



Geologia, geotècnia i serveis
científico-tècnics

INTERPRETACIÓ I ANOMALIES DE LA PROSPECCIÓ A RESSONÀNCIA MAGNÈTICA (MRS)

**INTERPRETACIÓ DE LES DADES
ANOMALIES I PARTICULARITATS DEL MÈTODE
REGISTRE DE LA SENYAL DE L'APARELL DE MESURA NUMIS™
PROCESSAMENT DE LA SENYAL AMB SOROLL "EM"
INVERSIÓ DEL SENYAL MRS**

Direcció:

Valentí TURU i MICHELS

Av. Príncep Benlloch 66-72

Edifici Interceus, despatx 407

Telèfon i fax: 321815 - 820323

Email: igeotest@myp.ad

<http://www.igeotest.ad>

2.1 INTERPRETACIÓ DE LA RESSONÀNCIA MAGNÈTICA

2.1.4 Processament de la senyal MRS amb soroll (EM)

Un de les majors limitacions del mètode de ressonància magnètica (MRS) és la seva sensibilitat al soroll electromagnètic (EM) natural o artificial. Aquest pot ser degut a tempestes magnètiques, corrents tel·lúriques, tempestes meteorològiques, línies elèctriques, generadors elèctrics i altres artefactes elèctrics artificials. És considerat com a soroll industrial el que presenta una superposició d'harmònics en el rang de freqüències industrial (50 o 60 Hz). La modulació de les freqüències de les emissions de radio i telefonia també produeixen soroll EM. La presència d'important soroll electromagnètic (EM) per línies elèctriques que treballen amb freqüències de 1900 a 2400 Hz pot ser una important limitació del mètode, particularment quan la freqüència de Larmor és propera a un dels harmònics de la freqüència fonamental (50 o 60 Hz). Aquest soroll electromagnètic pot interferir en el senyal d'excitació dels protons i sumar-se a l'amplitud d'aquesta. Per millorar la qualitat del senyal existeix la possibilitat d'imposar diferents procediments en l'adquisició de les dades així com el filtrat de les mateixes.

Segons Legchenko (2007) podem distingir quatre tipologies majors de soroll EM, soroll quasi-constant, soroll variable en el temps, interferències i soroll industrial. En funció de la natura del soroll EM poden emprar-se diferents estratègies en el processament de les dades.

A.5.4.1 Quasi-constant EM noise

En aquest cas el procediments més eficient consisteix en la tècnica de “*stacking*” que consisteix en la suma de registres per un mateix impuls:

$$X(t) = \sum^n X_i(t) / n \quad Y(t) = \sum^n Y_i(t) / n$$

D'aquesta forma que el soroll aleatori s'elimina i el senyal queda ressaltada. L'increment de la relació entre la senyal i el soroll en funció de “n” és:

$$S/N = \sqrt{n}$$

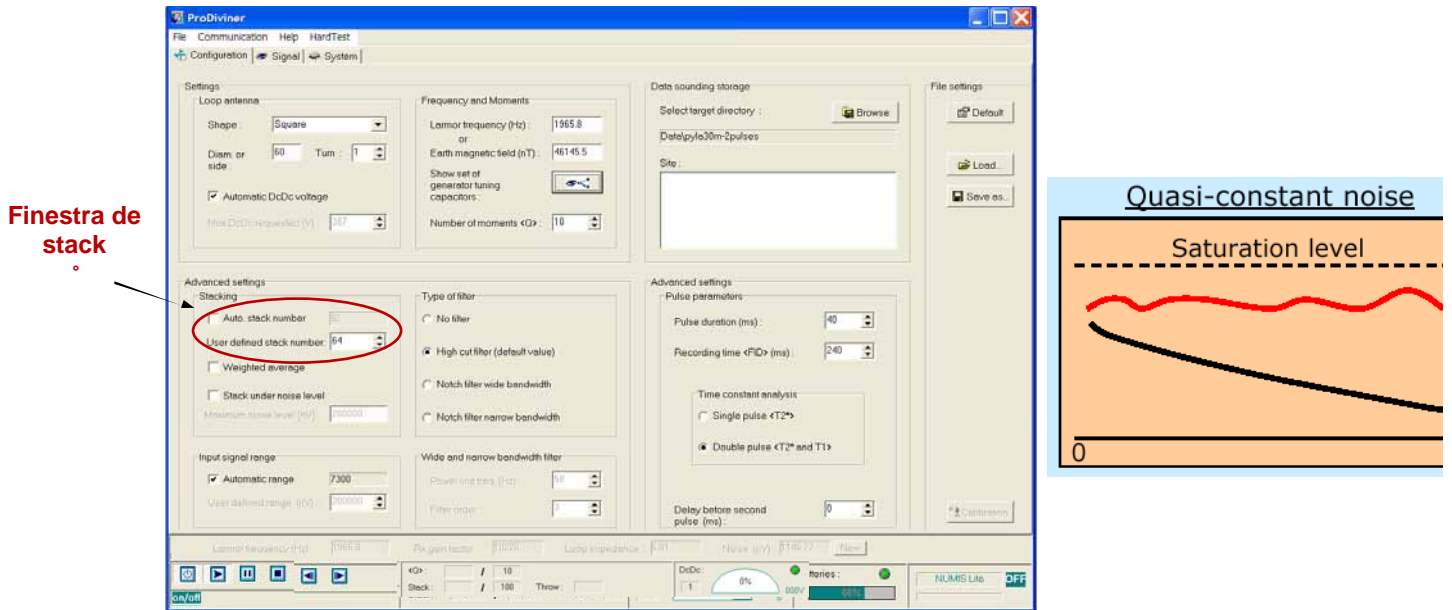


Figura 17: Costat dret, senyal del soroll quasi-constant (vermell) respecte al de la senyal MRS (Legchenko, 2007). Costat esquerre, finestra del programa d'adquisició de dades del Numis Lite™, finestra de *stacking* amb possibilitat de mode automàtic o bé manual

