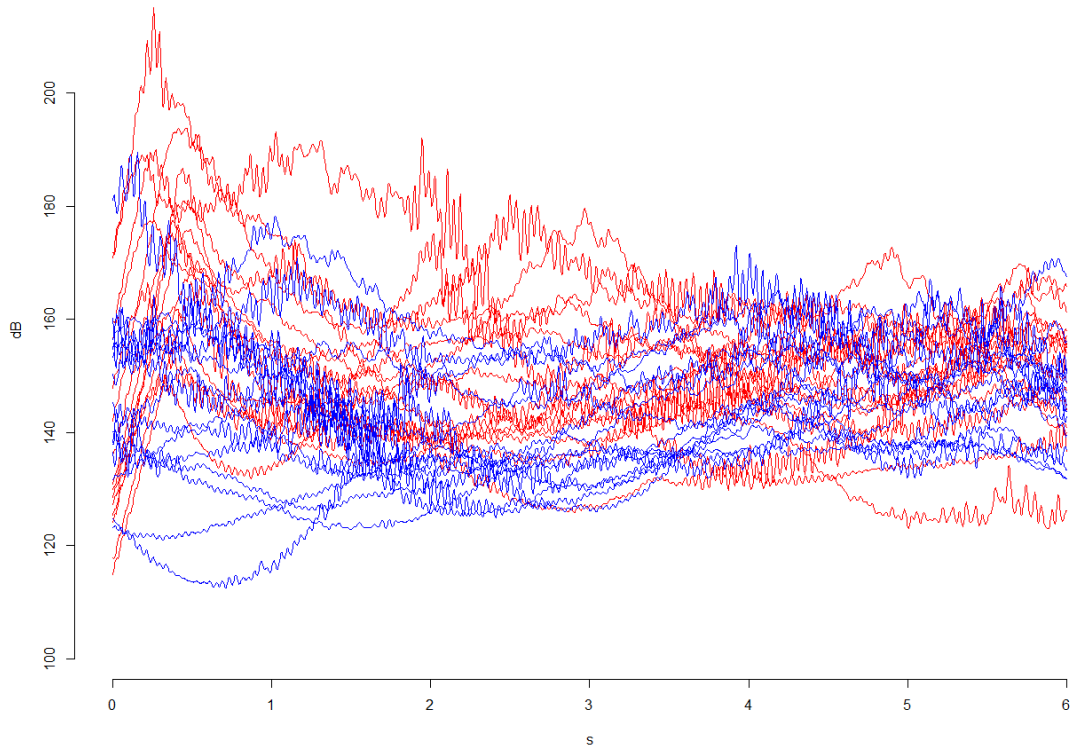


Figura A54 ABBR1NC2.

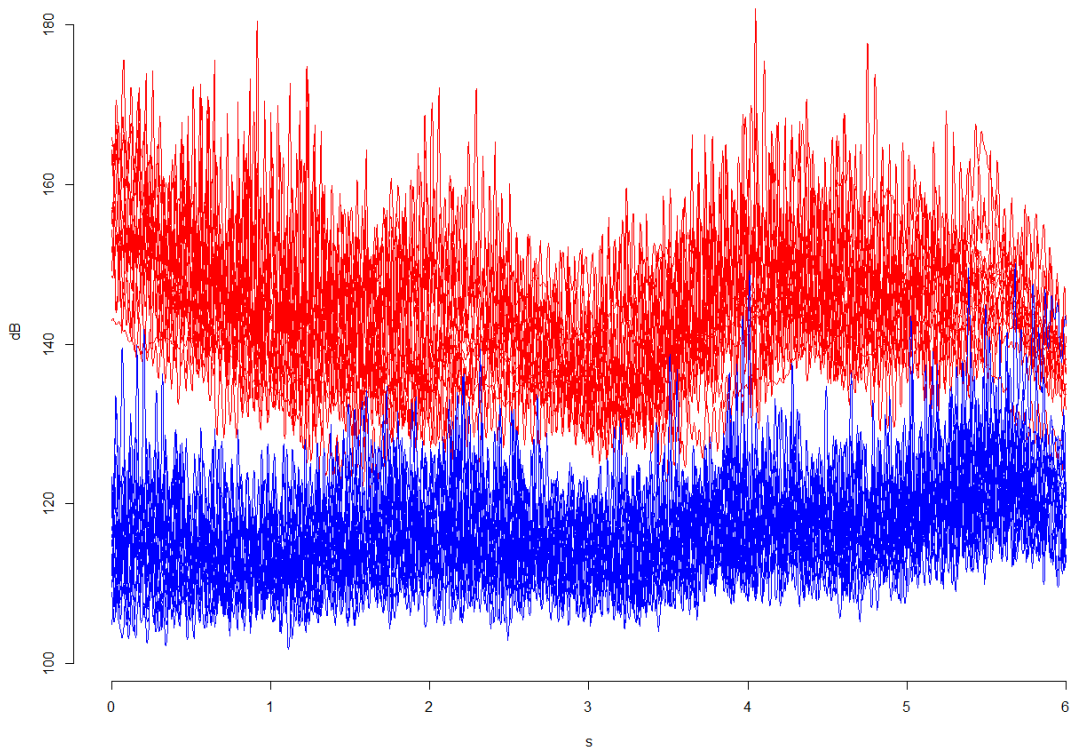


Figura A55 ABBR5NC1.

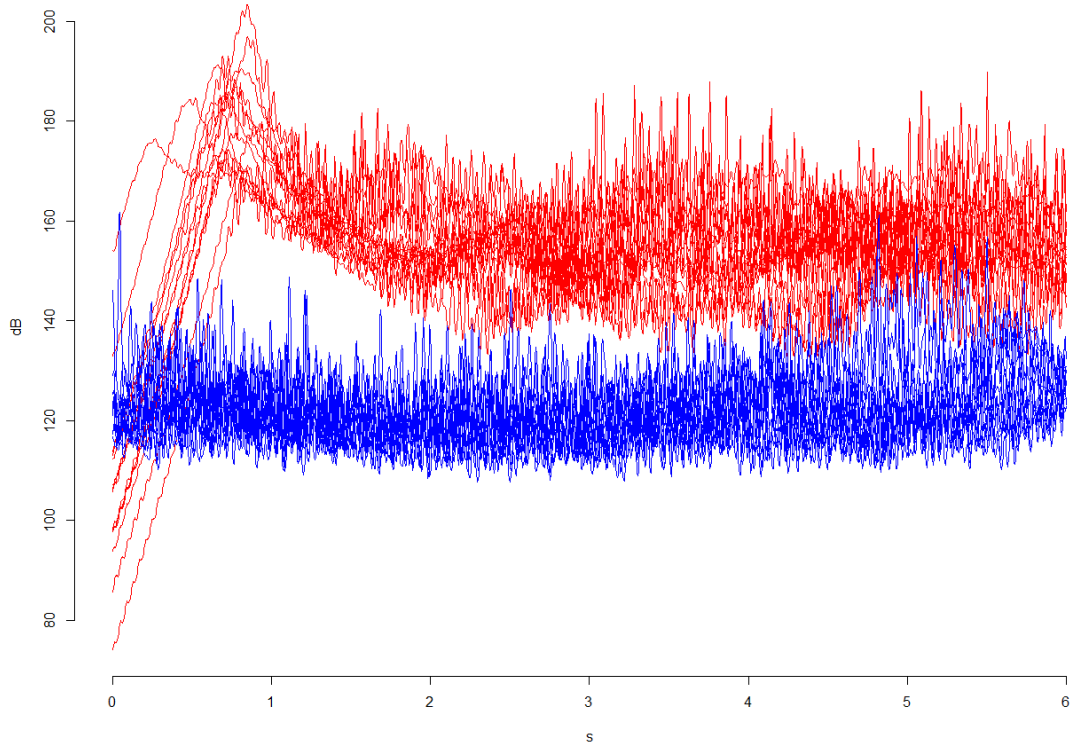


Figura A56 *ABBR5NC2*.

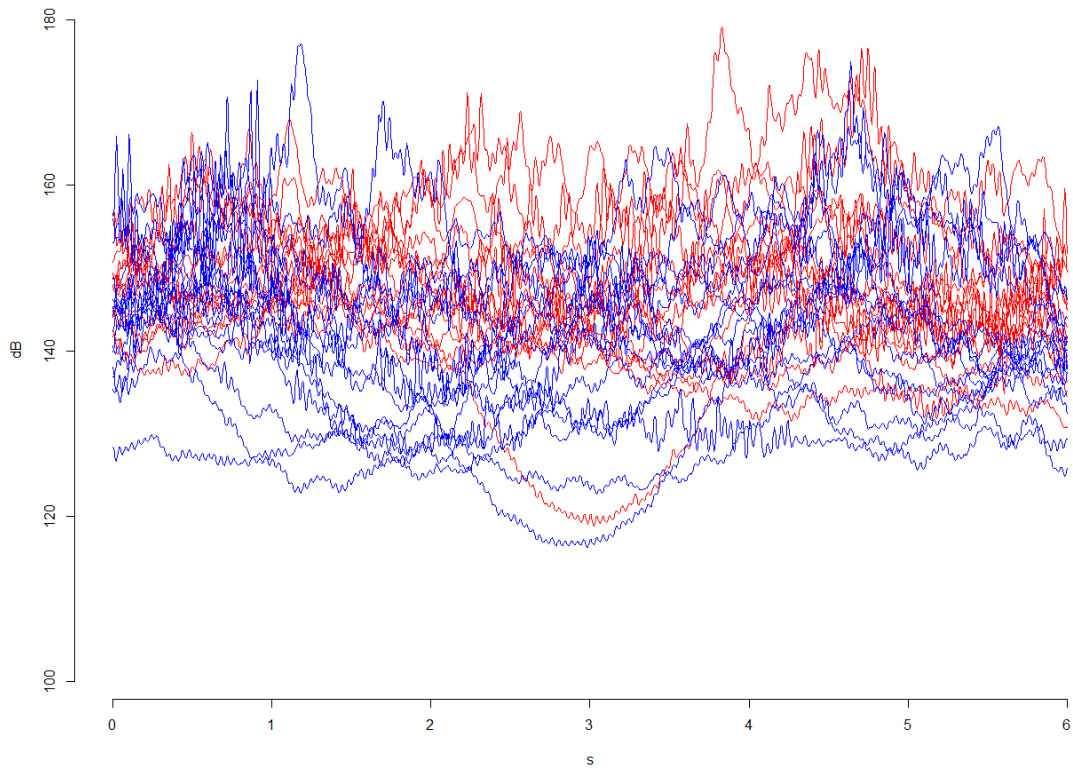


Figura A57 *SIER1NC1*.

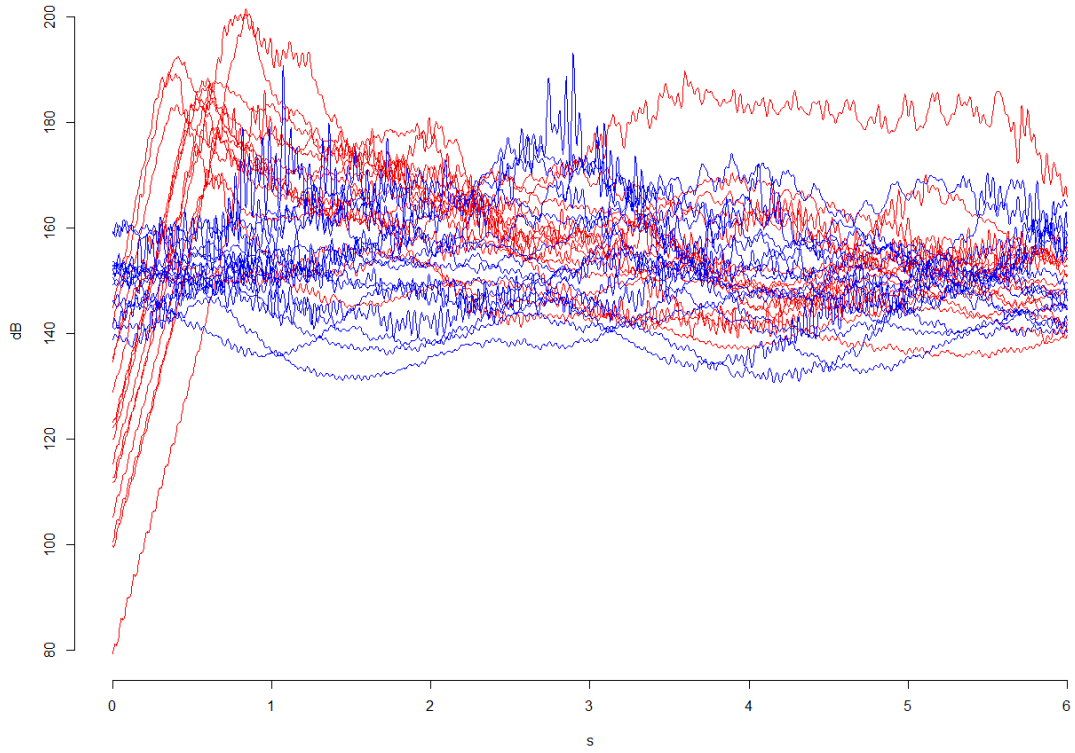


Figura A58 *SIER1NC2*.

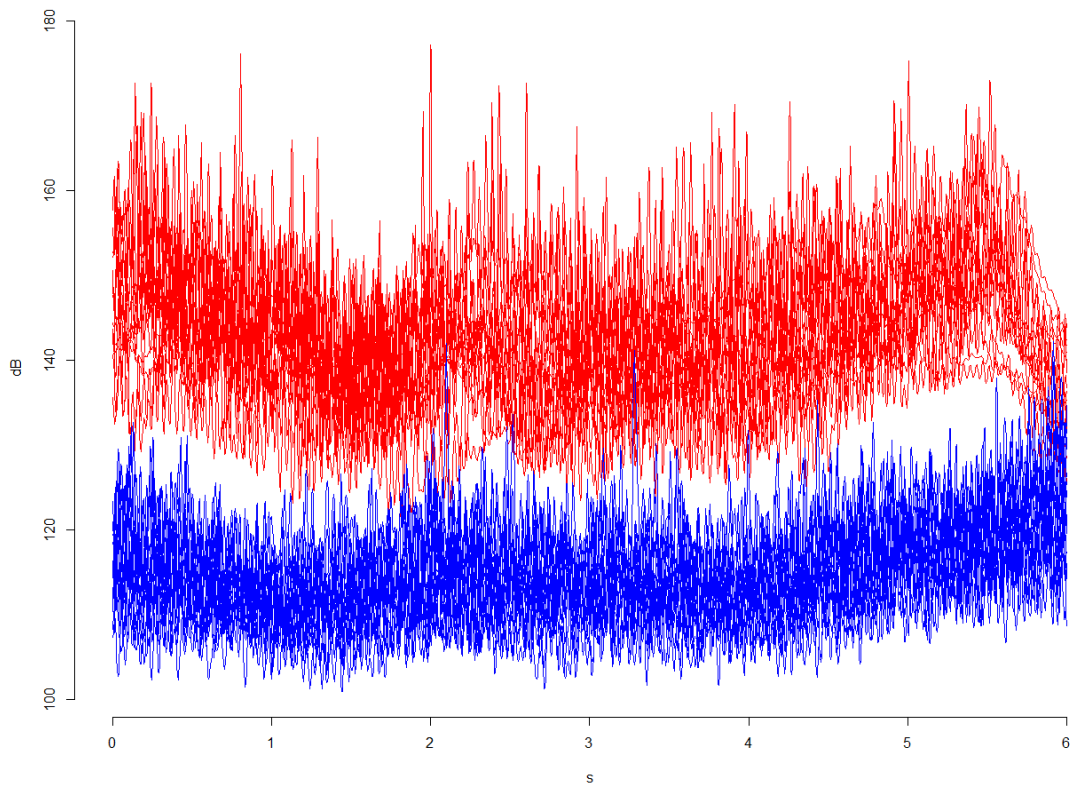


Figura A59 *SIER5NC1*.

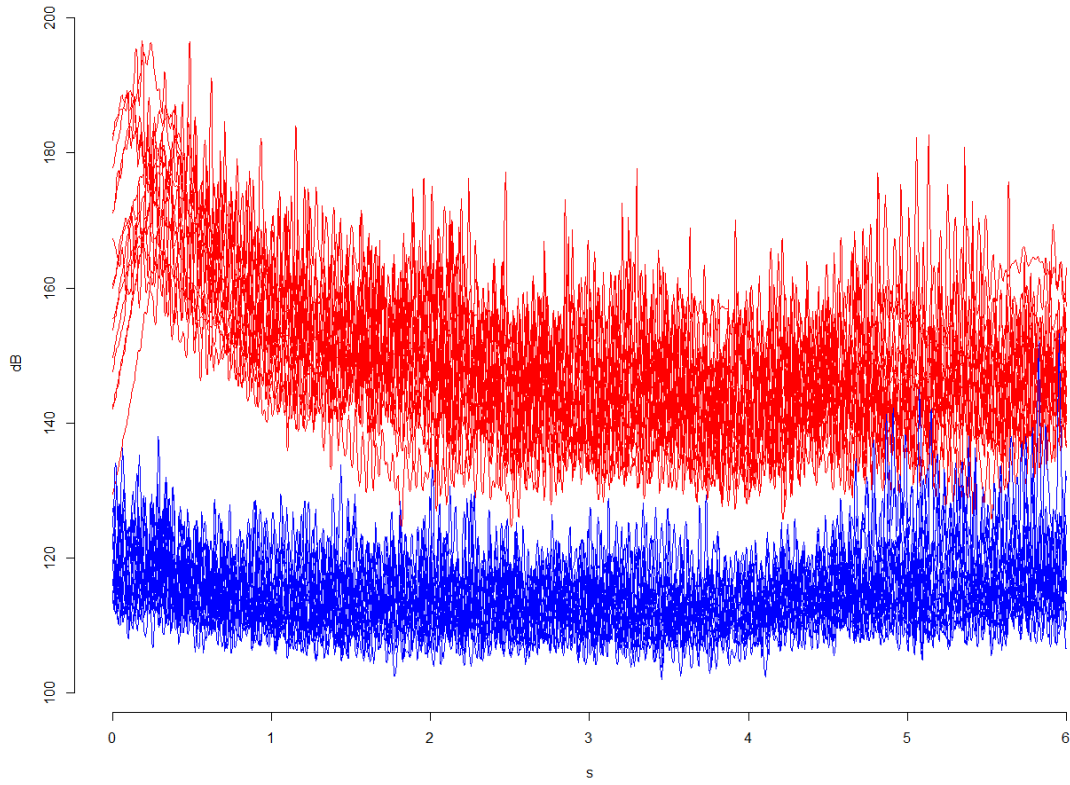


Figura A60 *SIER5NC2*.

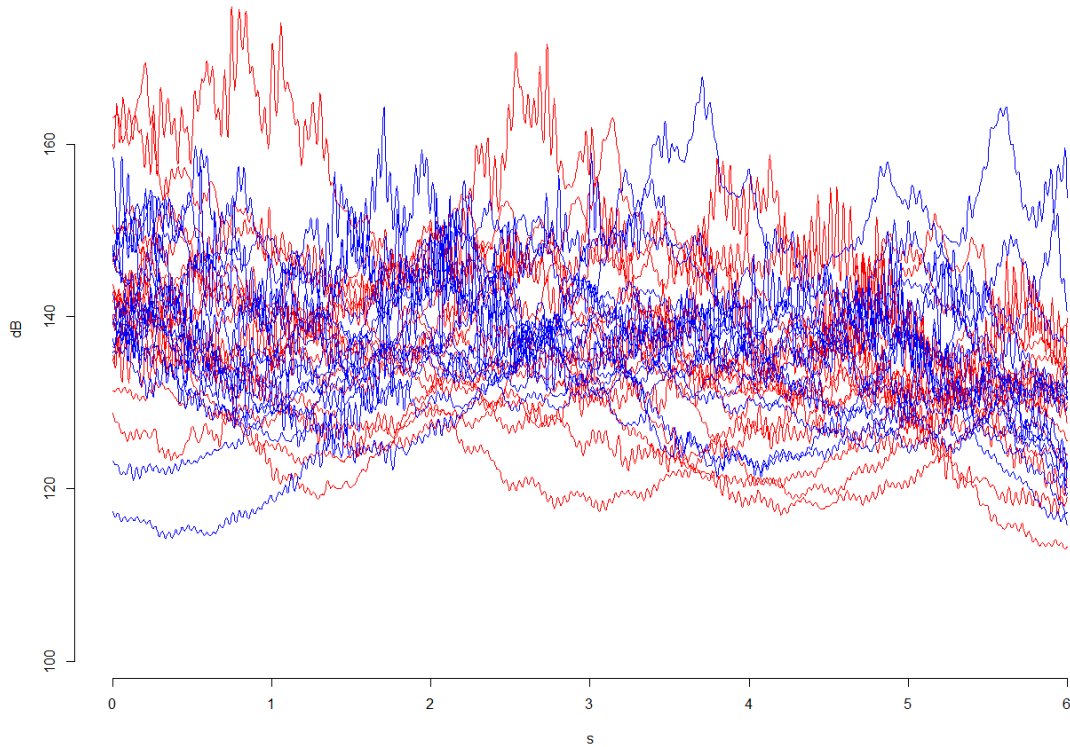


Figura A61 *TMR1NC1*.

