

F 809 - Instrumentação para Ensino
1º Semestre 2004

Relatório Final

Captadores de instrumentos musicais elétricos e a Lei
de Indução de Faraday



Aluno: Cassiano Rezende Pagliarini RA:008314

Orientador: Prof. Dr. Antonio Manoel Mansanares

Objetivos do Projeto

Exemplificar a Lei de Indução de Faraday através do funcionamento de captadores eletromagnéticos de instrumentos musicais elétricos bem como o estudo das distorções sonoras causadas pelos pedais eletrônicos e a relação destas com a alteração no chamado timbre dos instrumentos.

Introdução

Instrumentos musicais como violão, violino, etc, produzem sons devido ao formato de seus corpos que funcionam como caixas acústicas que fazem com que o som produzido pela vibração de suas cordas sofra interferências construtivas obtendo assim uma intensidade sonora que é perceptível para nossa audição. O som destes instrumentos pode ser amplificado com certa qualidade utilizando-se microfones que captam o som diretamente dessas caixas acústicas ou ainda utilizando os chamados captadores de contato, que possuem um material piezo-elétrico, que por estar em contato com o instrumento sente as vibrações provocadas pelo som e responde de forma linear, transmitindo um sinal elétrico aos amplificadores.

Porém, instrumentos como guitarras e contrabaixos elétricos têm seu corpo maciço e assim é necessário fazer a captação do som produzido pelas vibrações de suas cordas de outra maneira.

Estes instrumentos possuem captadores eletromagnéticos, cujo princípio de funcionamento é a Lei de Faraday, que “percebem” a vibração das cordas e transmitem um sinal aos amplificadores contendo informação sobre a frequência de vibração das cordas.

A Lei de Indução de Faraday

Em 1831 Michael Faraday relatou uma série de experimentos, incluindo dois que podem ser caracterizados com segue abaixo:

- Experimento 1: Faraday puxou uma espira para a direita através de um campo magnético (Fig. 1a). Uma corrente surgiu na espira.

- Experimento 2: Faraday moveu desta vez o campo magnético para a esquerda segurando a espira (Fig. 1b). Novamente uma corrente surgiu na espira.

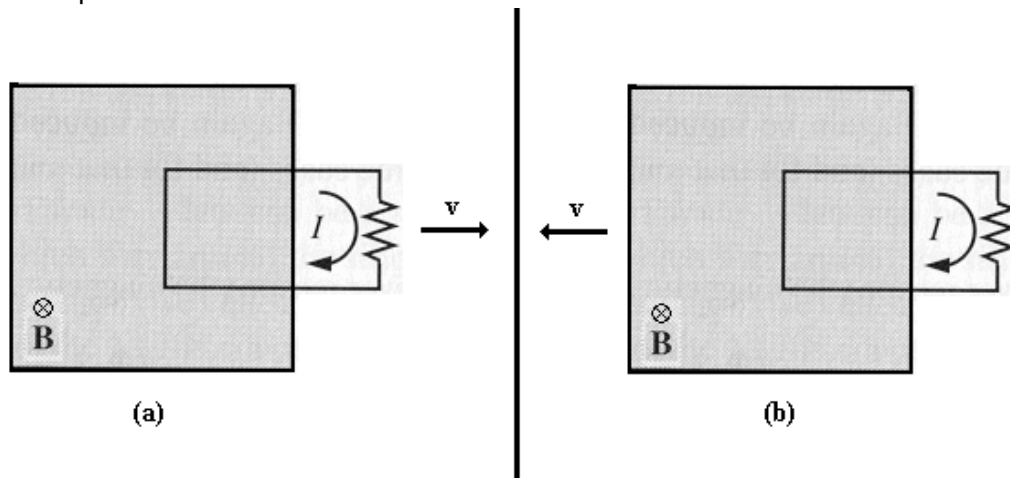


Fig. 1 - Experimentos de Faraday

No primeiro experimento, se a espira é puxada para a direita com velocidade v , a força magnética (devido ao movimento das cargas no campo magnético B) será responsável por uma força eletromotriz induzida na espira.

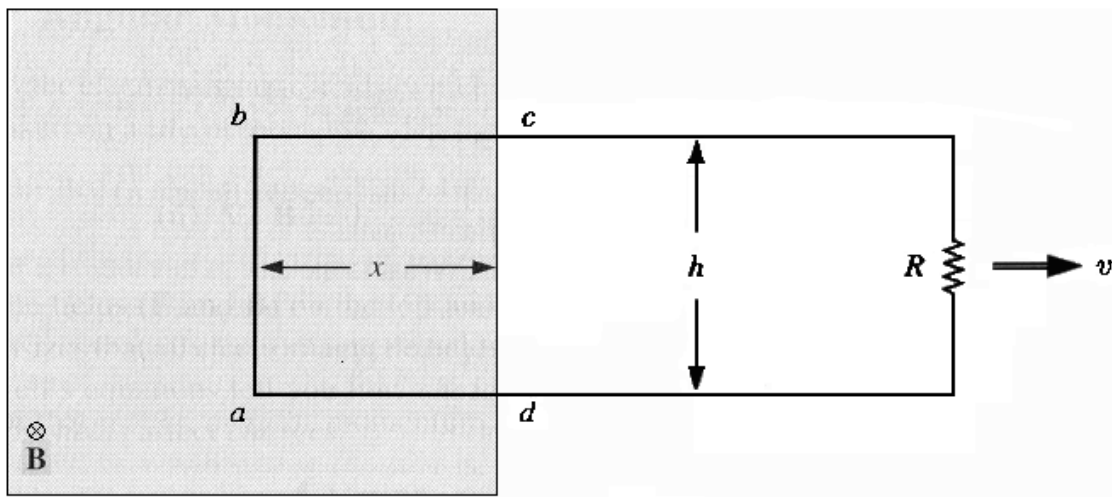


Fig. 2 - Experimento 1 de Faraday em detalhe.