A.5.4.2 Time-varying EM noise

Si el soroll no es constant, és a dir si la magnitud del soroll és molt més important que la senyal i no és estadísticament regular en el decurs de l'adquisició de les dades (*non-white noise*), Legchenko (2007) proposa un esquema molt més efectiu de promig de les senyals que és ponderar-la (*weighted stacking*). S'assumeix que aquest procés cal efectuar-lo si la relació entre el soroll i la senyal és inferior a 1,5:

$$S/N < 1,5$$

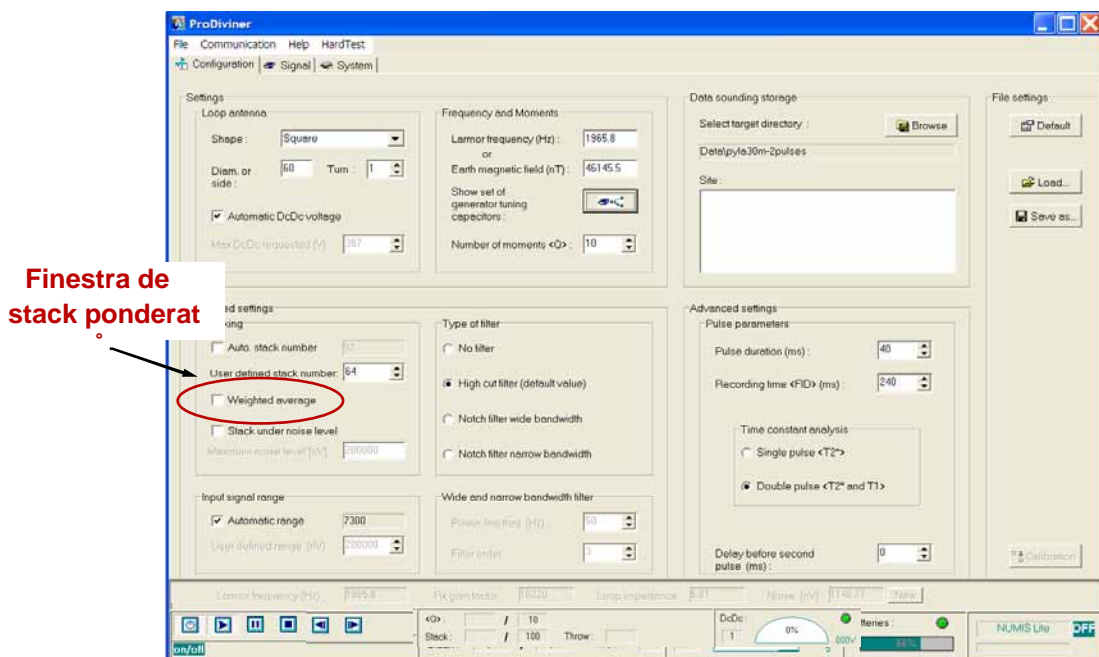
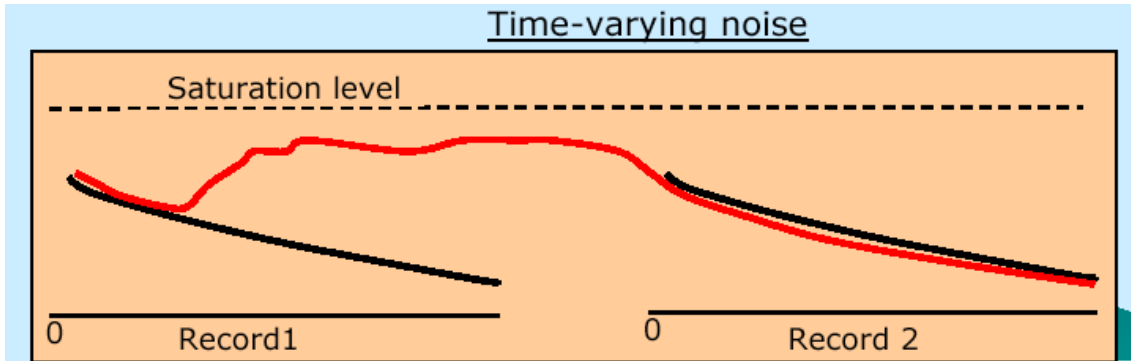


Figura 18: Part superior, senyal del soroll *Time-Varying* (vermell) respecte al de la senyal MRS (Legchenko, 2007), hom pot observar que entre el registre 1 i 2 hi ha una campana de soroll que disminueix en els seus extrems. Part inferior, finestra del programa d'adquisició de dades del Numis Lite™, finestra de *weighted stacking*.

Aquesta ponderació es basa en una estimació del soroll (s_i) definida com:

$$s_i^2 = 1 / \Delta T \int_0^{\Delta t} (X_i(t)^2 + Y_i(t)^2) dt$$

On ΔT és la finestra d'observació (200 ms). A cada registre se li assigna el pes $\eta_i = 1 / s_i^2$ i els registres són ponderats respecte al seu pes de soroll:

$$X(t) = \sum^n \eta_i X_i(t) / \sum^n \eta_i \quad Y(t) = \sum^n \eta_i Y_i(t) / \sum^n \eta_i$$

A.5.4.3 Man-made short spikes

Poden aparèixer petites interferències en un període de 0,5 i 2 segons, un soroll típicament generat per aparells elèctrics. Si la duració de la interferència és més petita que la duració d'un registre d'adquisició de MRS llavors aquestes poden ser eliminades per la seva amplitud, que serà superior a la de la senyal. Després d'eliminar la interferència la senyal pot ser processada (stacking, filtre). En el cas del Numis Lite™ tot el registre simplement queda eliminat.

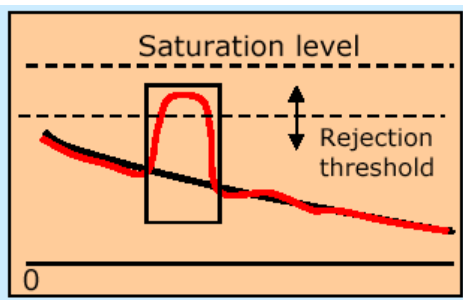


Figura 19: Senyal d'una interferència curta i de molta amplitud (imatges superiors). Després d'eliminar la interferència de la senyal aquesta pot ser processada (stacking, filtering).