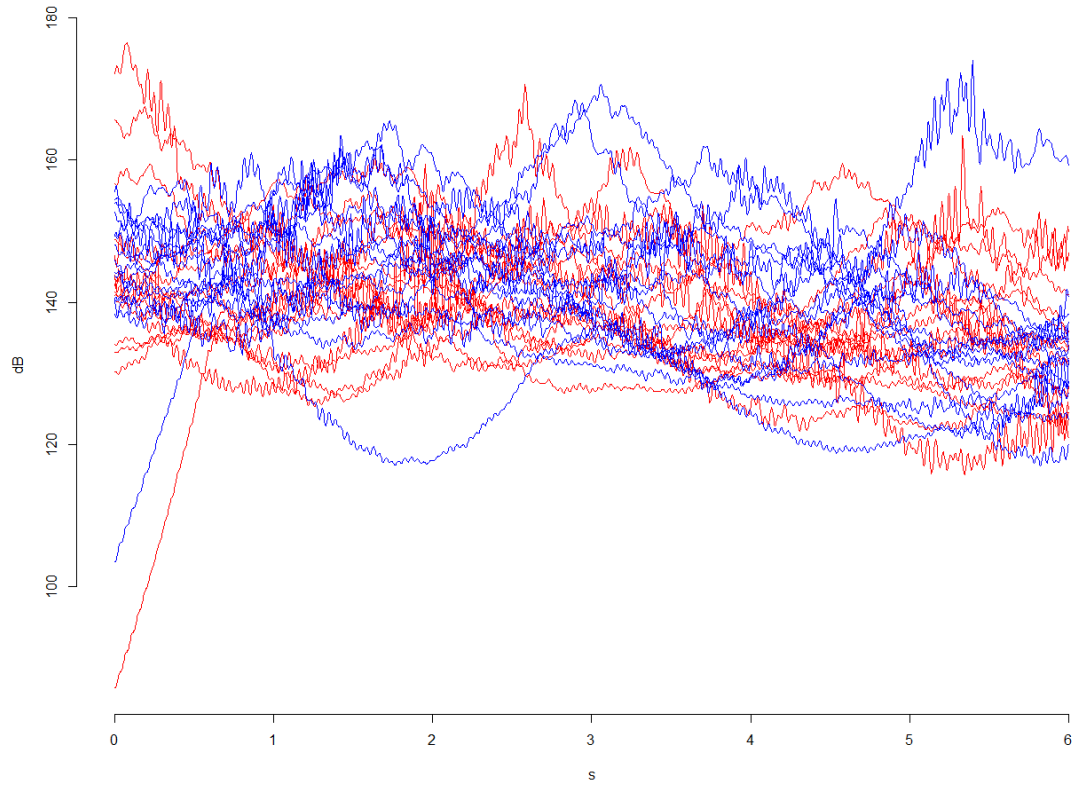


Figura A62 TMR1NC2.

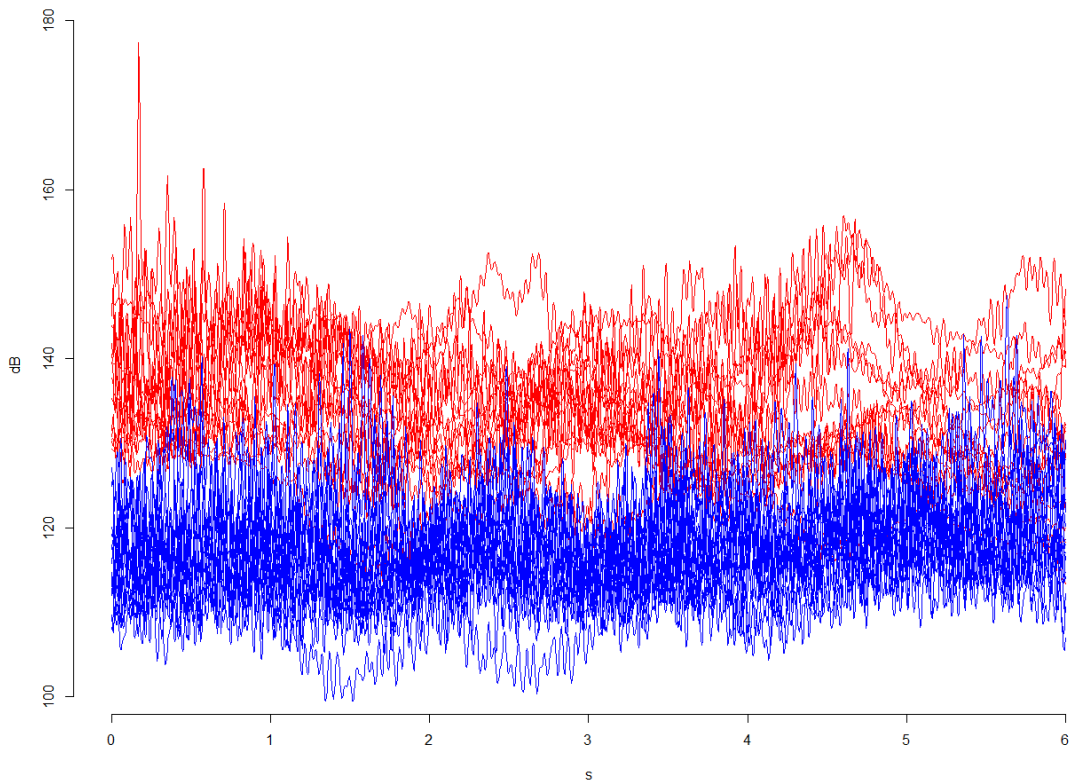


Figura A63 TMR5NC1.

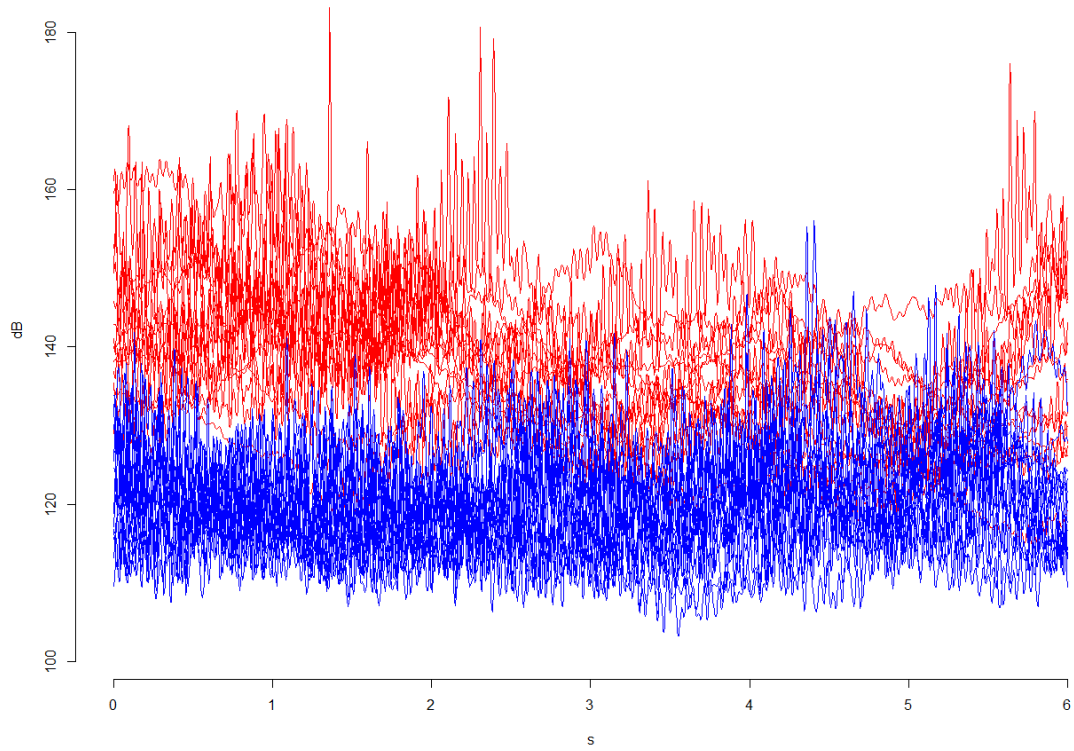


Figura A64 *TMR5NC2*.

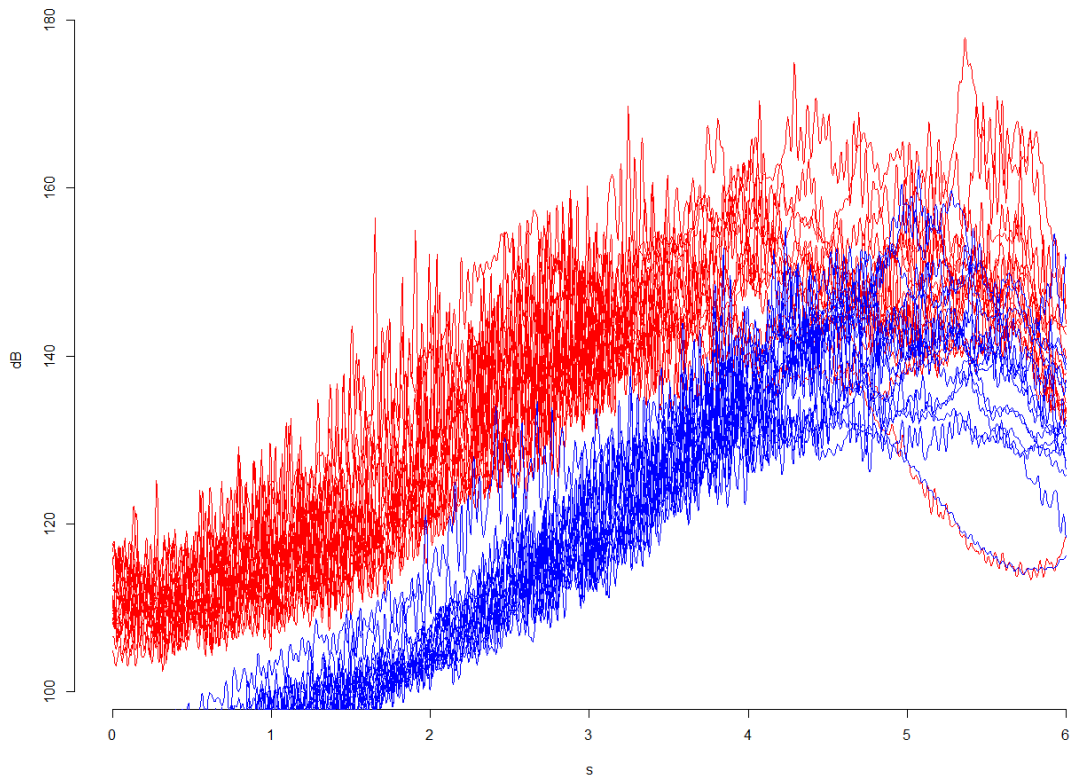


Figura A65 *WEGR1NC1*.

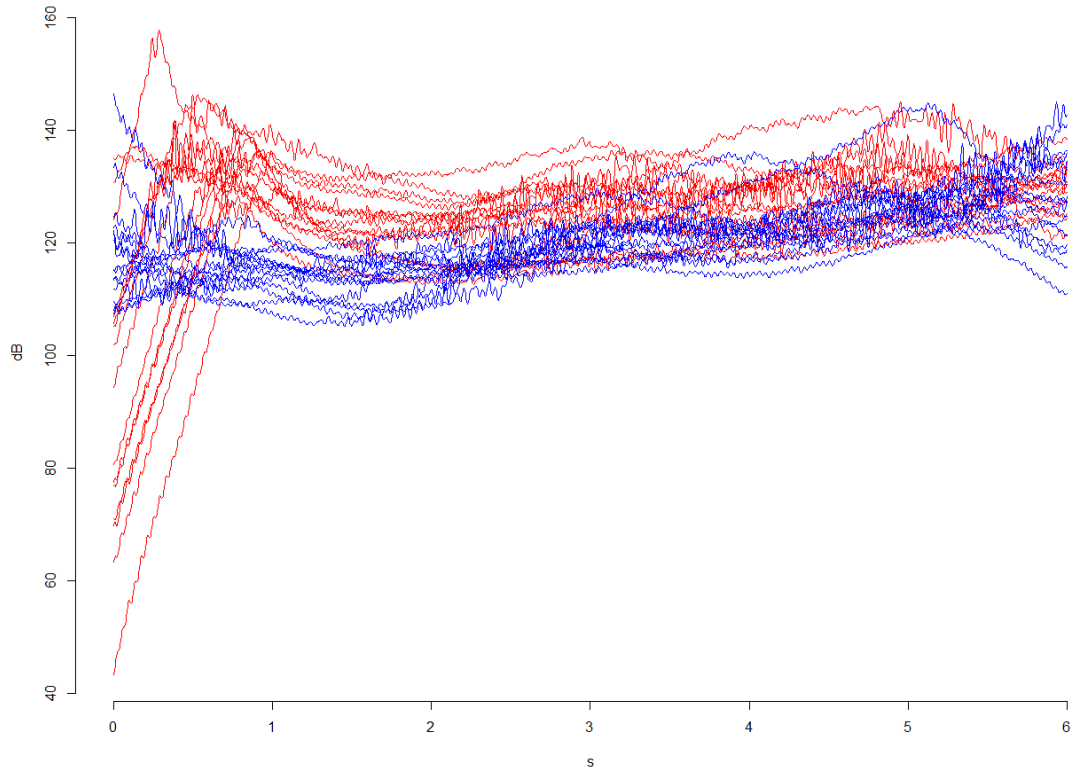


Figura A66 WEGR1NC2.

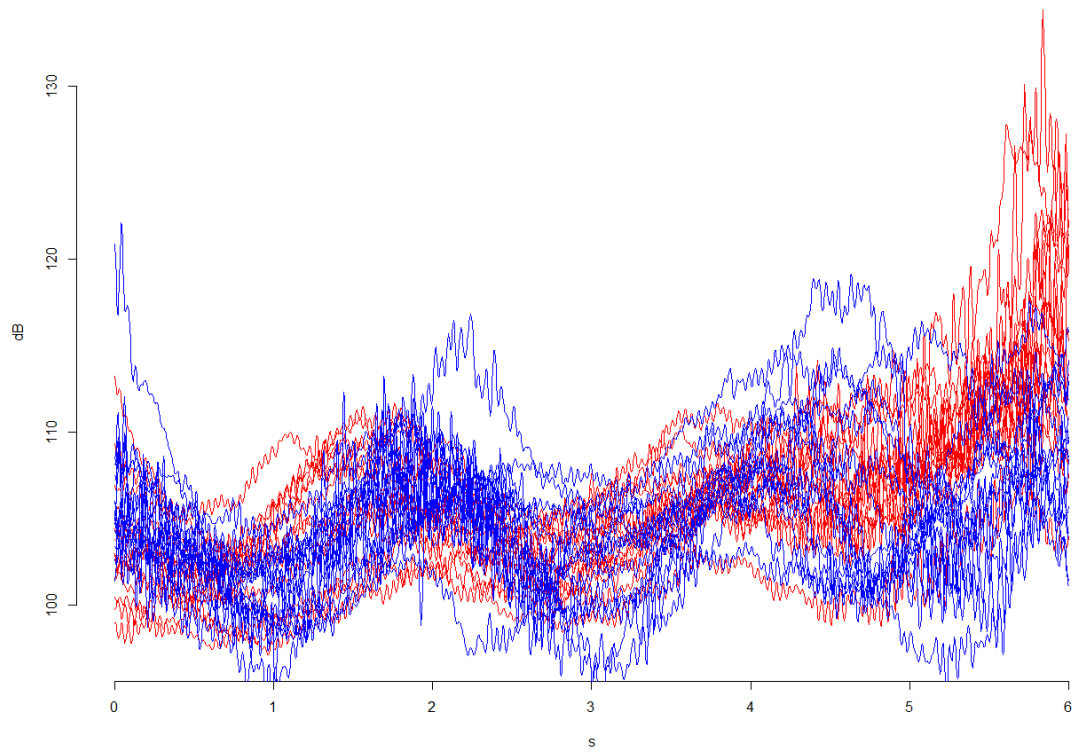


Figura A67 WEGR5NC1.

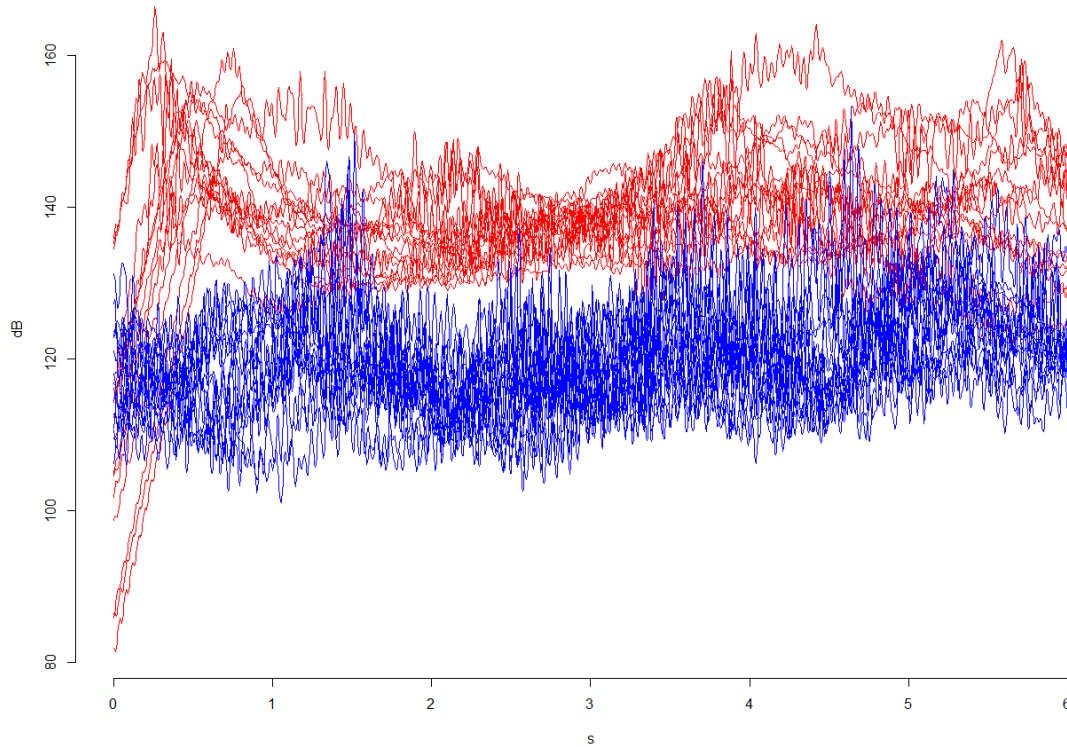


Figura A68 WEGR5NC2.

A.2 Boxplots funcionales

Como comentamos en el capítulo 5, en este apartado nos vamos a centrar exclusivamente en la comparación del estado del motor. También se diferencian en colores y coinciden con los del apartado anterior:

- **Motor sano (R1):** Color Verde.
- **Motor con la barra del rotor rota (R5):** Color Rojo.