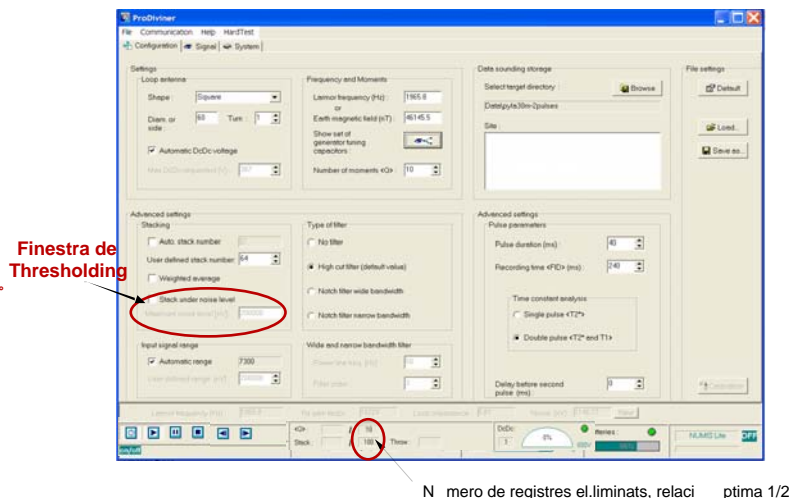
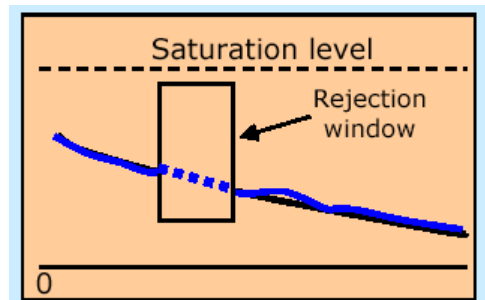


Figura 20: En el programa Prodiviner simplement no te en compte aquest registre per al ponderat (stacking). El límit de lectura (threshold) és important que sigui 5 cops superiors al soroll mesurat i 2 cops superiors a la senyal en el supòsit que no existeixi soroll apreciable. L'eficiència d'aquesta eliminació es veu si el percentatge de registres eliminats respecte als validats és de l'ordre del 50%.

A.5.4.4 Industrial electromagnètic noise

A.5.4.4.1 Les línies elèctriques com a font de contaminació

Legchenko & Valla (2003) han investigat sobre l'efecte del soroll EM industrial. La freqüència de treball per obtenir una senyal MRS oscil·la entre els 800 Hz i els 2.800 Hz que correspon a la variació de la freqüència de Larmor en tot el món, essent aquest rang de freqüències la que també presenten les línies elèctriques. En l'estudi de Legchenko & Valla (2003) una de les primeres qüestions que van investigar fou l'estabilitat de l'amplitud del senyal MRS a prop de línies elèctriques, i van observar que pot variar en un factor superior a 2.

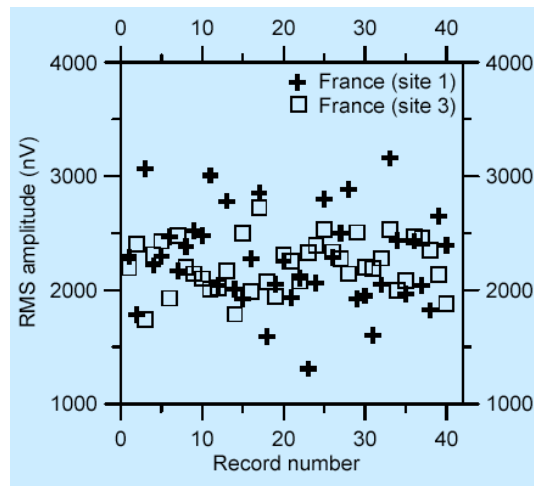


Figura 21: Original de Legchenko (2007) on es pot observar la variació de la magnitud del soroll produït per línies elèctriques en dos indrets de França.

Un anàlisi més detallat efectuant la transformada de Fourier de la senyal recollida de línies elèctriques en diferents indrets mostra que els harmònics dominen en tot l'espectre de freqüències (**figura 22**), però també els sub-harmònics i els inter-harmònics. No obstant l'amplitud dels harmònics com del soroll no-harmònic varia significativament d'un indret a l'altre.

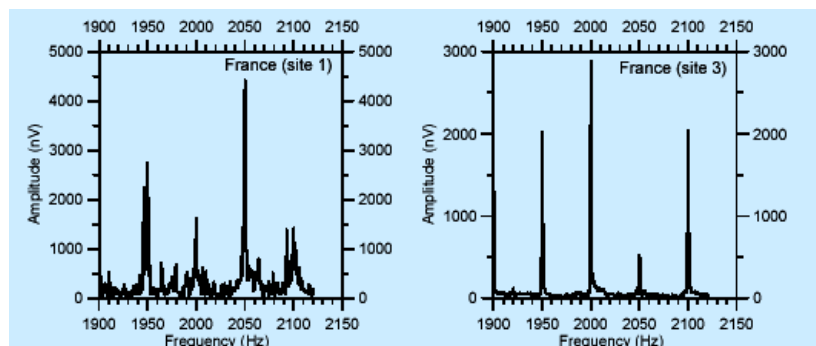


Figura 22a: Original de Legchenko (2007) on es poden observar l'espectre del soroll generat per les línies elèctriques.

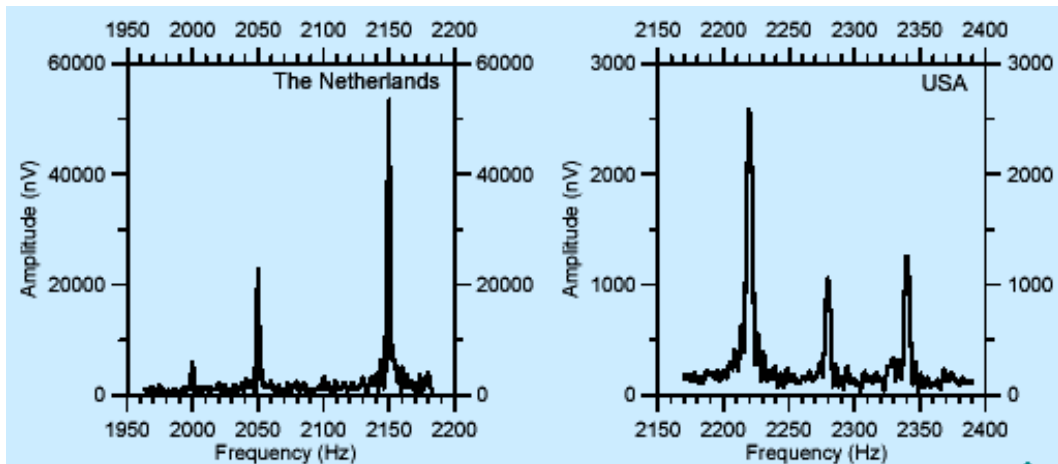


Figura 22b: Original de Legchenko (2007) on es poden observar l'espectre del soroll generat per les línies elèctriques i els harmònics importants. Normalment es representen en escala semilogarítmica per veure ampliades les amplituds petites.

A.5.4.4.2 Harmònics, sub-harmònics i inter-harmònics

Els mètodes per a l'estudi de la qualitat de les senyals poden ser diversos. El més simple és el de la interpretació visual de les anomalies de la forma de les ones, tot i que l'anàlisi de la senyal amb la transformada de Fourier per mitjà del qual s'obté la magnitud i la fase per cada harmònic. Amb aquest mètode es pot efectuar una reconstrucció del senyal sense haver de tenir un registre de tots els punts.