A continuación se expondrán todas las gráficas correspondientes a este apartado:

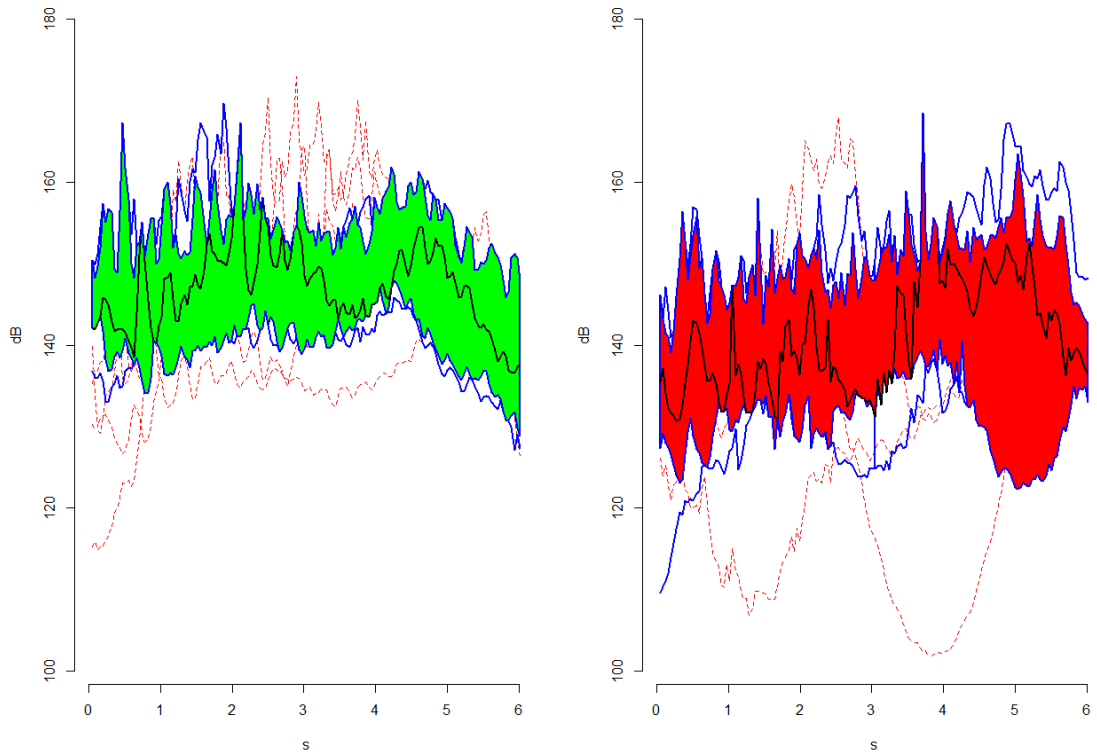


Figura A69 ABNC1LSH.

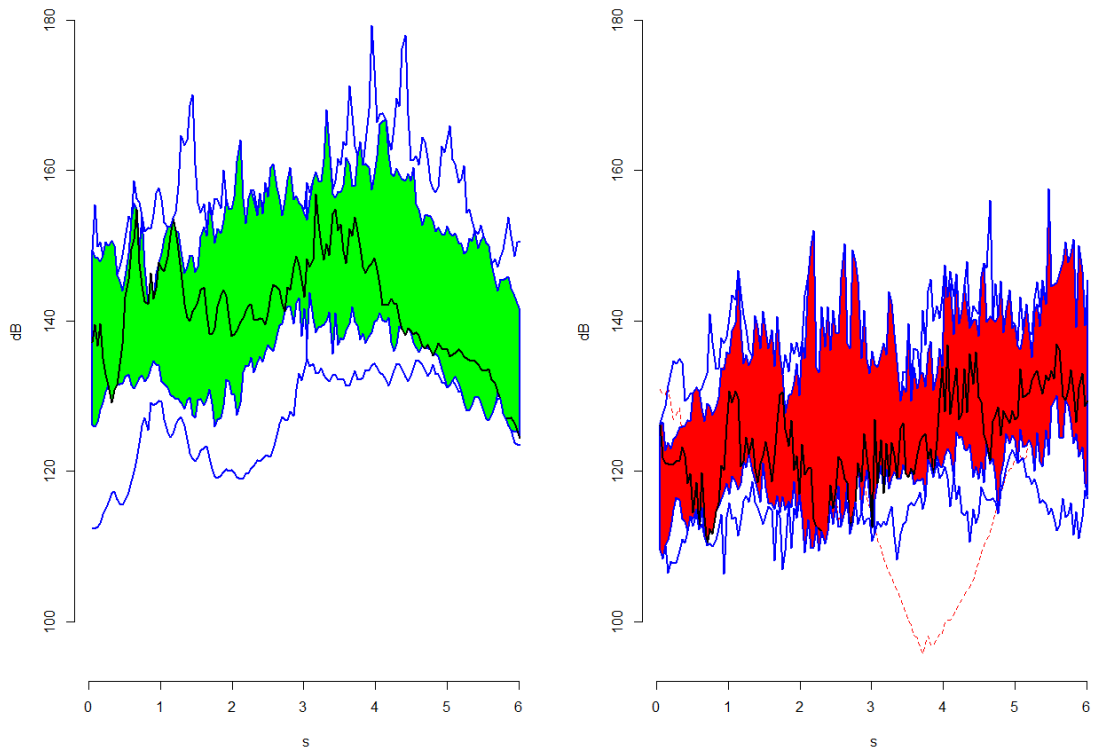


Figura A70 ABNC1USH.

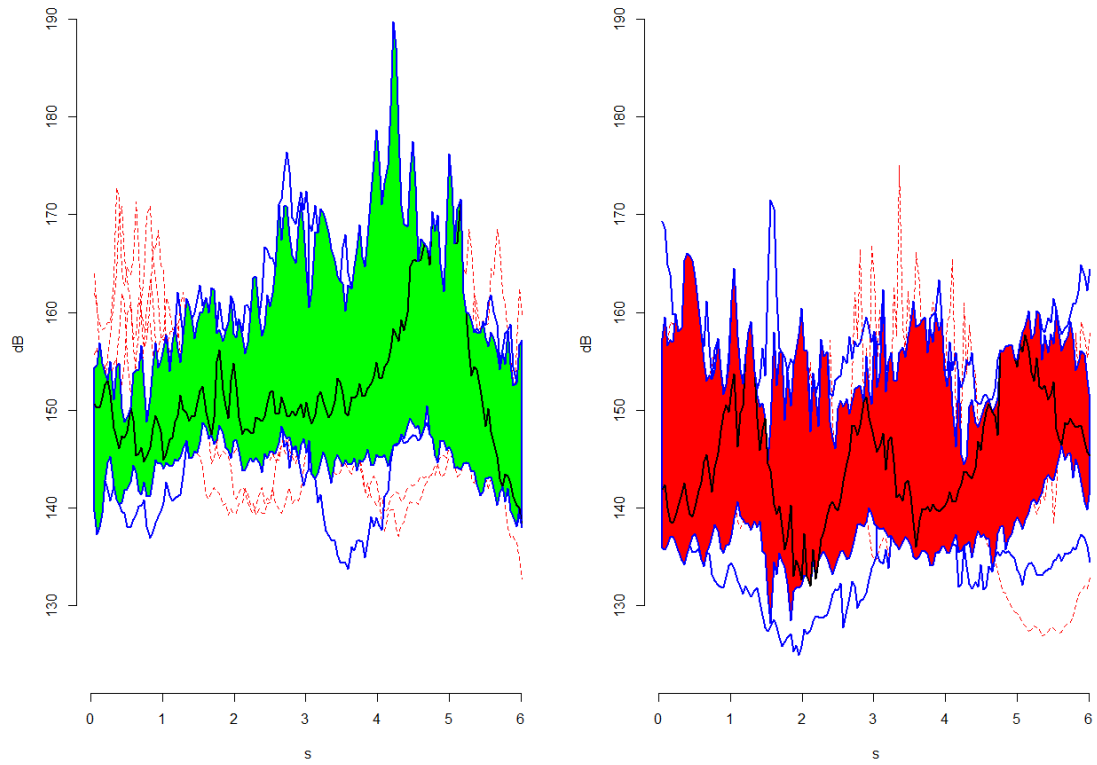


Figura A71 ABNC2LSH.

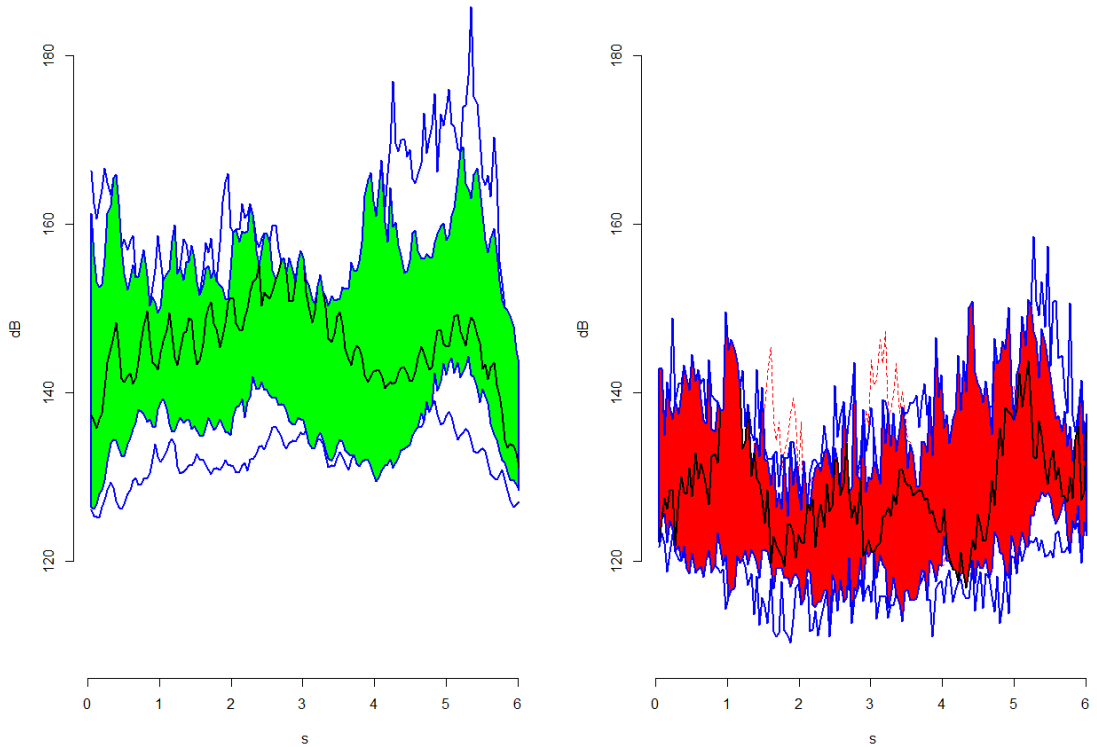


Figura A72 ABNC2USH.

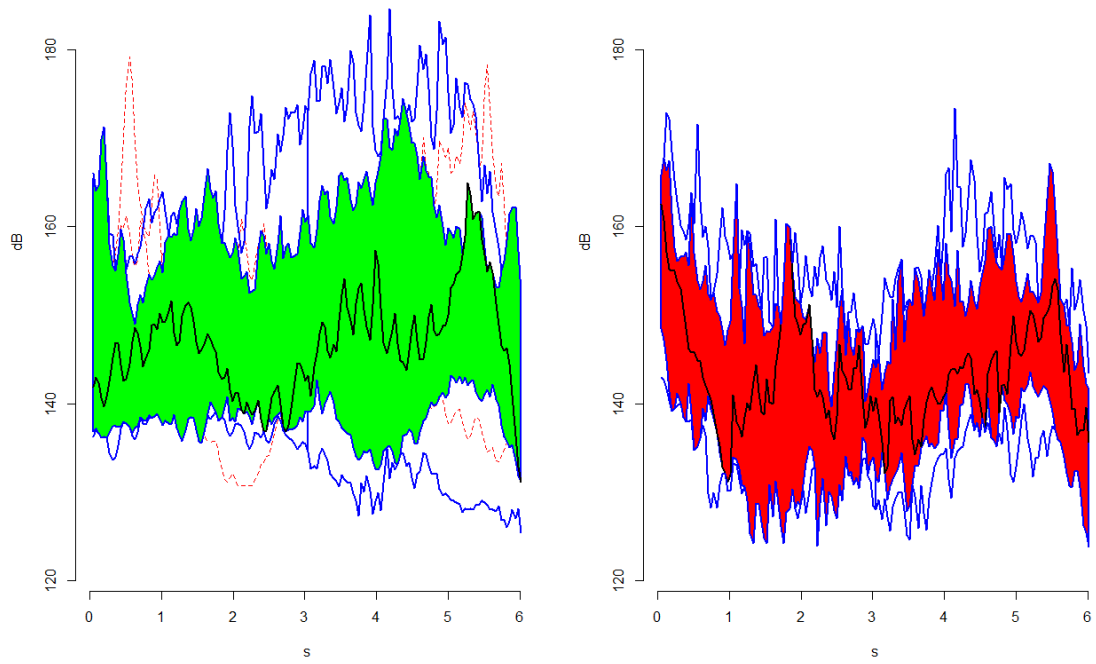


Figura A73 ABBNC1LSH.

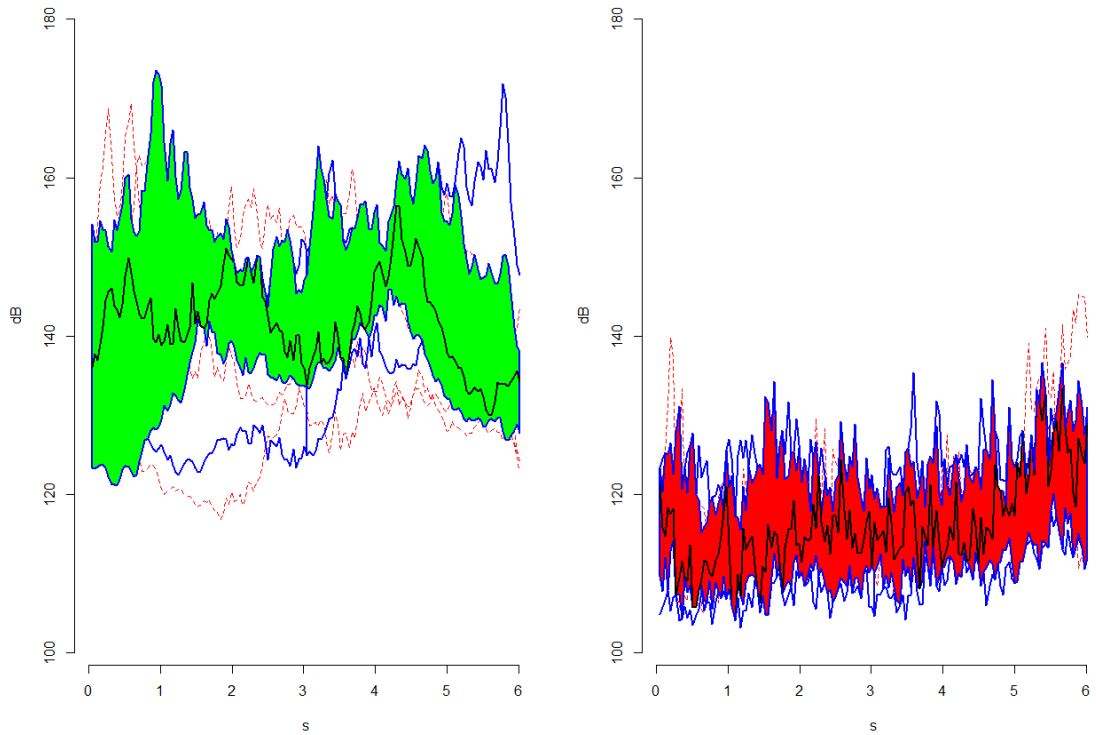


Figura A74 ABBNC1USH.

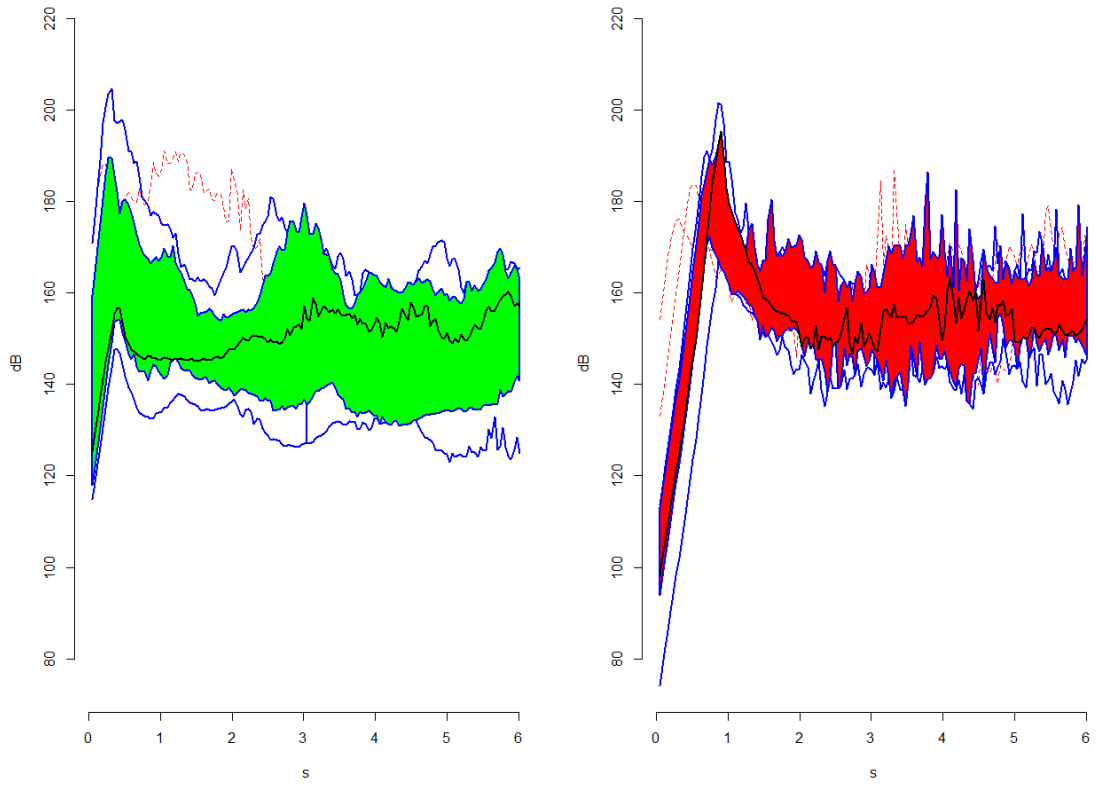


Figura A75 ABBNC2LSH.

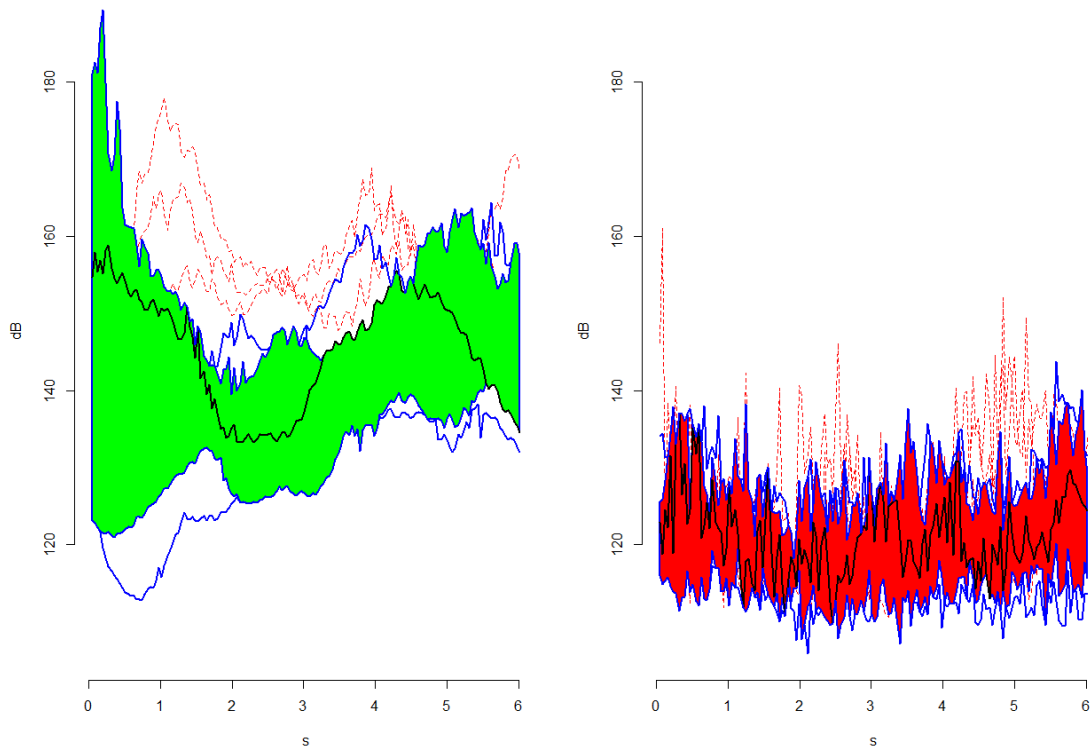


Figura A76 ABBNC2USH.

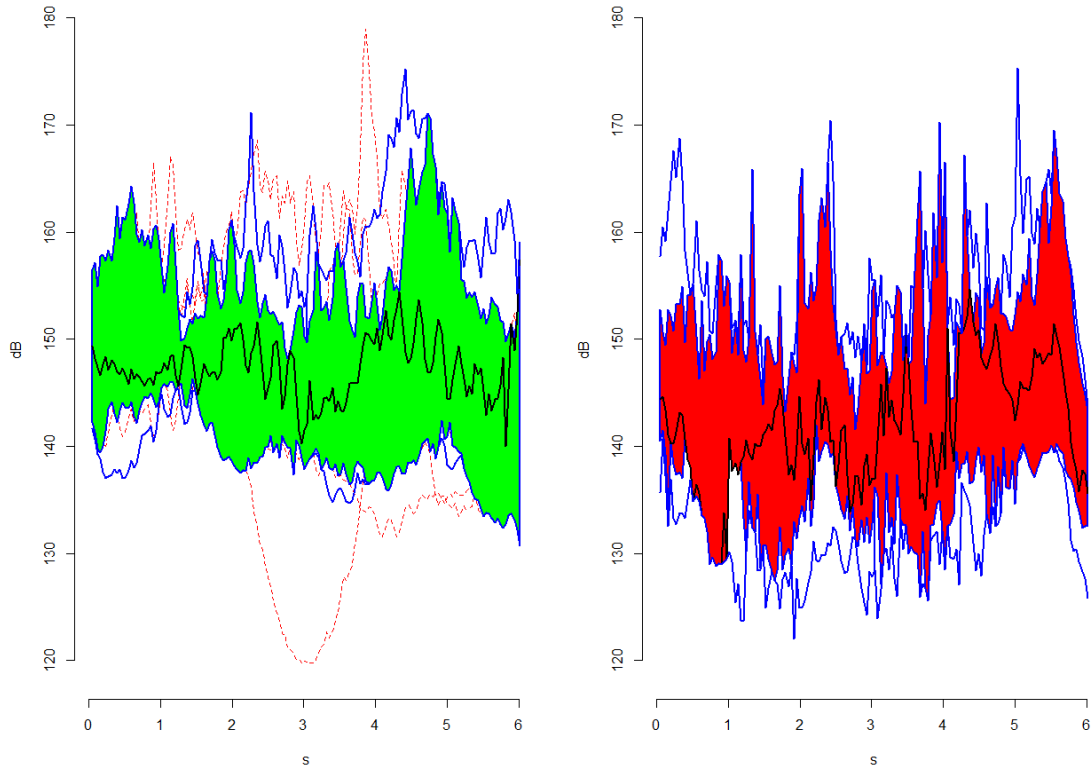


Figura A77 SIENC1LSH.

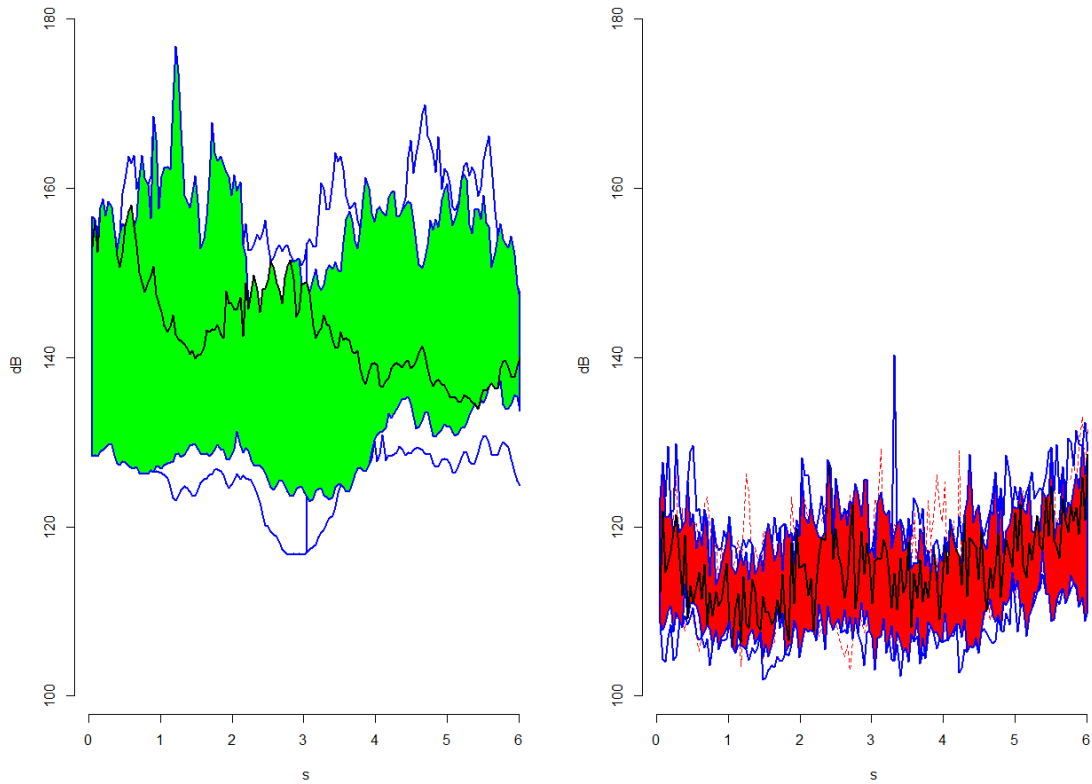


Figura A78 SIENC1USH.

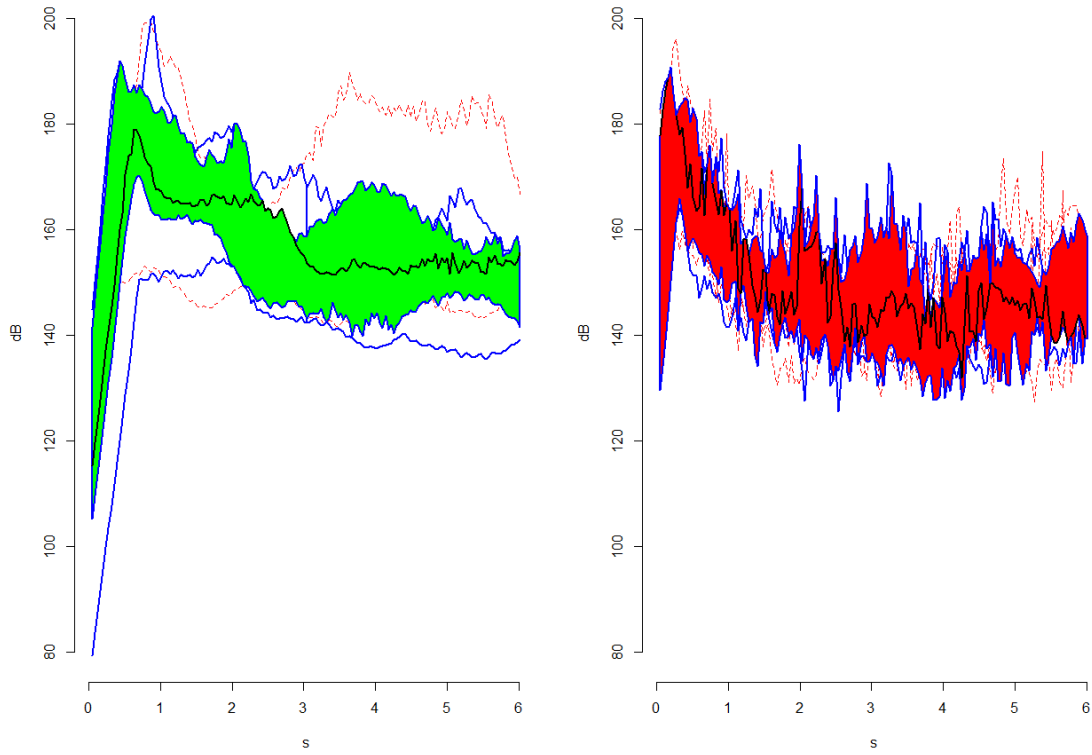


Figura A79 SIENC2LSH.

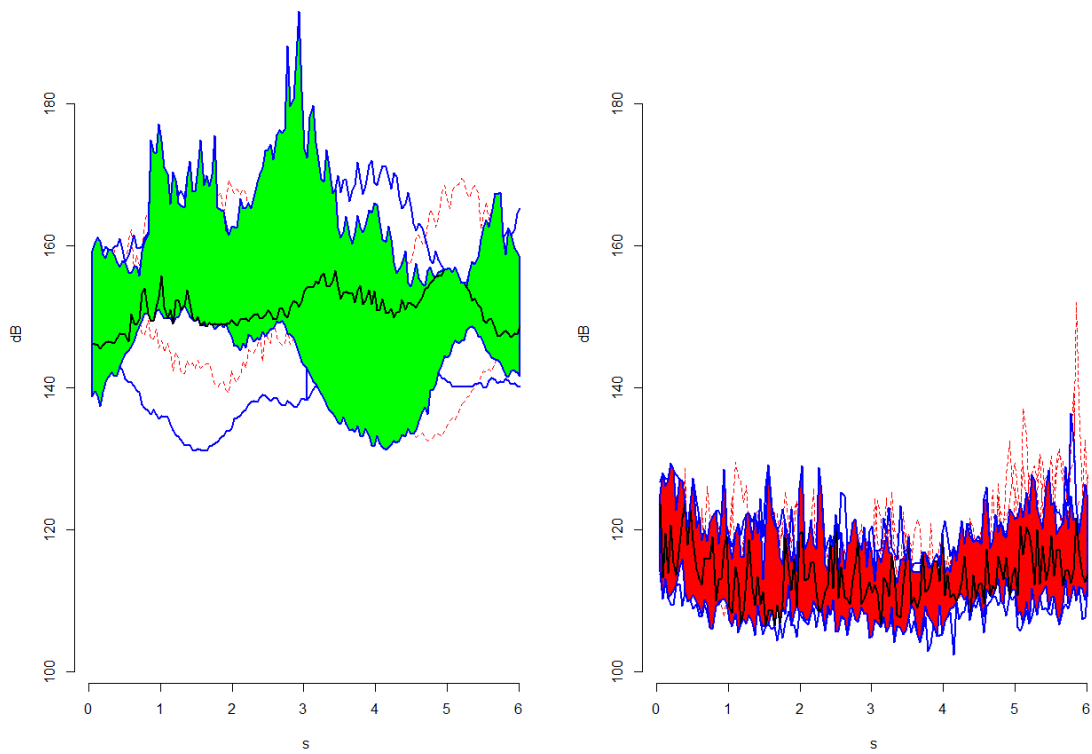


Figura A80 SIENC2USH.

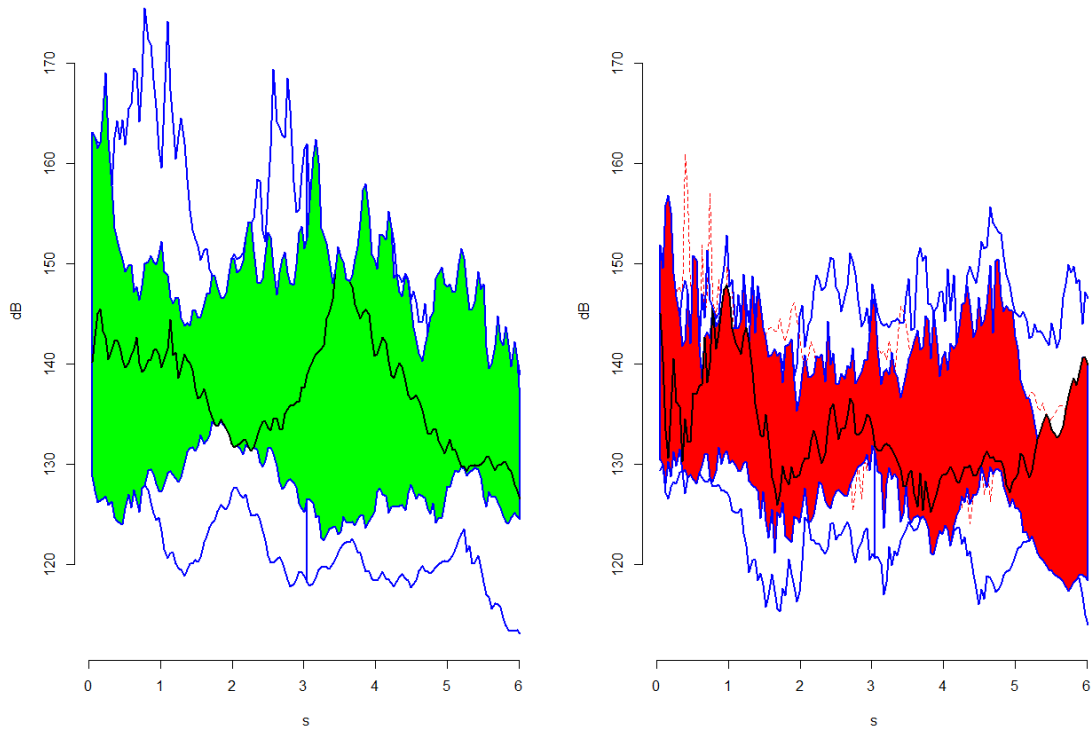


Figura A81 *TMNC1LSH*.

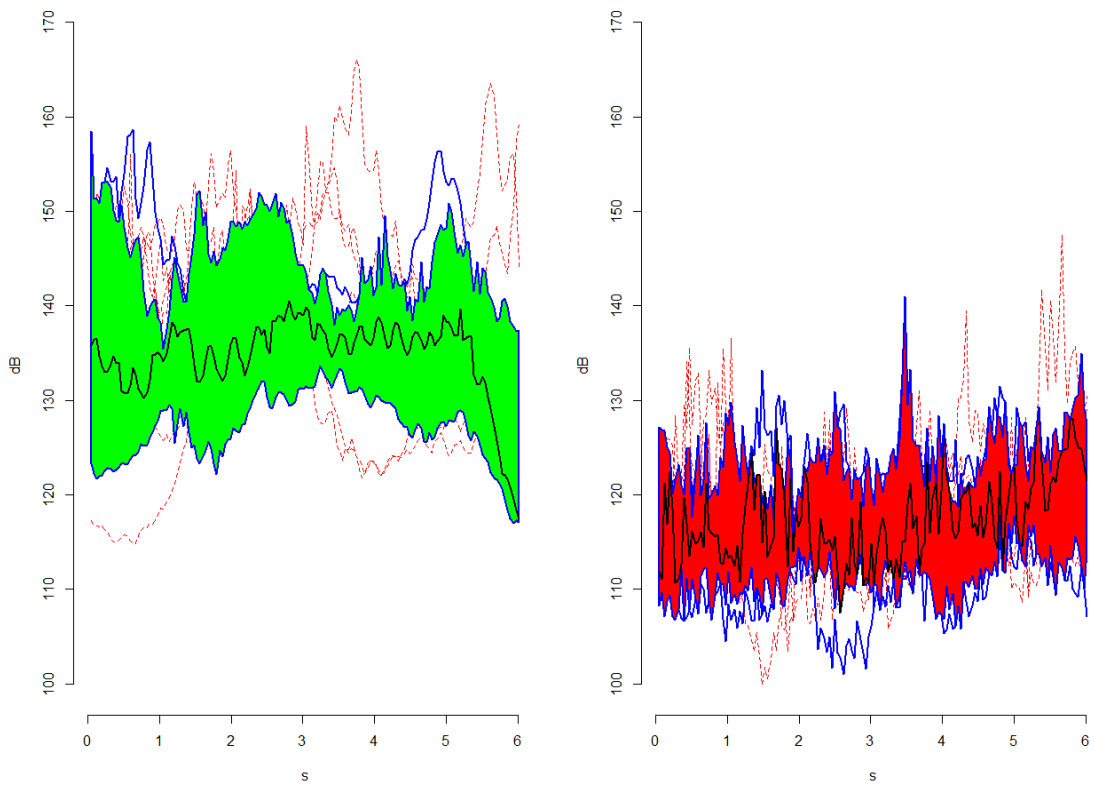


Figura A82 *TMNC1USH*.

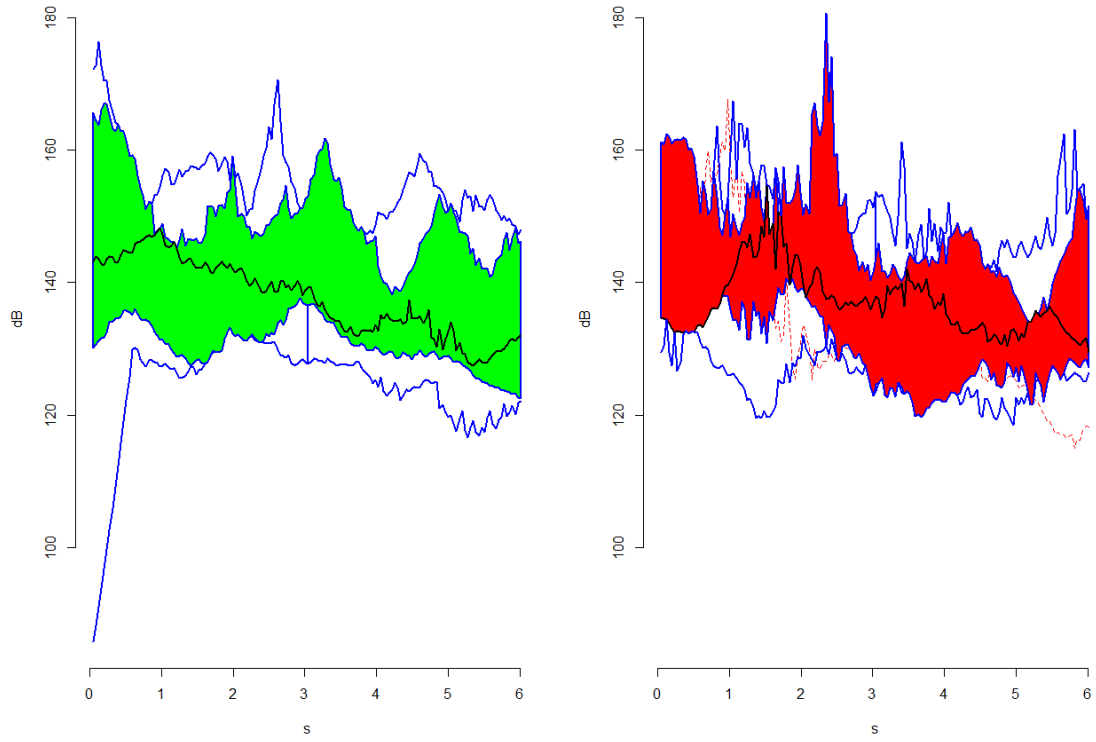


Figura A83 *TMNC2LSH*.

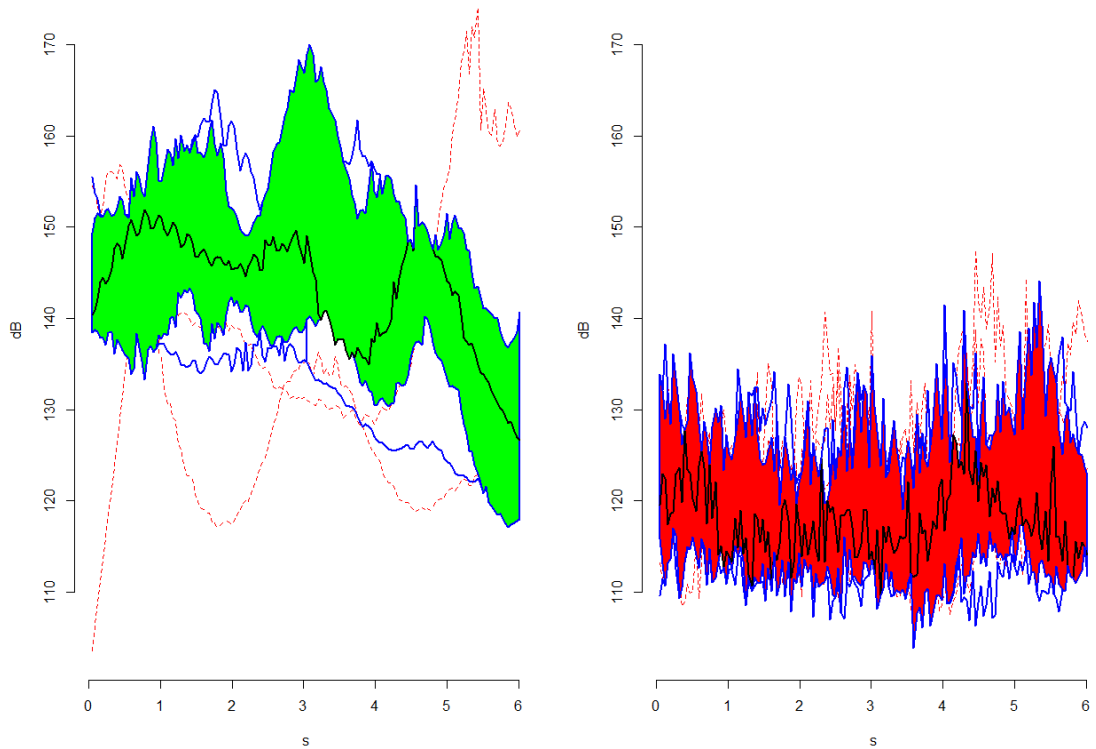


Figura A84 *TMNC2USH*.