Si s'agafa tot el tren d'ones del soroll industrial i s'efectua aquest anàlisi de Fourier, la fonamental és una sub-harmònica però també apareixen inter-harmòniques i harmòniques no senceres.

Per exemple prenem dues ones (40 ms a 50 Hz) i fem l'anàlisi de Fourier obtenim la fonamental (de 25 Hz) i les seves harmòniques (1, 2, 3, 4, 5, ...), on l'harmònica 2 d'aquest anàlisi és la fonamental de 50 Hz, la 4 és la segona harmònica de 50 Hz, la 3 és la harmònica 1,5 de 50 Hz i s'anomena inter-harmònica, la 5 ens dona la 2,5 i la 1 ens dona la sub-harmònica 0,5 de 50 Hz.

Si escombrem un espectre de freqüències i representem l'amplitud harmònica en funció de la freqüència observarem un gràfic de tipus muntanya amb pics a cada harmònic important.

Els sistemes de control de les corrents elèctriques, en certes ocasions presenten realimentació positiva i poden ser responsables de fenòmens inter-harmònics de magnitud.

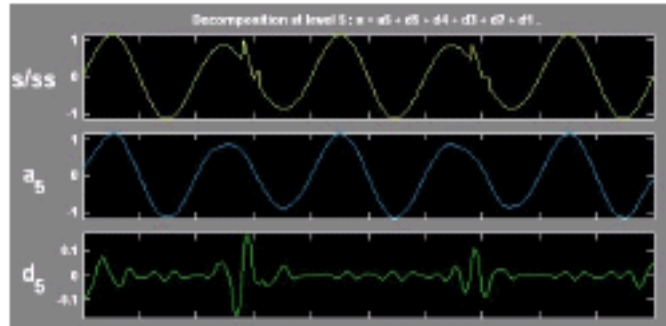


Figura 23: Original de Bizjak & Planimsic (2006) Imatge del centre soroll regular format per harmònics. Imatge inferior soroll format per inter-harmònics. Imatge superior, suma dels harmònics i els inter-harmònics deformant la regularitat del soroll.

Els fenòmens harmònics són tolerables mentre mantinguin magnituds controlables. La relació entre l'amplitud dels diferents harmònics i la deformació global de la magnitud observada depenen, endemés, de la magnitud de cada harmònic i la fase entre elles.

La deformació de les magnituds degut als harmònics es controlen amb filtres d'harmònics. Aquests modifiquen el diagrama de la impedància de la xarxa, agregant zeros i pics que ens han de donar l'efecte desitjat.

A.5.4.4.3 Estabilitat del soroll industrial

Segons Bizjak & Planimsic (2006) s'ha estimat que els convertidors de potència estàtics processen un 65 % del total d'energia elèctrica. La natura no lineal de l'intercanvi entre aparells elèctrics fan augmentar els harmònics del flux de corrent en les línies de transport elèctric, fet que provoca pèrdues i distorsions del voltatge i un consum poc eficient del corrent elèctric.

Per la senyal de soroll el problema arriba quan existeixen freqüències sub-harmòniques o inter-harmòniques ja que la reconstrucció de la senyal pot no ser el suficientment acurada respecte a la original. La transformada de Fourier únicament pot ser aplicada per ones periòdiques i té poca capacitat amb els senyals canviants. Tot i què els transitoris corresponen a ones no-periòdiques, aquests acostumen a ser d'altres freqüències, per la qual cosa cal esperar-los fora del rang de freqüències de la MRS.

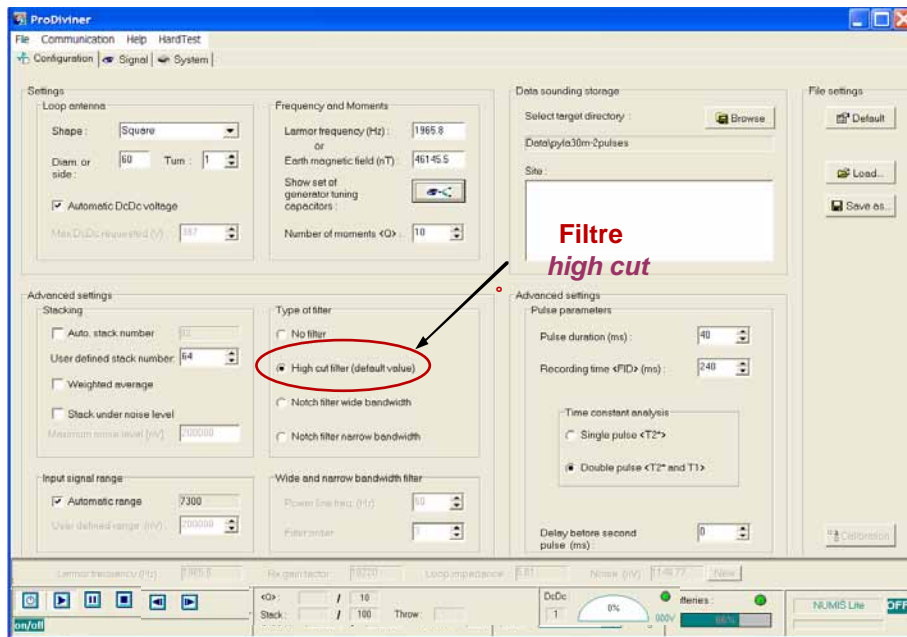


Figura 24: El programa d'adquisició de dades per defecte ja selecciona un filtrat per les freqüències altes amb un valor preestablert (de l'ordre del centenar de kHz, ones de telèfons mòbils i altres), per tal que els intra-harmònics tinguin poca influència en la senyal MRS.

Així doncs la clau per filtrar aquest soroll està en l'estabilitat de les freqüències industrials per línies elèctriques (Butler & Russel, 1993 i 2001, dins de Legchenko 2007). En aquest sentit Legchenko & Valla (2003) van efectuar una sèrie de mesures en línies elèctriques de diferents indrets d'occident i orient mitjà en el rang de freqüències del 37^o harmònic i el 41^o harmònic observant una inestabilitat de 0,5 Hz o superior (**Figura 25**), que pot ser degut en part a la inestabilitat de la freqüència fonamental de la línia, o parcialment producte de soroll extern.