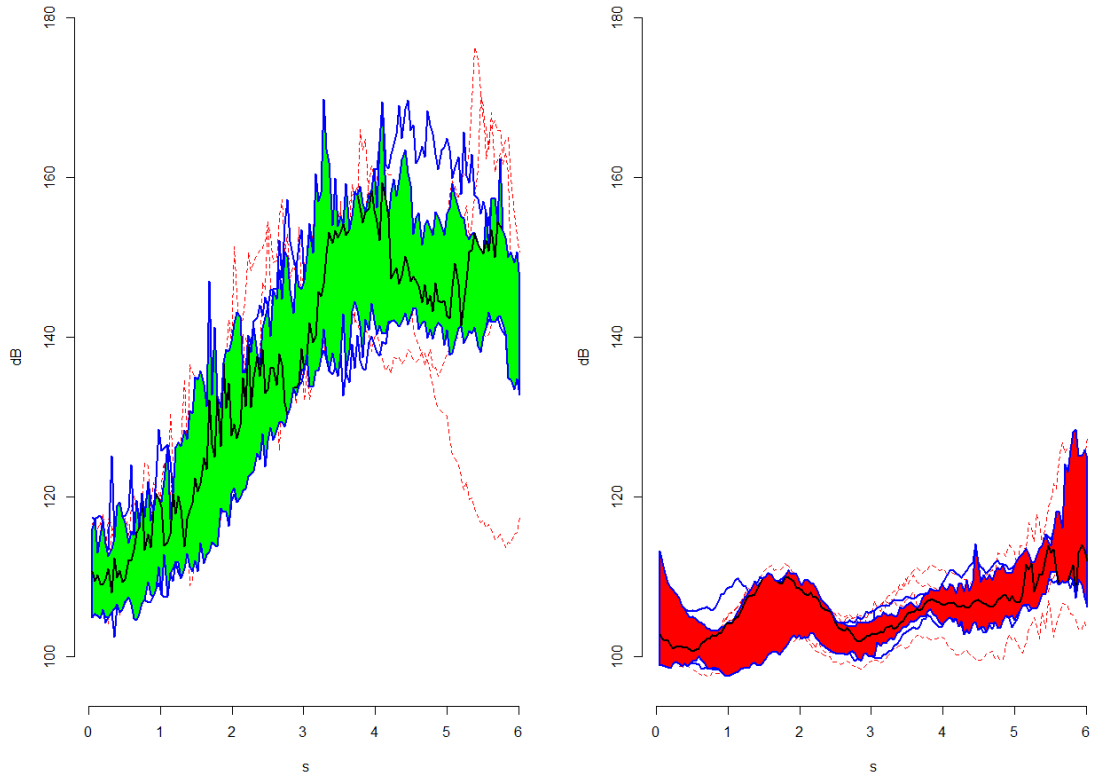


Figura A85 WEGNC1LSH.

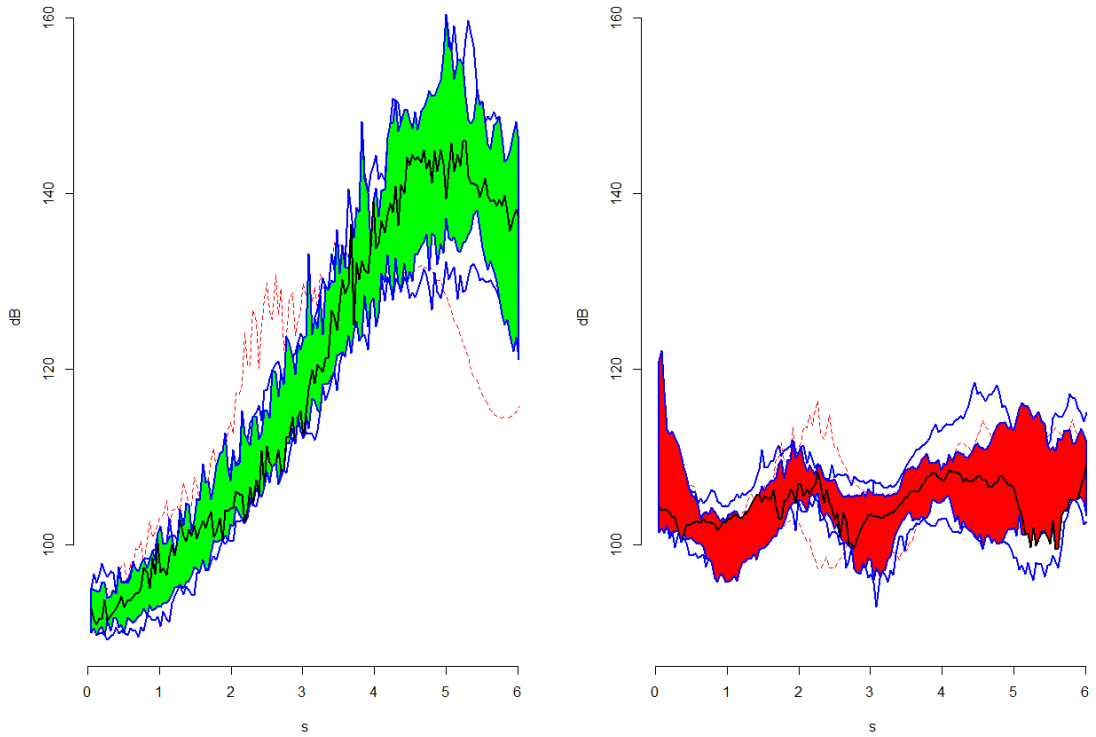


Figura A86 WEGNC1USH.

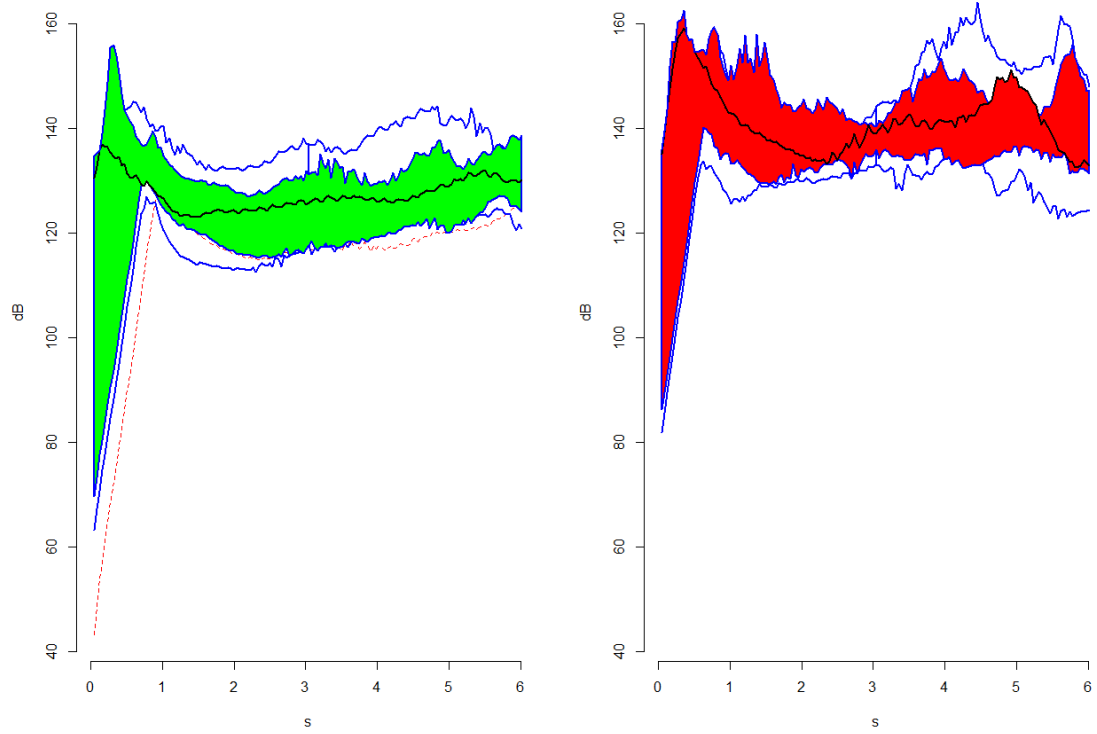


Figura A87 WEGNC2LSH.

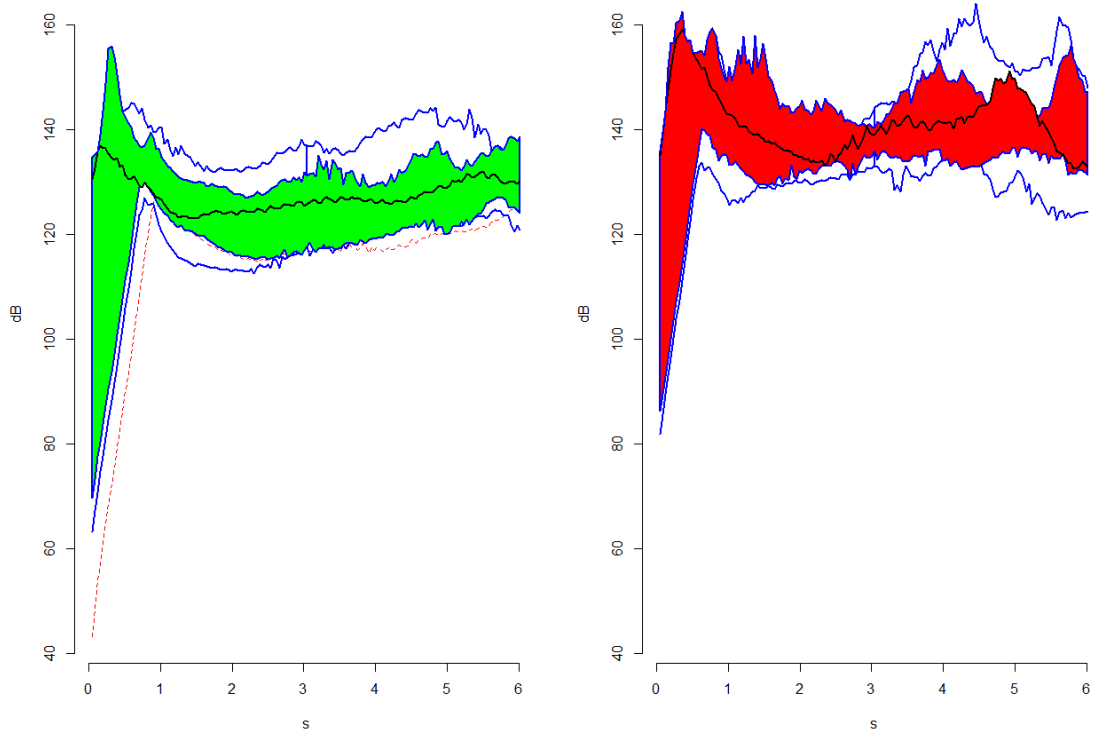


Figura A88 WEGNC2USH.

A.3 ANOVA funcional

Al igual que en el apartado anterior, en este apartado nos vamos a centrar exclusivamente en la comparación de la salud del motor. También se diferencian en colores y en este caso no coinciden con los del apartado anterior:

- **Motor sano (R1):** Color Rojo.
- **Motor con la barra del rotor rota (R5):** Color Verde.

A continuación se expondrán todas las gráficas correspondientes a este apartado:

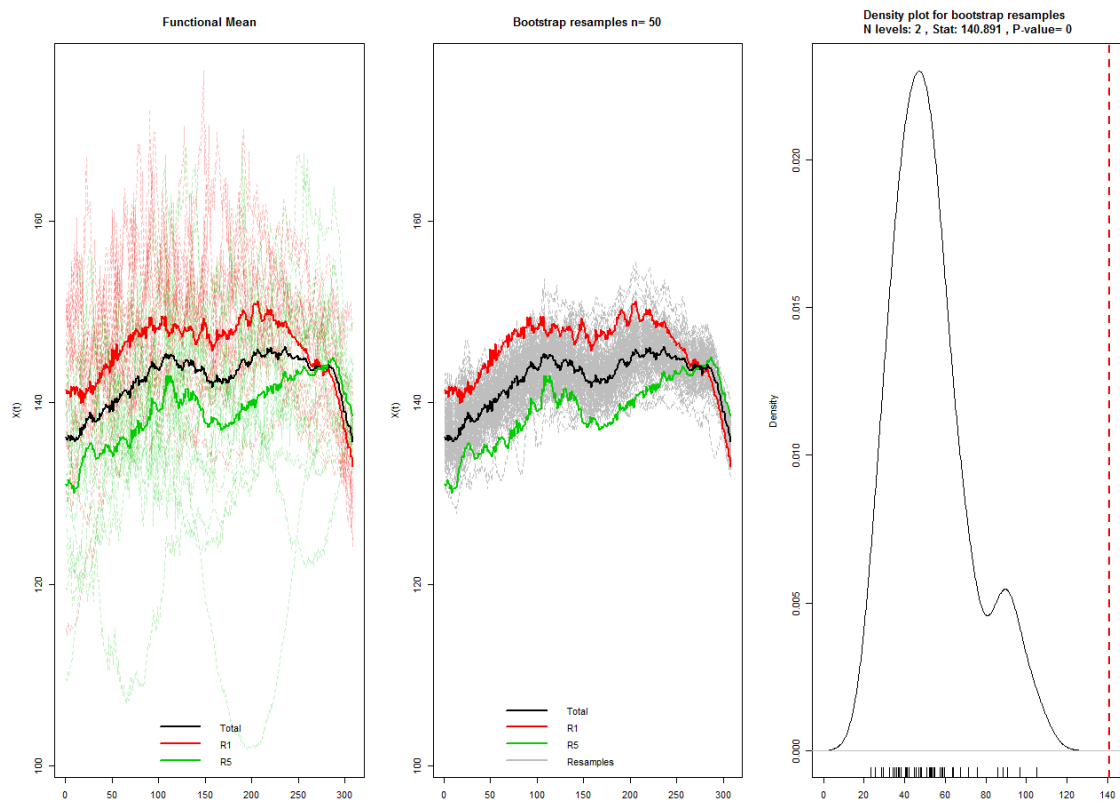


Figura A89 ABNC1LSH.

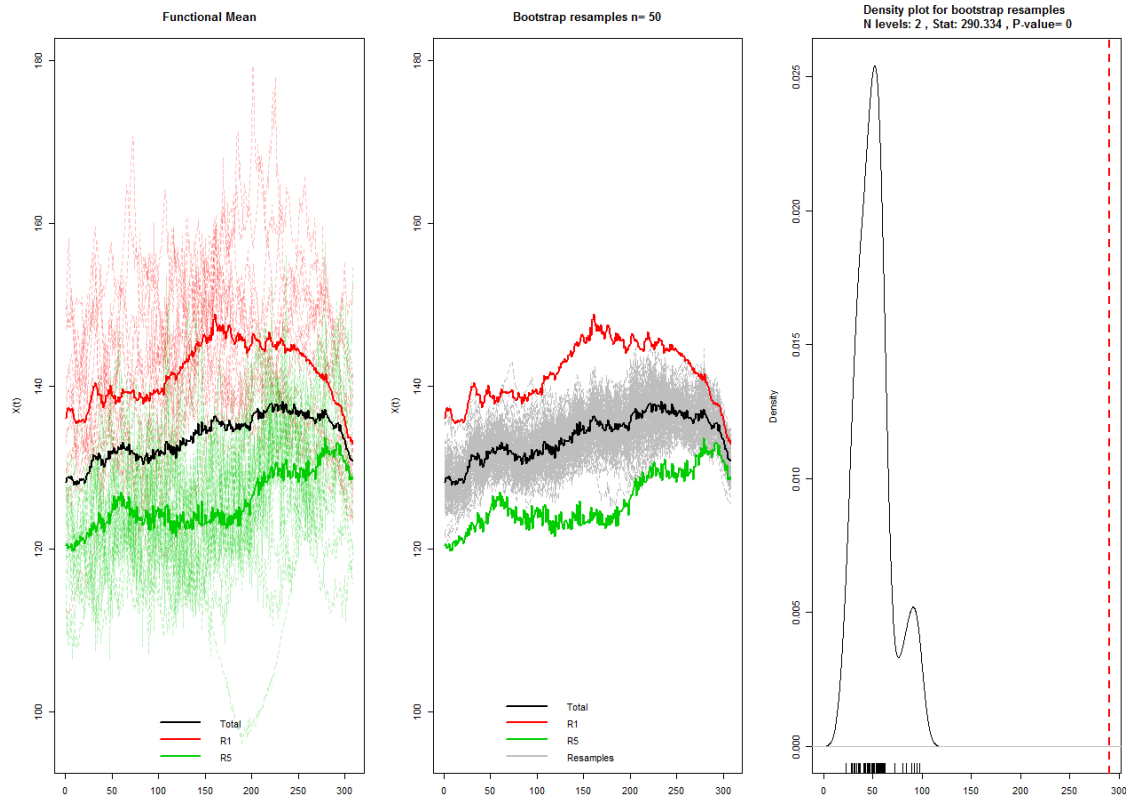


Figura A90 ABNC1USH.

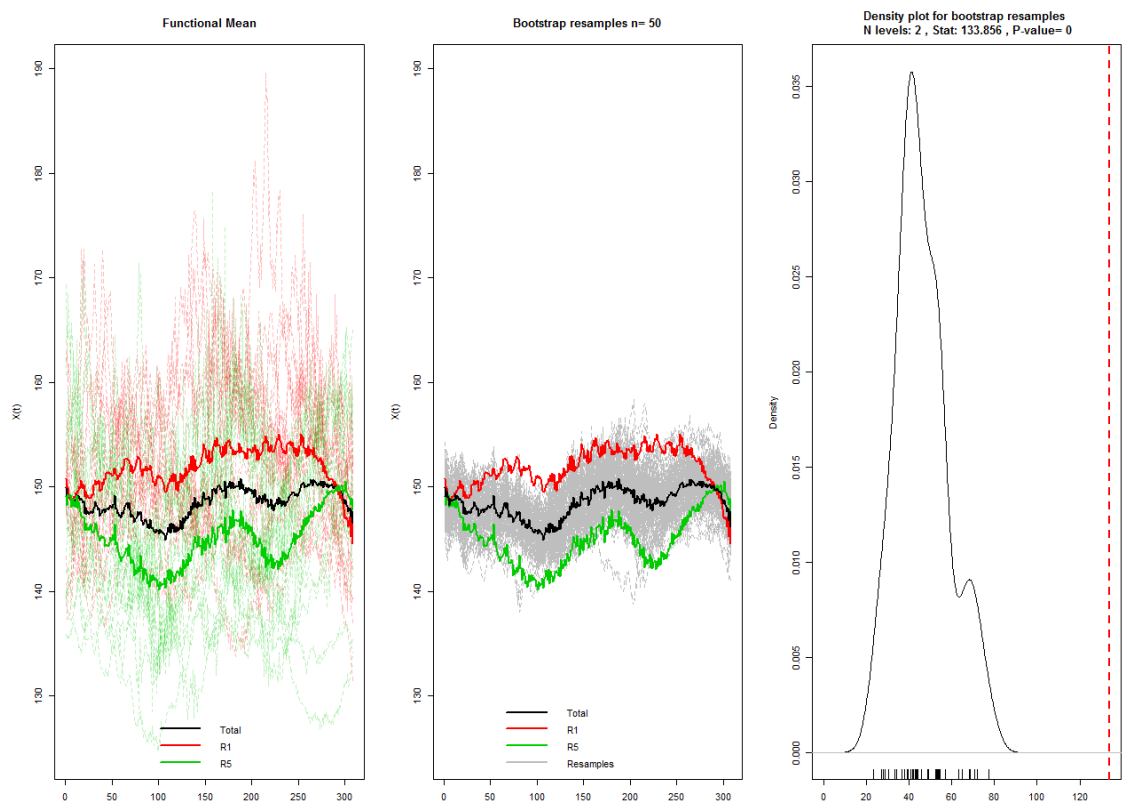


Figura A91 ABNC2LSH.

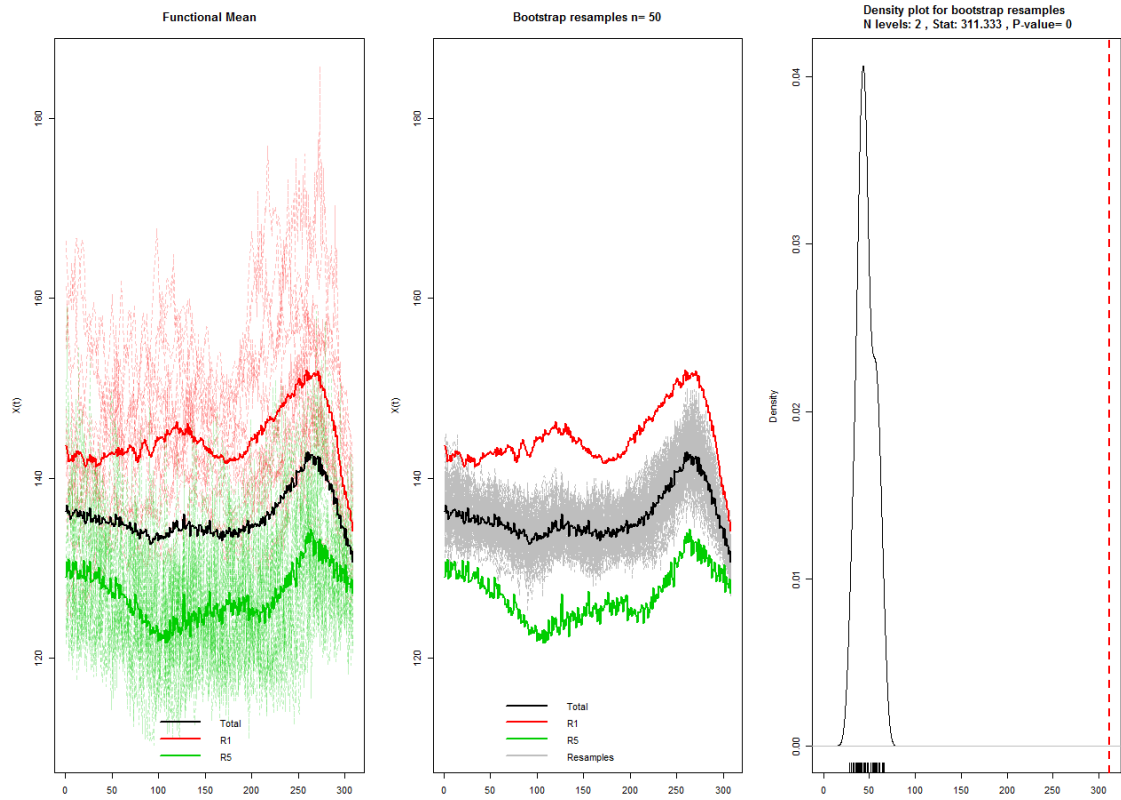


Figura A92 ABNC2USH.

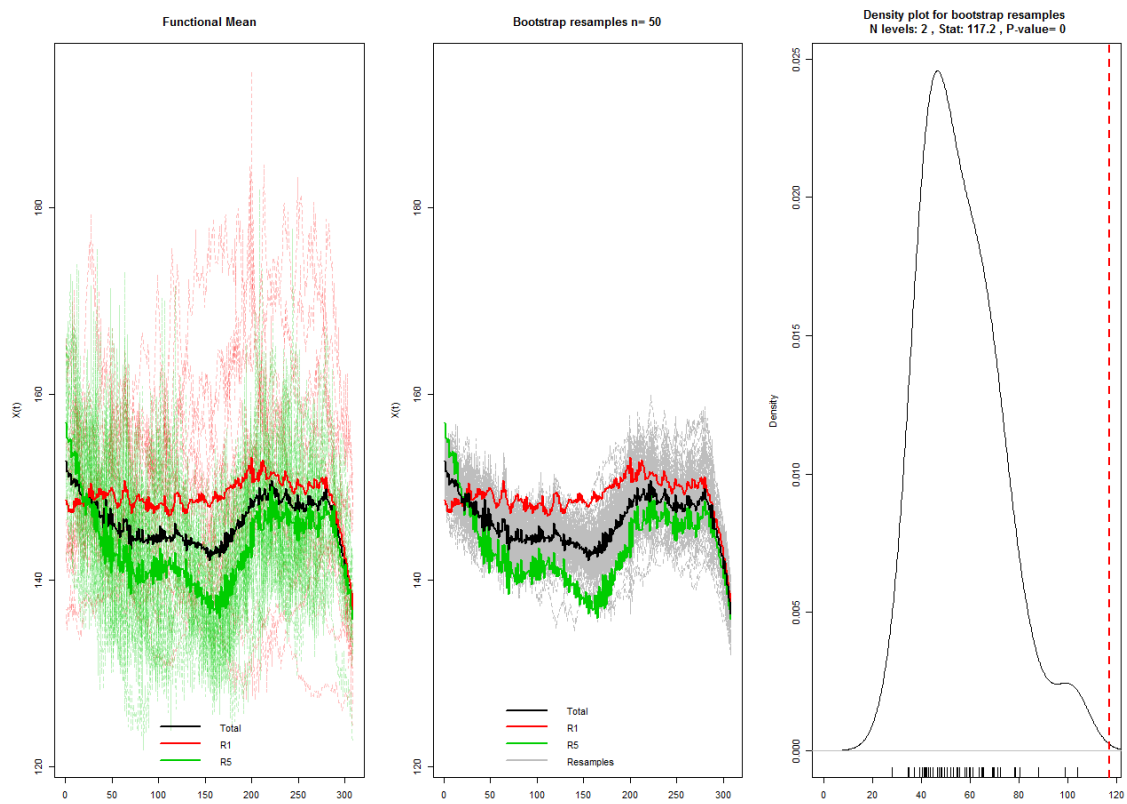


Figura A93 ABBNC1LSH.

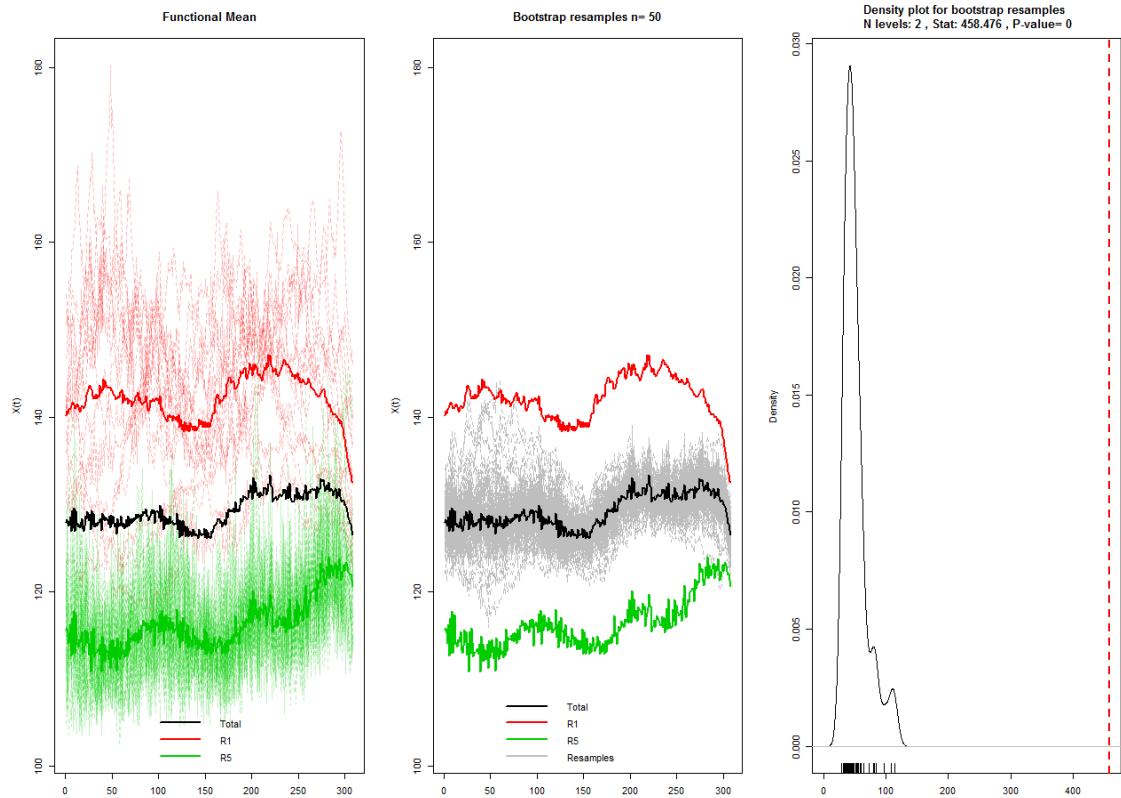


Figura A94 ABBNC1USH.

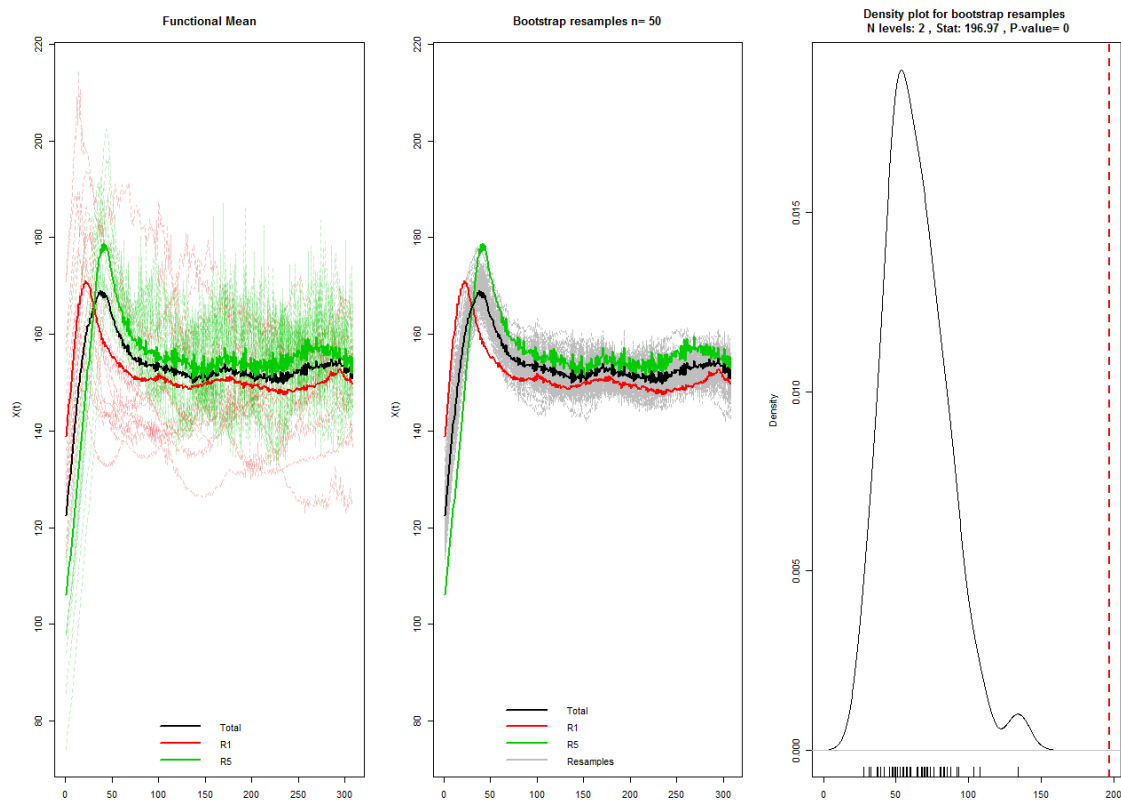


Figura A95 ABBNC2LSH.

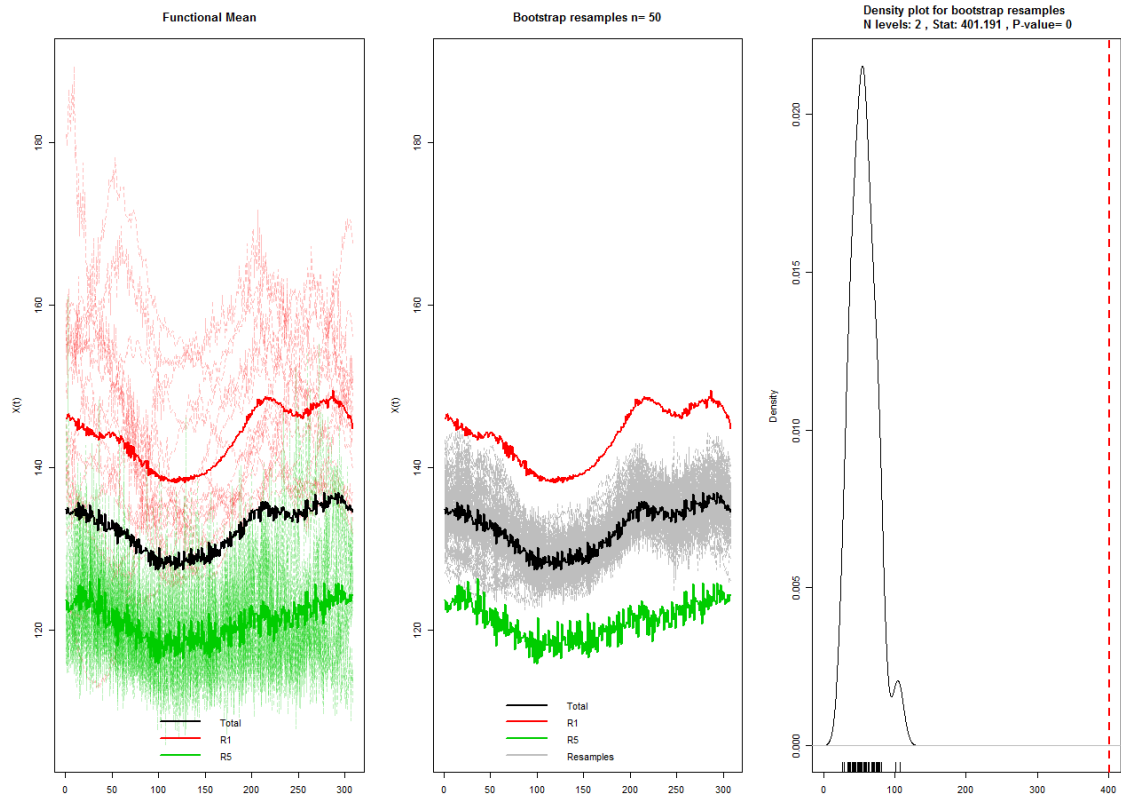


Figura A96 ABBNC2USH.

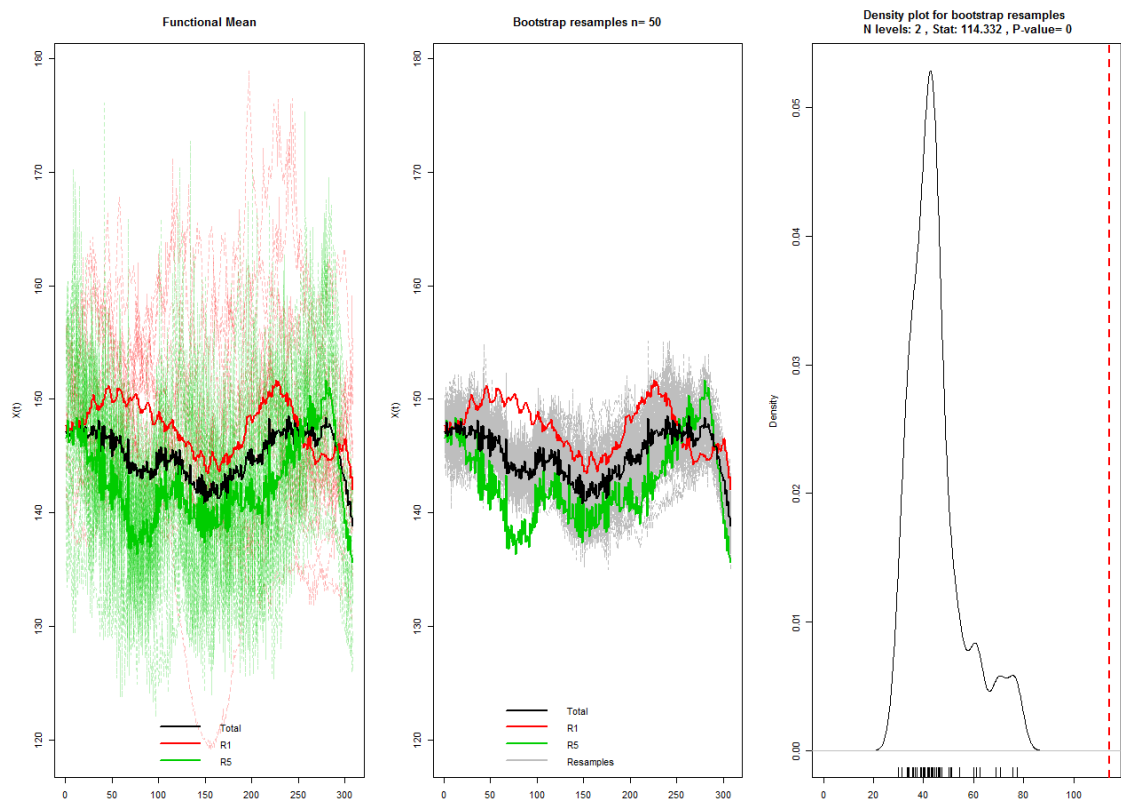


Figura A97 SIENC1LSH.

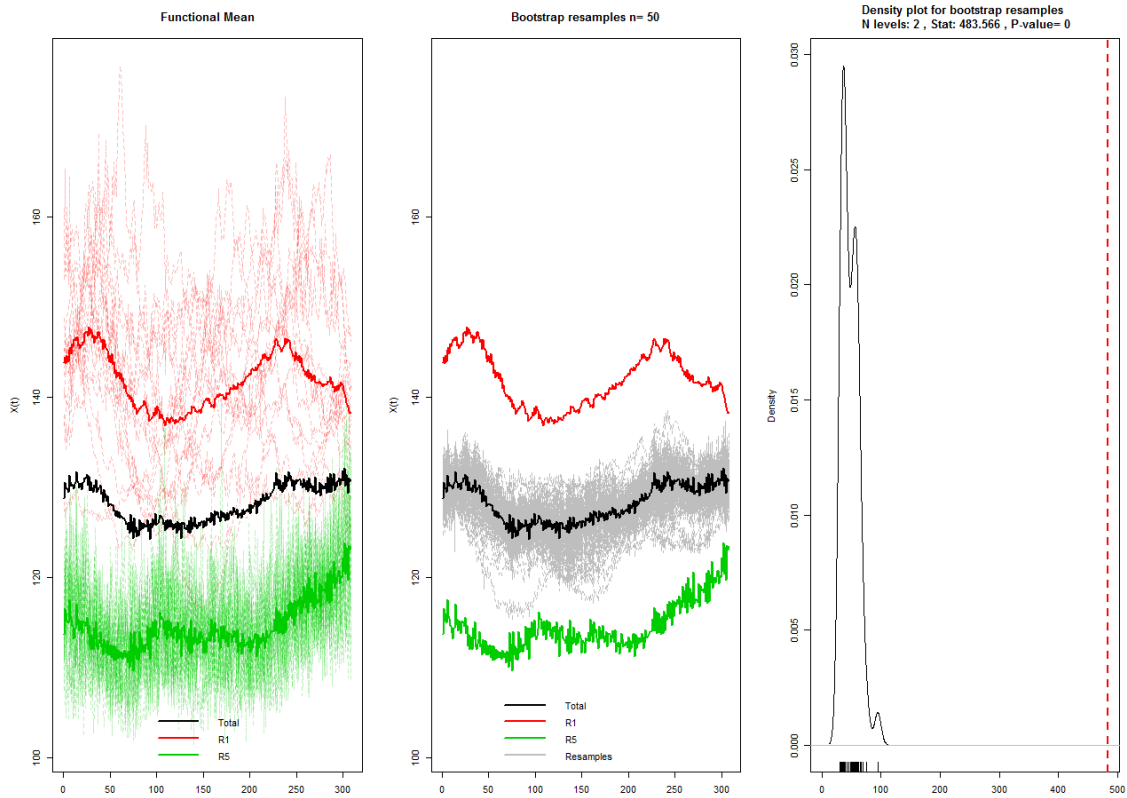


Figura A98 *SIENC1USH*.