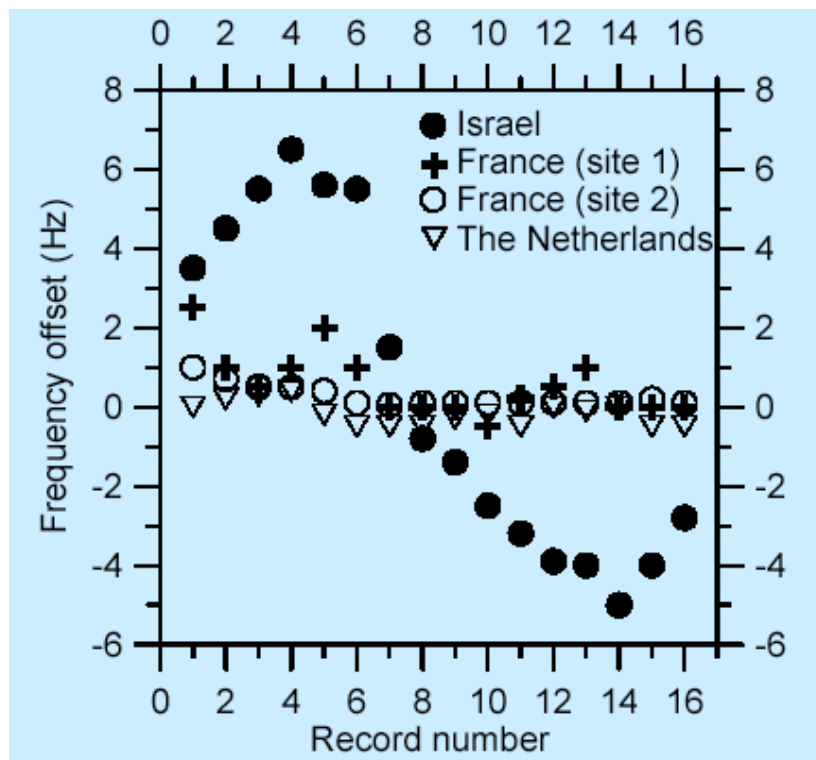


Figura 25: Figura de Legchenko (2007) on es mostra un exemple de freqüències mesurades dels k^o harmònics d'una línia elèctrica (valors relatius a 50 kHz). Les variacions més importants s'han obtingut a Israel i es desconeixen les causes.

La proporció dels harmònics de 50 Hz, amb un ample de banda (*bandwidth*) de ± 1 Hz per suplir el límit de la resolució de la transformada de Fourier, en el soroll total pot representar ser el 50% o solament el 20% dins d'un ample de banda (*bandwidth*) de ± 150 Hz (**Figura 26**). Aquest alt percentatge de soroll no-estacionari observat a prop de les línies elèctriques pot ser explicat pel fet que, en el rang de freqüències investigada, els harmònics amb un número baix hagin estat filtrats i únicament resten els més elevats (20° a 55°). També pot ser degut a que les línies elèctriques actuïn com antenes electromagnètiques i canalitzi tant el soroll artificial com el natural d'una important àrea, amplificant el gruix del soroll aleatori, especialment de component vertical que és el que es mesura en les antenes de MRS.

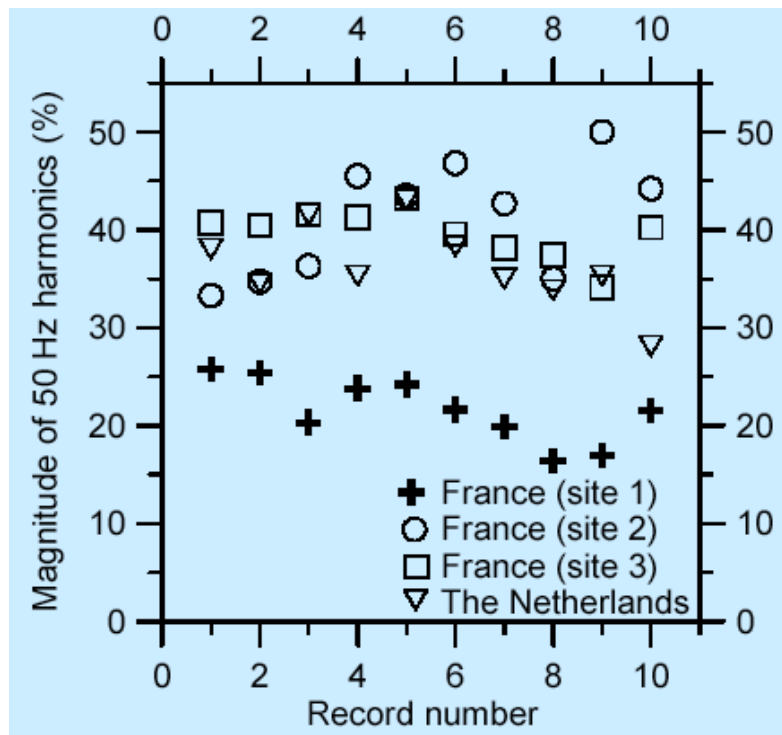


Figura 26: Proporció del soroll produït pels harmònics de 50 Hz respecte al soroll total

El soroll industrial pot ser disminuït eficientment efectuant una configuració de l'antena en 8 (Trushkin *et al.*, 1994; dins de Bernard 2007). Depenent del lloc s'aconsegueix una millora de la relació S/N de 2 a 10 cops, no obstant en segons quins indrets això pot ser encara insuficient i sigui necessari efectuar un filtrat.

A.5.4.4.4 Filtres

Els filtres son molt útils per descartar senyals no volgudes, com pot ser el soroll artificial, industrial o natural. Alguns filtres poden ser molt complicats però per un soroll regular el filtre de pas de banda (*Bandpass filter*) pot ser força útil per l'atenuació del senyal. Filtres més complicats para la senyal MRS poden ser la de *block subtraction*, la de *sinusoid subtraction* (ambdós no presents en SAMOVAR ni en PRODIVINER) i el *notch filtering* eventualment combinat amb un promig harmònic (*running average filter*) tal com explica Legchenko (2007).

Tant el *Bandpass filter* com el *Running Average filter* són aplicables en software, posteriorment a l'adquisició de les dades (programa SAMOVAR). Pel que fa referència a la resta de filtres, únicament es disposa del *notch filtering*, tant en hardware (Prodiviner) com en Software (SAMOVAR).