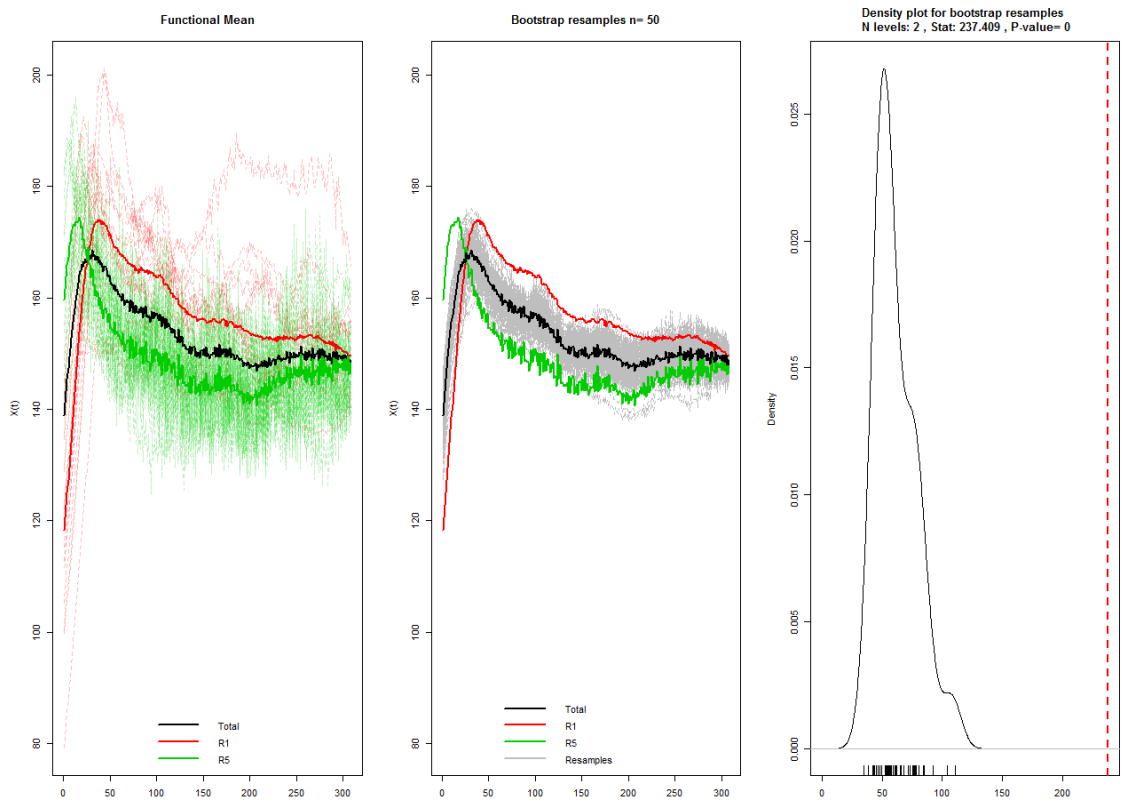


Figura A99 *SIENC2LSH*.

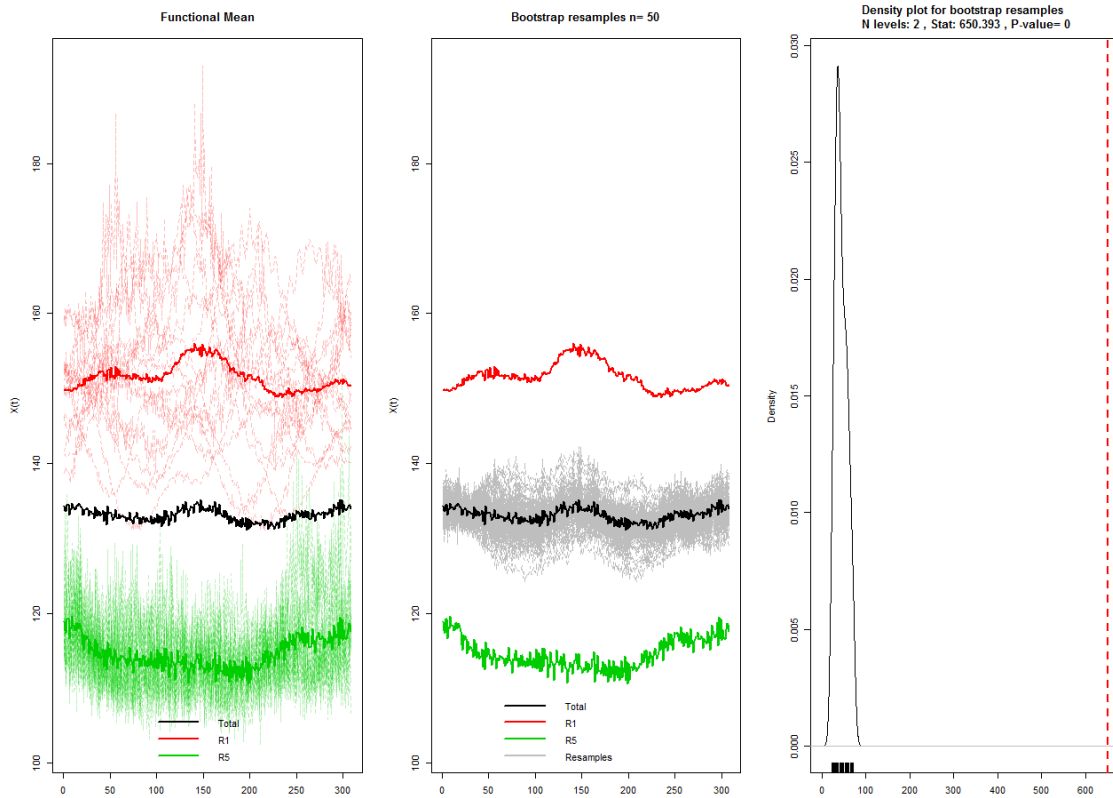


Figura A100 *SIENC2USH*.

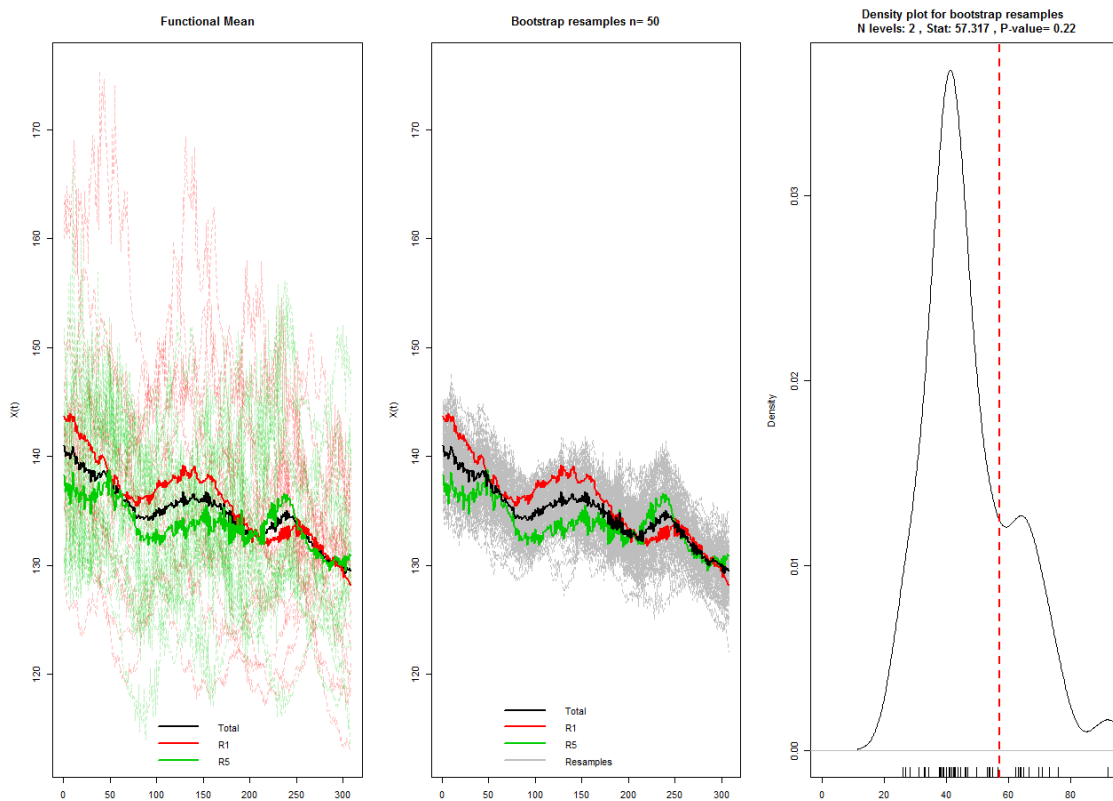


Figura A101 *TMNC1LSH*.

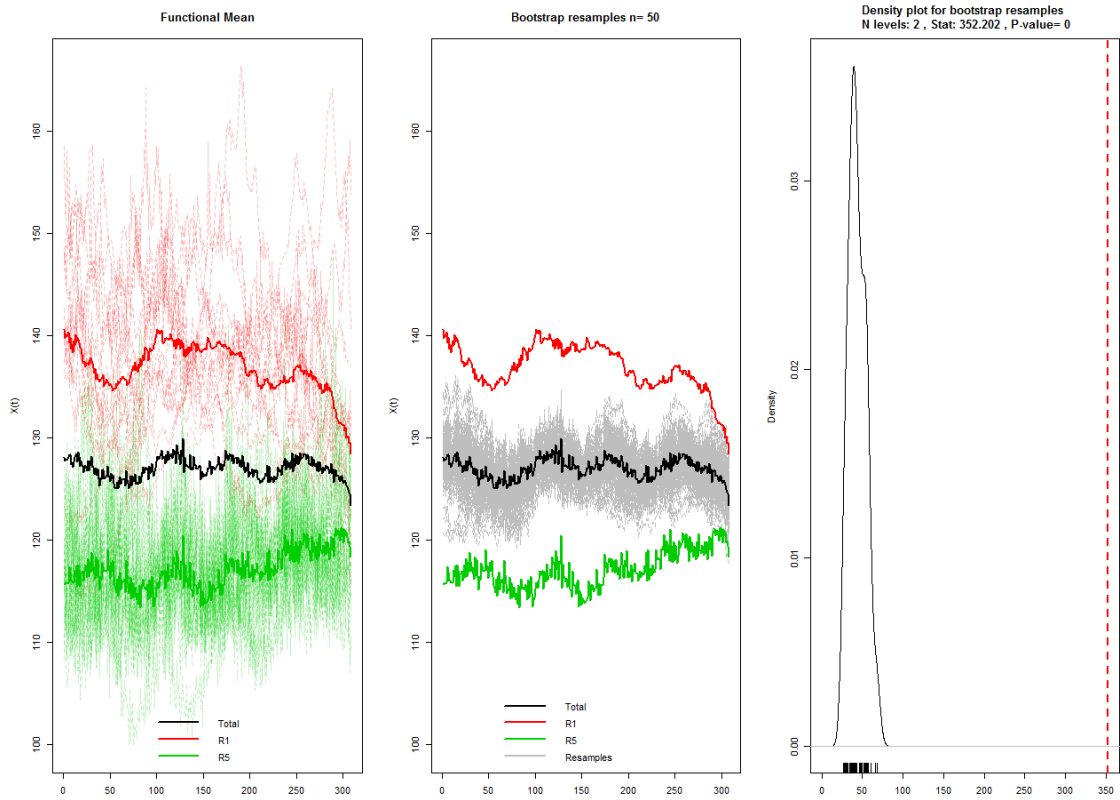


Figura A102 *TMNC1USH*.

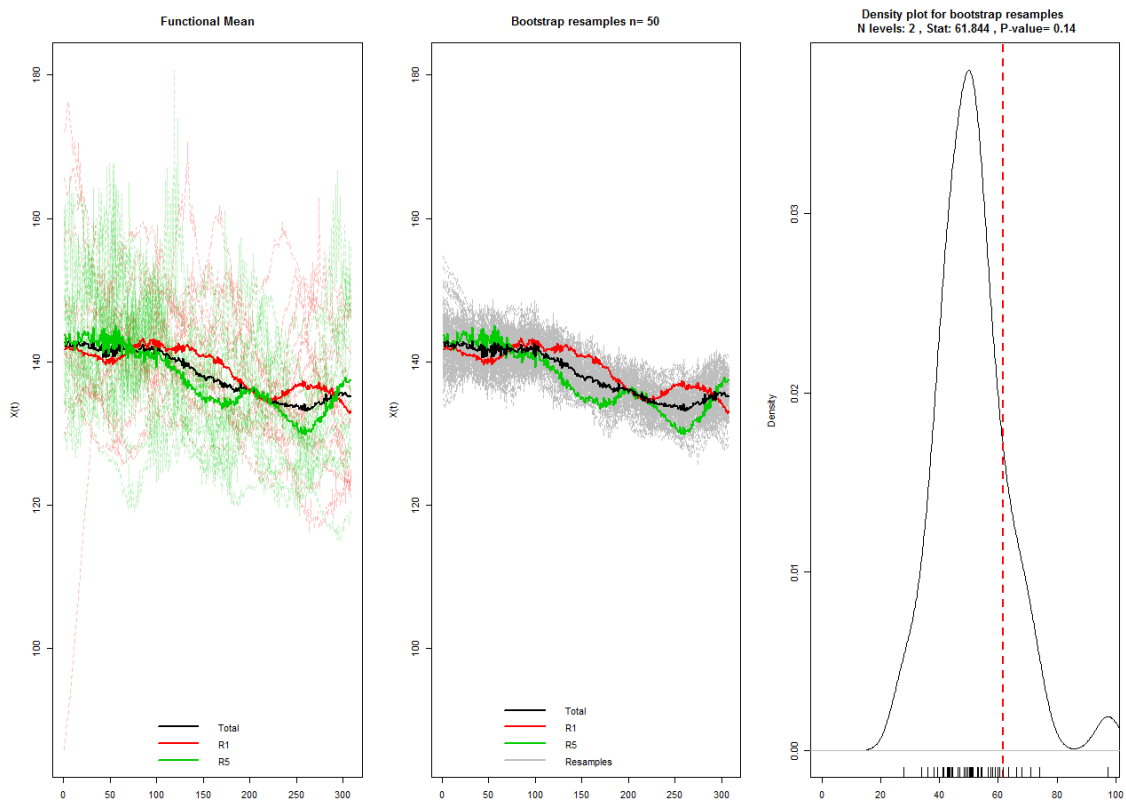


Figura A103 *TMNC2LSH*.

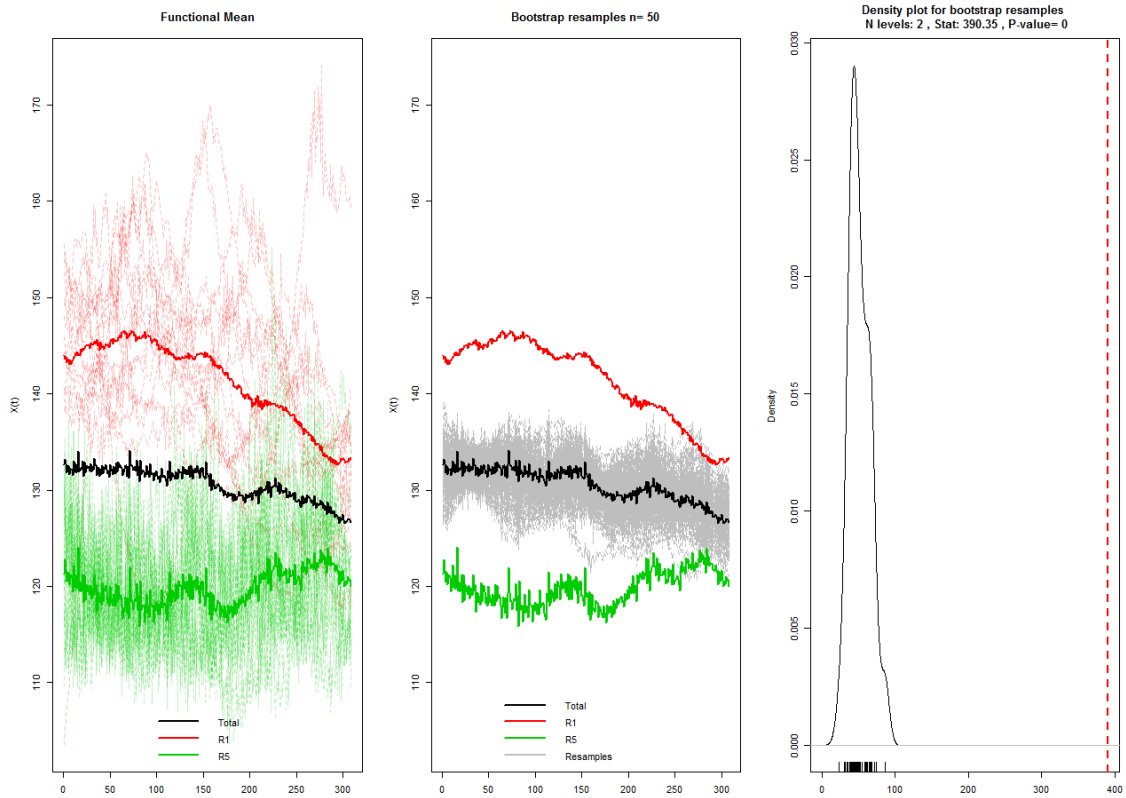


Figura A104 *TMNC2USH*.

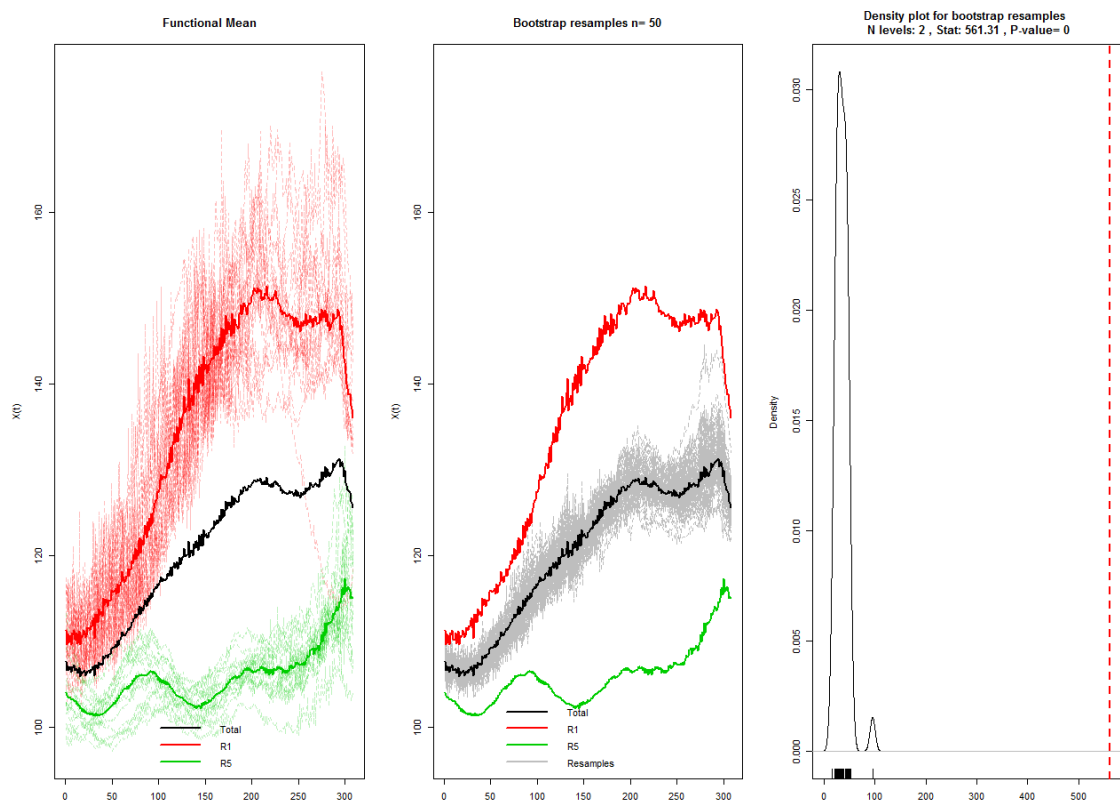


Figura A105 *WEGNC1LSH*.