A.5.4.4.4.1 *Running average filter*

Aquest filtre atenua l'amplitud (E_o) de senyals amb una freqüència superior e inferior a la de referència (Larmor) en un rang de temps prefixat. En SAMOVAR aquest filtre és una simulació numèrica del filtre electrònic RC de primer ordre (20 dB/s) amb una constant del temps de filtrat T = RC. El filtre també s'utilitza per altres fenòmens naturals que no tenen a veure amb l'electricitat, com per exemple oscil·lacions climàtiques estacionals dins d'una senyal climàtica anual, essent la estacional de major freqüència que l'anual i la que cal ser filtrada. Per fer-ho entenedor podem dir que cada mes, a excepció dels dos dels extrems, és suavitzat efectuant una mitja d'aquest amb la resta de mesos cap amunt com cap a vall segons el número de mesos estipulat per fer el filtrat. El filtre te la següent expressió:

$$\hat{o}_i = \sum_{n=M}^M (2M+1)^{-1} \hat{o}_{i+n}$$

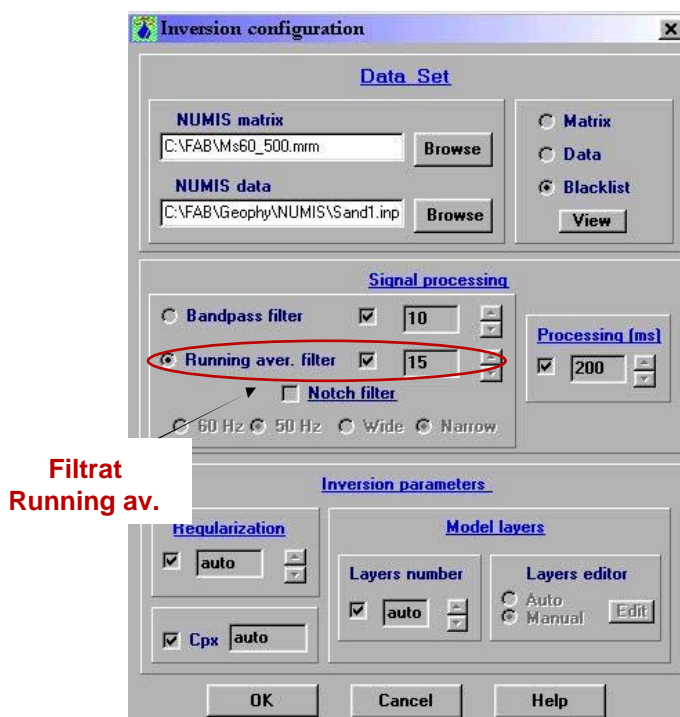


Figura 27: Representació de la situació del filtre en el programa d'interpretació 1D SAMOGON. Cal tenir en compte que s'ha d'introduir el temps (en ms) de registre per efectuar el promig al voltant de la freqüència de Larmor.

A.5.4.4.4.2 Bandpass filter

Aquest filtre únicament està disponible en Software (SAMOVAR) i te un efecte sobre el suavitzat del temps de relaxació (T_2^*).

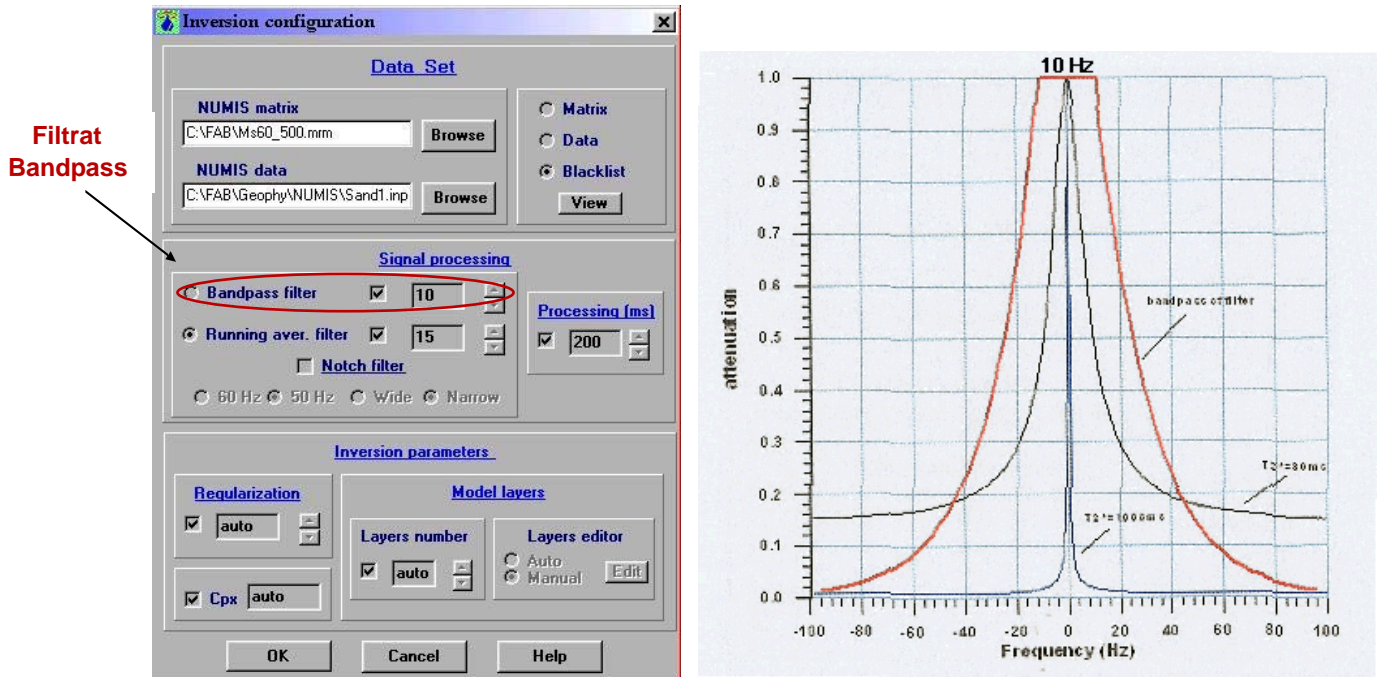


Figura 28: Finestra de SAMOVAR indicant la posició d'on es troba el filtre. Exemple del funcionament del Bandpass filter fixat en 10 Hz (línia vermella) al voltant de la freqüència de Larmor, vorejant la senyal més curta (30 ms) i la més llarga (1000 ms).

A.5.4.4.3 Notch filter

Segons Legchenko (2007), quan es dissenya un filtre de baix pas de banda (*low-pass*) per una senyal MRS cal tenir en compte que, el temps de relaxació de la ressonància magnètica (T_2^*) varia típicament entre 40 i 400 ms i això determina l'ample de banda del filtre.

La freqüència de Larmor no pot ser considerada com constant, donat que està afectada per les variacions del camp magnètic en magnitud i en el temps, per la qual cosa el ample de banda ha de ser una finestra suficient (4 Hz).

El filtre *notch* queda centrat en les freqüències dels harmònics de les línies elèctriques de 50 Hz i 60 Hz, i aquestes solament son conegudes de forma aproximada, per aquesta raó el filtre *notch* talla a ± 1 Hz de pas de banda al voltant de cada harmònic.

Pot efectuar-se una barreja de filtres que consisteix en combinar el *Bandpass filter* centrat en la freqüència de Larmor i un *Notch filter* amb un pas de banda de ± 1 Hz centrat el més possible a prop del harmònic fonamental de la freqüència de Larmor (**Figura 29**).

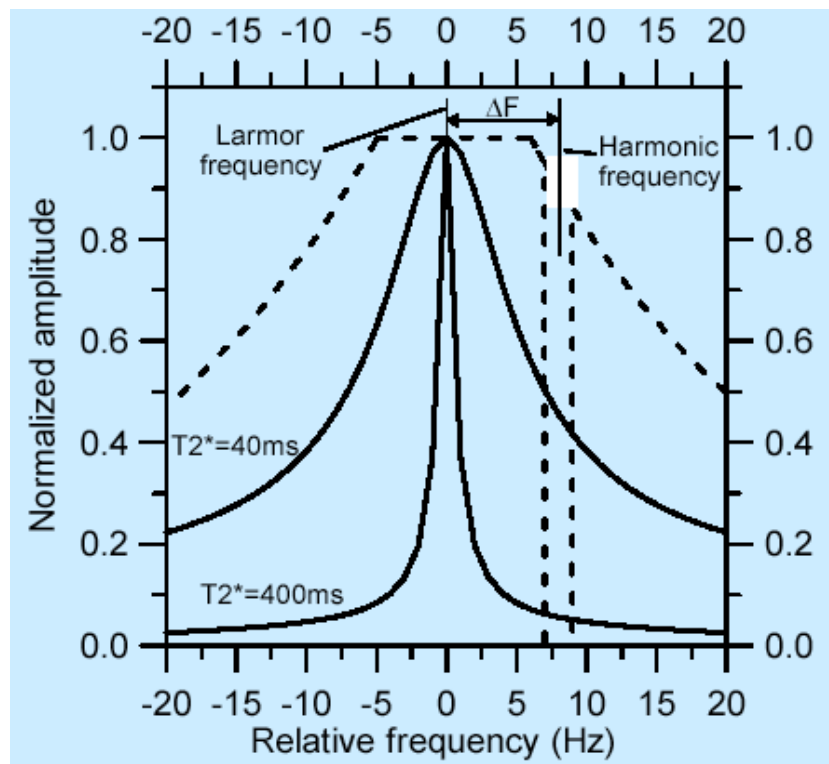


Figura 29: Figura original de Legchenko (2007), espectre de la senyal exponencial (línia contínua) i la combinació dels filtres *Bandpass* i *Notch* (línia discontinua). El filtre *Notch* elimina de 3 a 5 harmònics (no mostrat en la figura).

A diferència d'altres mètodes com el *sinusoid subtraction*, el filtre *Notch* sempre elimina una banda freqüència propera i pot afectar a la senyal. Cal tenir en compte aquest efecte de distorsió en la senyal de MRS. Els models numèrics que es deriven de l'aplicació del filtre *Notch* milloren significativament l'estimació dels paràmetres per totes les freqüències de les línies elèctriques. El filtre *Notch* elimina eficientment el soroll sinusoidal i no hi ha pràcticament distorsió en el senyal sintètic quan $\Delta F > 4$ Hz, mentre que per decalatges de freqüències inferiors ($\Delta F \leq 4$ Hz) el *Notch filter* corromp el senyal. No obstant la influència del soroll sense ser filtrat és encara més nociu i força sovint comporta incertesa.

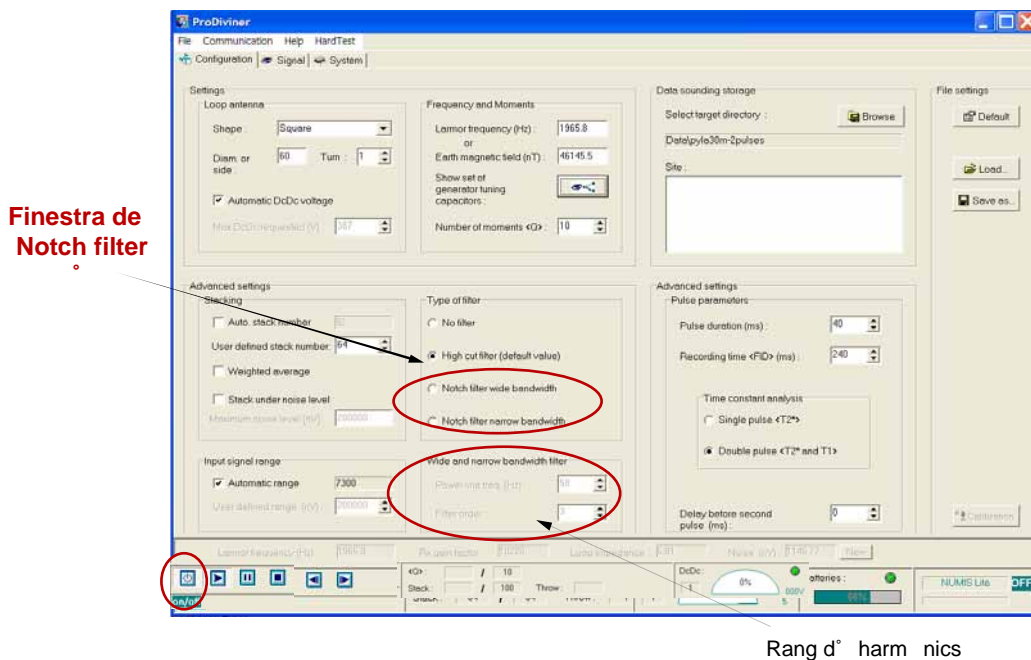


Figura 30: Opció de filtrat de la senyal directament en l'adquisició (Prodiviner) que permet filtrar els 50 Hz o 60 Hz, sigui en una gamma ampla (*wide*) o estreta (*narrow*). Si el sondatge MRS s'efectua en un indret sense soroll aquest filtre no fa falta. En el cas contrari (presència de línies elèctriques) el filtrat deurà ser utilitzat primerament en la seva banda ampla (25-10 Hz) si l'adquisició de les dades s'efectua a prop d'un harmònic de 50 Hz-60 Hz, mentre que el filtrat en la gamma estreta (10 - 1 Hz) s'efectuarà si els harmònics estan molt a prop de la freqüència de Larmor (4 - 8 Hz). El rang d'harmònics triat (N_b) únicament pot ser un número sencer i imparell, el 1 (primer harmònic, H50), 3 (H50 \pm 50), 5 (H50 \pm 50 \pm 150) i així successivament. Aquesta opció existeix tant en el programa PRODIVINER com en el SAMOVAR, no obstant en el primer el filtrat s'efectua a cada stack mentre que en el segon s'efectua un cop fet tots els stacks.