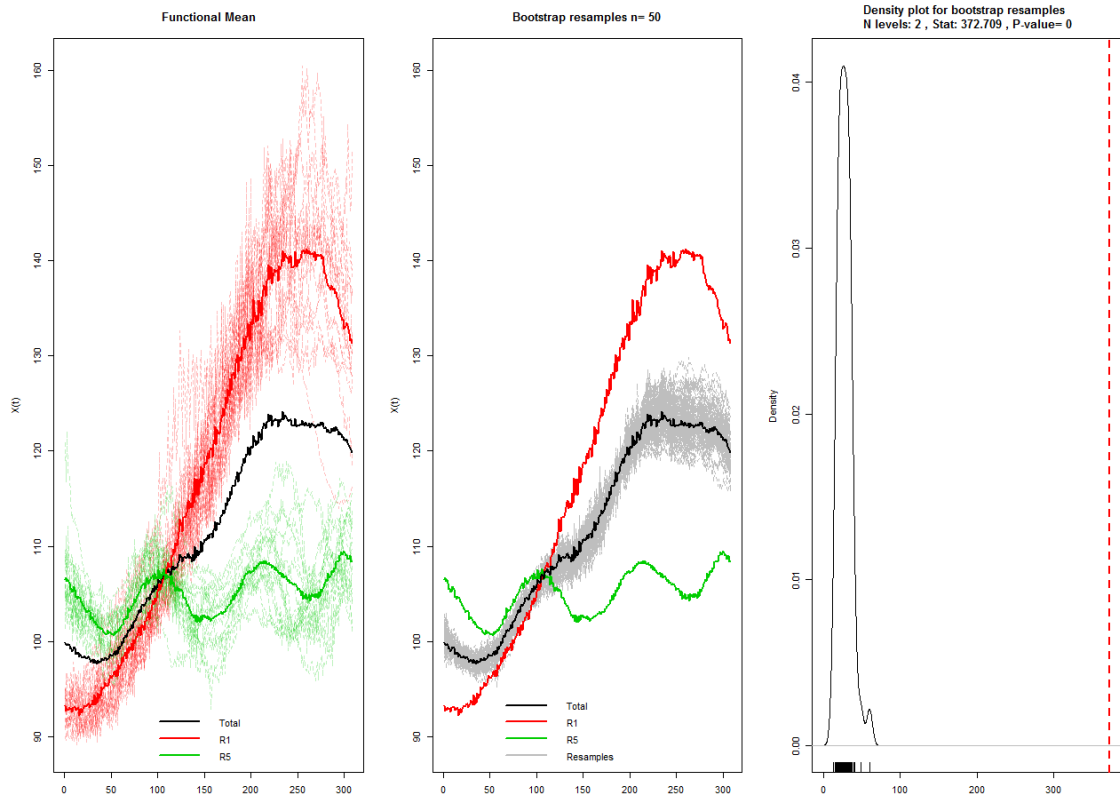


Figura A106 WEGNC1USH.

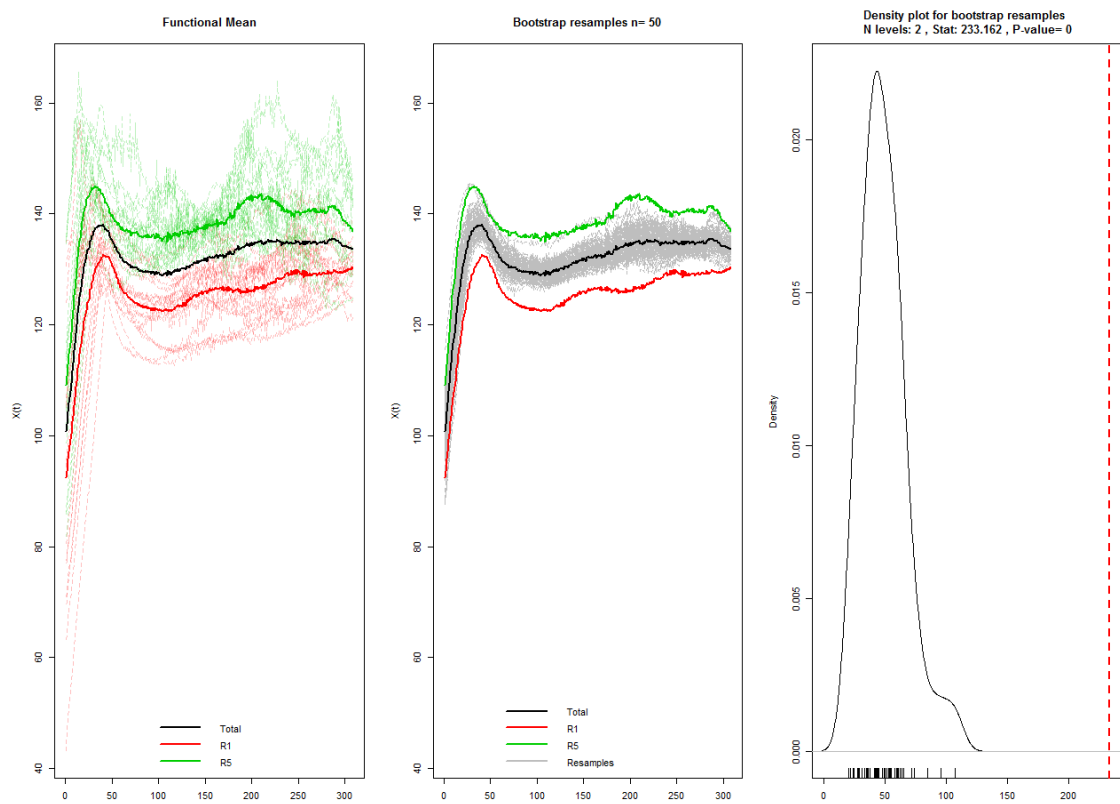


Figura A107 WEGNC2LSH.

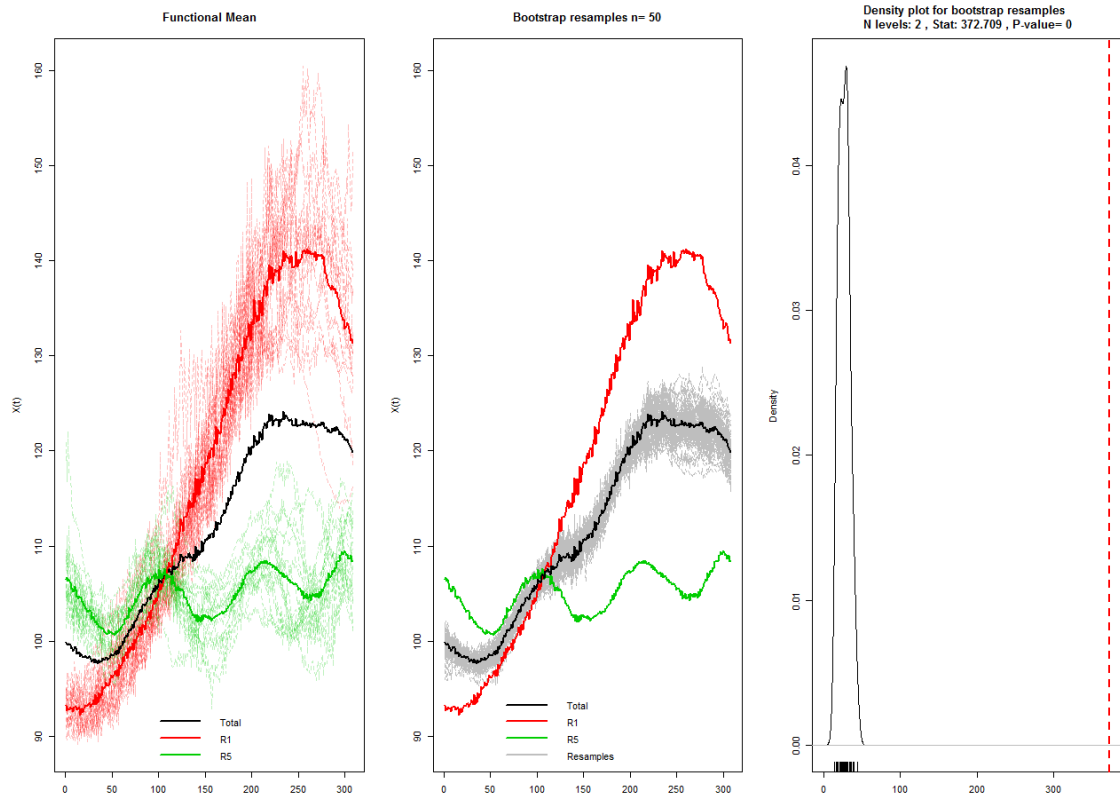


Figura A108 WEGNC2USH.

Anexo B

Programas en R

En este anexo se podrán visualizar los distintos códigos de programación en R que se han empleado en este trabajo. En total hemos utilizado tres códigos que corresponden cada uno al análisis descriptivo, boxplots funcionales y ANOVA funcional.

Cabe recordar que los datos nos lo proporciona el Departamento de Ingeniería Eléctrica. Dicho departamento nos entregó un total de 40 archivos de MATLAB con los datos. Lo primero que hicimos fue juntar todos estos archivos en una hoja Excel (MF.csv) para tener todos los datos juntos. Dicha matriz posee cuatro variables para facilitar su búsqueda y éstas son “Variador”, “Estado”, “NivelCarga” y “Banda”.

Como para obtener las diferentes gráficas es necesario cambiar algunos datos, pondremos en cada código solamente un ejemplo e indicaremos que hay que cambiar para poder obtener las distintas gráficas.

B.1 Código para los análisis descriptivos

```
##Ejemplo de un análisis descriptivo comparando el estado  
de los motores con un inversor de marca AB, un nivel de  
carga bajo y con la banda inferior##
```

```
MF <- read.csv2(file="C:/Users/RAUL/Desktop/TFG/MF.csv",  
header=T, dec=".") #Se lee la matriz que hemos creado con  
todos los datos juntos#
```

```
MF <- MF[,-1] #Eliminamos la primera columna que contiene  
una enumeración de los ensayos y no nos es de utilidad#
```

```
x1 <- MF[MF$Variador=="AB"& MF$Estado=="R1" &  
MF$NivelCarga=="NC1" & MF$Banda=="LSH",- (1:4)]  
x2 <- MF[MF$Variador=="AB"& MF$Estado=="R5" &  
MF$NivelCarga=="NC1" & MF$Banda=="LSH",- (1:4)]
```

```
#Se generan dos variables (x1 y x2) con los datos que  
nosotros queramos comparar
```

```
#Se ponen entre comillas los mismos datos, excepto aquello  
que queremos comparar
```

```
#Cambiando aquellos que estén entre comillas podremos  
obtener las distintas gráficas
```

```
p <- dim(x1)[2] #Dato auxiliar en el cual introducimos la  
dimensión de las variables#
```

```
n <- dim(x1)[1] #Dato auxiliar en el cual introducimos la  
dimensión de las variables#
```

```
a=c(0, 1, 2, 3, 4, 5, 6) #Dato auxiliar para poner el eje
en función del tiempo#
b=c(0, 256, 512, 768, 1024, 1280, 1536) #Dato auxiliar para
poner el eje en función del tiempo#

par(mfrow=c(1,1)) #Sirve para que en la ventana de gráficas
haya espacio para una gráfica#

plot(1:p, x1[1,], ylim=c(min(range(x1)[1], range(x1)[1]),
max(range(x1)[2], range(x2)[2])), xlab="s", ylab="dB",
type="n", axes=F) #Obtenemos los gráficos poniendo el
nombre a los ejes y con sus dimensiones#

axis(side=1, at=b, labels=a) #Cambiamos los valores
antiguos (b) por los nuevos (a)#
axis(side=2) #Este eje está correcto y no cambiamos nada#

for(i in (1:n))
{
  lines(1:p, x1[i,], col="green") #Ponemos los datos del
estado del motor sano en color verde#
}
for(i in (1:n))
{
  lines(1:p, x2[i,], col="red") #Ponemos los datos del
estado del motor dañado en color rojo#
}
```

B.2 Código para los boxplots funcionales

```
##Ejemplo de un boxplot funcional comparando el estado de
los motores con un inversor de marca SIE, un nivel de carga
alto y con la banda superior##

install.packages("fda.usc", repos = "http://cran.us.r-
project.org") #Intalación de un paquete externo que no
estaba incluido en el programa#
library(fda) #Uso de una librería nueva para poder realizar
la función fbplot#

MF <- read.csv2(file="C:/Users/RAUL/Desktop/TFG/MF.csv",
header=T, dec=".") #Se lee la matriz que hemos creado con
todos los datos juntos#
```

```
MF <- MF[,-1] #Eliminamos la primera columna que contiene
una enumeración de los ensayos y no nos es de utilidad#

x1 <- MF[MF$Variador=="SIE"& MF$Estado=="R1" &
MF$NivelCarga=="NC2" & MF$Banda=="USH", -(1:4)]
x2 <- MF[MF$Variador=="SIE"& MF$Estado=="R5" &
MF$NivelCarga=="NC2" & MF$Banda=="USH", -(1:4)]

#Se generan dos variables (x1 y x2) con los datos que
nosotros queramos comparar#
#Se ponen entre comillas los mismos datos, excepto aquello
que queremos comparar#
#Cambiando aquellos que estén entre comillas podremos
obtener las distintas gráficas#

p <- dim(x1)[2] #Dato auxiliar en el cual introducimos la
dimensión de las variables#
n <- dim(x1)[1] #Dato auxiliar en el cual introducimos la
dimensión de las variables#

par(mfrow=c(1,2)) #Sirve para que en la ventana de gráficas
haya espacio para dos gráficas#

ii <- seq(1,1536, by=10) #Para una mejor visualización de
las gráficas se leen los datos de 10 en 10#

x1.s <- x1[,ii] #Sustituye a la variable x1 leyendo los
datos de 10 en 10#
x2.s <- x2[,ii] #Sustituye a la variable x2 leyendo los
datos de 10 en 10#

a=c(0, 1, 2, 3, 4, 5, 6) #Dato auxiliar para poner el eje
en función del tiempo#
b=c(0, 25.6, 51.2, 76.8, 102.4, 128, 153.6) #Dato auxiliar
para poner el eje en función del tiempo#

fbplot(t(x1.s), method='MBD', col="green",
ylim=c(min(range(x1)[1], range(x2)[1]), max(range(x1)[2],
range(x2)[2])), xlab="s", ylab="dB", axes=F) #Esta función
es la necesaria para la obtención de los boxplots
funcionales, ponemos los datos del motor sano en color
verde, el nombre y dimensión a los ejes#
```

```
axis(side=1, at=b, labels=a) #Cambiamos los valores
antiguos (b) por los nuevos (a)#
axis(side=2) #Este eje está correcto y no cambiamos nada#

fbplot(t(x2.s),          method='MBD',          col="red",
ylim=c(min(range(x1)[1], range(x2)[1]), max(range(x1)[2],
range(x2)[2])), xlab="s", ylab="dB", axes=F) #Esta función
es la necesaria para la obtención de los boxplots
funcionales, ponemos los datos del motor dañado en color
rojo, el nombre y dimensión a los ejes#

axis(side=1, at=b, labels=a) #Cambiamos los valores
antiguos (b) por los nuevos (a)#
axis(side=2) #Este eje está correcto y no cambiamos nada#
```

B.3 Código para los ANOVA funcionales

```
##Ejemplo de un ANOVA funcional comparando el estado de los
motores con un inversor de marca TM, un nivel de carga alto
y con la banda inferior##
```

```
install.packages("fda.usc", repos = "http://cran.us.r-
project.org") #Intalación de un paquete externo que no
estaba incluido en el programa#
```

```
library(fda.usc) #Uso de una librería nueva para poder
realizar la función anova.onefactor#
```

```
MF <- read.csv2(file="C:/Users/RAUL/Desktop/TFG/MF.csv",
header=T, dec=".") #Se lee la matriz que hemos creado con
todos los datos juntos#
```

```
MF <- MF[,-1] #Eliminamos la primera columna que contiene
una enumeración de los ensayos y no nos es de utilidad#
```

```
x1 <- MF[MF$Variador=="ABB"& MF$Estado=="R1" &
MF$NivelCarga=="NC2" & MF$Banda=="LSH", -(1:4)]
x2 <- MF[MF$Variador=="ABB"& MF$Estado=="R5" &
MF$NivelCarga=="NC2" & MF$Banda=="LSH", -(1:4)]
```

```
#Se generan dos variables (x1 y x2) con los datos que
nosotros queramos comparar#
```



```
#Se ponen entre comillas los mismos datos, excepto aquello  
que queremos comparar#  
#Cambiando aquellos que estén entre comillas podremos  
obtener las distintas gráficas#  
  
ii <- seq(1,1536, by=5) #Para una mayor rapidez en la  
obtención de las gráficas se leen los datos de 5 en 5#  
  
x1.s <- x1[,ii] #Sustituye a la variable x1 leyendo los  
datos de 5 en 5#  
x2.s <- x2[,ii] #Sustituye a la variable x2 leyendo los  
datos de 5 en 5#  
  
x <- rbind(x1.s, x2.s) #Se combinan las matrices x1.s y  
x2.s#  
  
datos.f <- fdata(x) #Se convierten los datos en datos  
funcionales del formato que maneja la librería utilizada#  
  
grupo <- rep(c("R1", "R5"), each=15) #Se crea la  
codificación de los grupos#  
  
res=anova.onefactor(datos.f, grupo, nboot=50, plot=TRUE)  
#Genera las gráficas de ANOVA funcional#  
  
res$pvalue #Se obtiene el p-valor#
```

Bibliografía

Cuevas, A., Febrero, M. y Fraiman, R. (2004). *An anova test for functional data. Computational statistics & data analysis*. Vol. 47 (1), pp. 111-122.

Duque, Ó. y Pérez, M. (2005). *Motores de inducción: técnicas de mantenimiento predictivo*. Ed. @becedario.

Efron, B. (1979). *Bootstrap Methods: Another Look at the Jackknife*. The Annals of Statistics, vol. 7, n. 1, pp. 1-26.

Febrero-Bande, M. y Oviedo de la Fuente, M. (2012). *Statistical Computing in Functional Data Analysis: The R Package fda.usc*. Journal of Statistical Software.

Fernández-Cavero, V., Morinigo, D., Duque, O. y Pons-Llinares, J. (2017). *A Comparison of Techniques for Fault Detection in Inverter-fed Induction Motors in Transient Regime*. IEEE Access, vol. 5, pp. 8048-8063.

Ferraty, F. y Vieu, P. (2006). *Nonparametric Functional Data Analysis*. Ed. Springer.

García, A. (2008). *Estadística aplicada con R*. Ed. UNED.

Iacobucci, D. (2001). *Journal of Consumer Psychology's Special Issue on Methodological and Statistical Concerns of the Experimental Behavioral Researcher*. Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, vol. 10 (1&2), pp. 5-35.

Liu, R. Y., Parelius, J. M. y Singh, K. (1999). *Multivariate Analysis by Data Depth: Descriptive Statistics, Graphics and Inference*. The Annals of Statistics, vol. 27, pp. 783–858.

López-Pintado, S. y Romo, J. (2009). *On the Concept of Depth for Functional Data*. Journal of the American Statistical Association, vol. 104, pp. 718–734.

Martín, J. (2006). *Análisis espectral: Analizadores de espectros. Tipos [II]. El analizador FFT*. Denver Metrología Electrónica, pp. 78-81.

Pons-Llinares J., Riera-Guasp M., Antonino-Daviu J. A. y Habetler T. G. (2016). *Pursuing optimal electric machines transient diagnosis: The adaptive slope transform*. Mechanical System and Signal Processing, vol. 80, pp. 553-569.

Ramsay, J. y Silverman, B. (2005). *Functional Data Analysis*. Ed. Springer.

Ramsay, J. O., Bock, R. D. y Gasser, T. (1995). *Comparison of height acceleration curves in the Fels, Zurich, and Berkeley growth data*. Annals of Human Biology, vol. 22 (5), pp. 413-426.

Rosa, R. (2015). *Estudio sobre la viabilidad de los estadísticos de orden superior de la corriente de alimentación como indicadores para determinar el estado de un motor de inducción*. Trabajo de Fin de Grado de la Universidad de Valladolid.

Sun, Y. y Genton, M. C. (2011). *Functional Boxplots*. Journal of Computational and Graphical Statistics, vol. 20, n. 2, pp. 316-334.

Tukey, J. W. (1970). *Exploratory Data Analysis*. Limited Preliminary Edition, vol. 1, Reading, MA: Addison-Wesley, cap. 5.

Tukey, J. W. (1977). *Exploratory Data Analysis*. Reading, MA: Addison-Wesley, pp. 39-43.

Verucchi, C. J. y Acosta, G. G. (2007). *Fault Detection and Diagnosis Techniques in Induction Electrical Machines*. IEEE Latin America Transactions, vol. 5, pp. 41-49.

Páginas webs

Rotor bobinado <https://es.scribd.com/doc/232381707/Rotor-Bobinado>

Rotor de jaula de ardilla

http://perso.wanadoo.es/danieldiaz_borr/rotor%20jaula%20de%20ardilla.htm

Principio de funcionamiento

<https://sites.google.com/site/279motoreselectricos/principio-de-funcionamiento>

Tipos de arranque <http://www.die.eis.uva.es/~daniel/docencia/te/TEIQPractica9-2008.pdf>

Régimen Transitorio

<http://www.motortico.com/biblioteca/MotorTico/2013%20NOV%20-%20Corriente%20de%20Arranque%20en%20Motores%20Electricos.pdf>

Sensores http://www.profesormolina.com.ar/tecnologia/sens_transduct/index.htm

Deslizamiento http://www.cifpmantenimiento.es/elearning/index.php?id=9&id_sec=6

Lenguaje de programación R https://cran.r-project.org/doc/contrib/rdebuts_es.pdf

Boxplots clásicos <http://www.universoformulas.com/estadistica/descriptiva/diagrama-caja/>