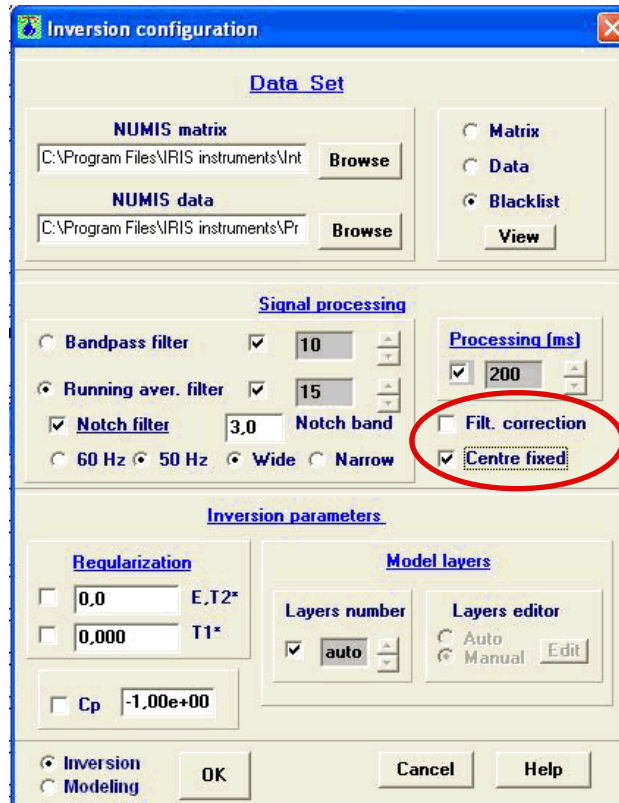


Figura 31: Opció de filtrat de la senyal un cop registrada la senyal amb el programa SAMOVAR. Si la opció *Centre fixed* no està escollida llavors el filtre *Notch* treballa en un rang múltiple de 50/60 Hz. En el cas que l'opció de *Centre fixed* és el filtre *Notch* qui escull la freqüència, la qual cosa pot ser útil si la freqüència de Larmor del sector no és estable. L'opció *Filter correccions* utilitza un algoritme de compensació de l'efecte del filtre sobre la senyal si la freqüència de Larmor se situa a prop d'un dels harmònics filtrats segons Legchenko & Valla (2003).

Legchenko (2007, pag. 498) efectuant assaigs de filtrat de soroll en diferents indrets ha observat que els millors resultats s'obtenen allà on el soroll industrial presenta un percentatge important d'harmònics de 50 Hz, no obstant en els indrets on un dels harmònics de la línia elèctrica està a prop de la freqüència de Larmor el filtrat també distorsiona la senyal de interès (**Figura 32**).

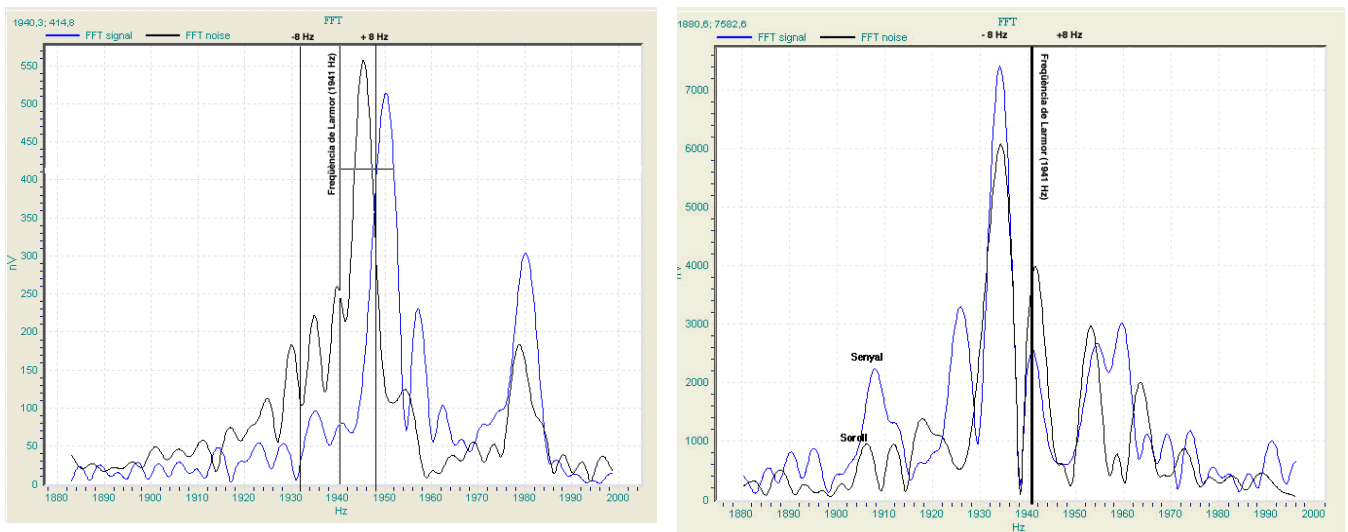


Figura 32: Dades obtingudes a Mañeru, Pamplona. El soroll és produït per una planta d'àrids amb un forn d'alta potència a una distància de més de 300 m. A la figura de la esquerra (148 *weighted stacks*) s'observa l'espectre del soroll amb un harmònic proper a la freqüència de Larmor (1941 Hz), a menys de 8 Hz. A l'espectre de freqüències de la dreta (113 *weighted stacks*) s'ha aplicat el filtre *Notch wide* amb un ordre d'harmònics de 3 ($H50 \pm 50$ Hz) i s'observa que s'ha distorsionat la senyal ajuntant-la amb el soroll.

En funció de l'experiència obtinguda fins al moment (Legchenko, 2007) es pot dir que si el decalatge de la freqüència de l'harmònic és inferior a 8 Hz respecte a la de Larmor llavors el filtre *Notch* pot ser eficientment utilitzat, mentre que per decalatges inferiors als 8 Hz el filtre *Notch* pot suprimir una part important de la informació de la senyal MRS per temps d'excitació importants ($T_2^* > 200$ ms) i en aquests casos cal utilitzar tècniques de subtracció.