Calculando a *fem* induzida na espira (trabalho por unidade de carga realizado pela fonte) temos:

$$\varepsilon \equiv \oint \vec{f}_{mag} \cdot d\vec{l} = \oint (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l} \quad \text{eq. 1}$$

onde f_{mag} é força por unidade de carga.

A integral acima é nula para o caminho do ponto c ao ponto d (pois não está sob a ação do campo B) e também de d até a e b até c (pois nesses segmentos a força magnética não realiza trabalho, uma vez que esta é perpendicular ao fio). Portanto resta apenas a integral no segmento ab . Desta forma a *fem* na espira é:

$$\varepsilon = \int_a^b (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l} = vBh \quad \text{eq. 2}$$

Podemos ainda expressar a *fem* induzida ε através do fluxo de campo magnético na espira da seguinte forma:

$$\phi \equiv \int \vec{B} \cdot d\vec{a} = Bhx \quad \text{eq. 3}$$

Uma vez que a espira se move, o fluxo através dela decresce com o tempo:

$$\frac{d\phi}{dt} = Bh \frac{dx}{dt} = -Bhv \quad \text{eq.4}$$

onde o sinal negativo se deve ao fato de dx/dt ser negativa.

Assim podemos relacionar a *fem* induzida ε com a variação do fluxo de campo magnético através da espira da seguinte forma:

$$\varepsilon = -\frac{d\phi}{dt} \quad \text{eq. 5}$$

Esta é a chamada lei do fluxo e pode ser provado que também é aplicável para espiras de formato qualquer se movendo em direções arbitrárias através de campos magnéticos não uniformes.

O que chamou a atenção de Faraday é que a mesma fem era induzida no experimento 2, importando apenas o movimento relativo entre a espira e o campo magnético. Porém, se a espira não se move, a força que realiza trabalho e dá origem a fem não pode ser magnética, pois cargas estacionárias não experimentam forças magnéticas, sendo que apenas campos elétricos exercem força sobre cargas estacionárias.

Uma vez que não havia nenhum campo elétrico externo no experimento, Faraday então verificou que a variação do campo magnético através da espira induzia o surgimento de um campo elétrico, sendo este campo elétrico induzido o responsável pela fem na espira no experimento 2.

Assim o campo elétrico E está relacionado com a variação no campo magnético B pela equação:

$$\varepsilon = \oint \vec{f}_s \cdot d\vec{l} = \oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\phi}{dt} \quad \text{eq. 6}$$

$$\therefore \oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\int \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{a} \quad \text{eq. 7}$$

Está é a forma integral da Lei de Faraday. Utilizando o Teorema de Stokes que nos diz que:

$$\oint \vec{A} \cdot d\vec{l} = \int (\vec{\nabla} \times \vec{A}) \cdot d\vec{a} \quad \text{eq. 8}$$

podemos reescrever o lado esquerdo como sendo

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = \int (\vec{\nabla} \times \vec{E}) \cdot d\vec{a} \quad \text{eq. 9}$$

e desta forma a equação 7 fica

$$\int (\vec{\nabla} \times \vec{E}) \cdot d\vec{a} = -\int \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{a} \quad \text{eq. 10}$$

de onde se obtém a lei de Faraday em sua forma diferencial

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \text{eq. 11}$$

A Guitarra Elétrica e seus captadores

Enquanto o som de um violão depende da ressonância produzida na parte oca do instrumento pelas oscilações das cordas, uma guitarra elétrica é um instrumento maciço, não possuindo uma caixa de ressonância.

Em instrumentos como as guitarras as oscilações das cordas metálicas são sentidas pelos captadores eletromagnéticos que enviam os sinais para os amplificadores e alto-falantes.

A estrutura básica de um captador é mostrada na Fig. 3. O fio que liga o instrumento ao amplificador é enrolado em torno de um pequeno ímã. O campo magnético do ímã produz um pólo norte e um pólo sul no trecho da corda metálica (que é feita de material magnetizável) imediatamente acima do ímã. Este trecho cria então seu próprio campo magnético. Uma vez que a corda é tangida e, assim, passa a oscilar, seu movimento relativo à bobina varia o fluxo de seu próprio campo magnético através da bobina, induzindo nela uma corrente. Como a corda oscila se aproximando e se afastando da bobina, a corrente induzida muda de sentido com a mesma frequência da oscilação da corda, transmitindo desse modo a sua frequência ao amplificador e alto-falantes.

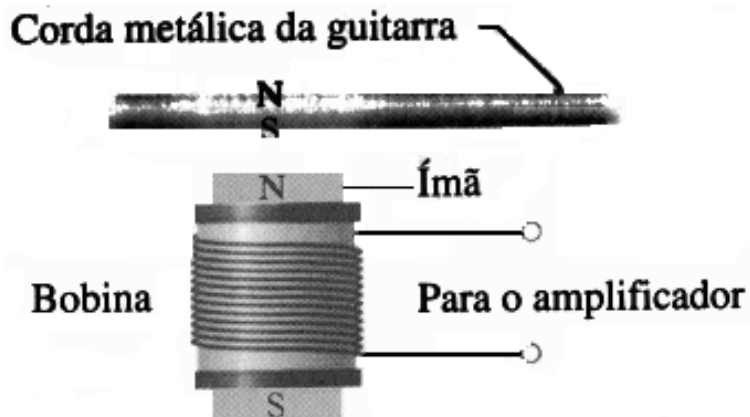
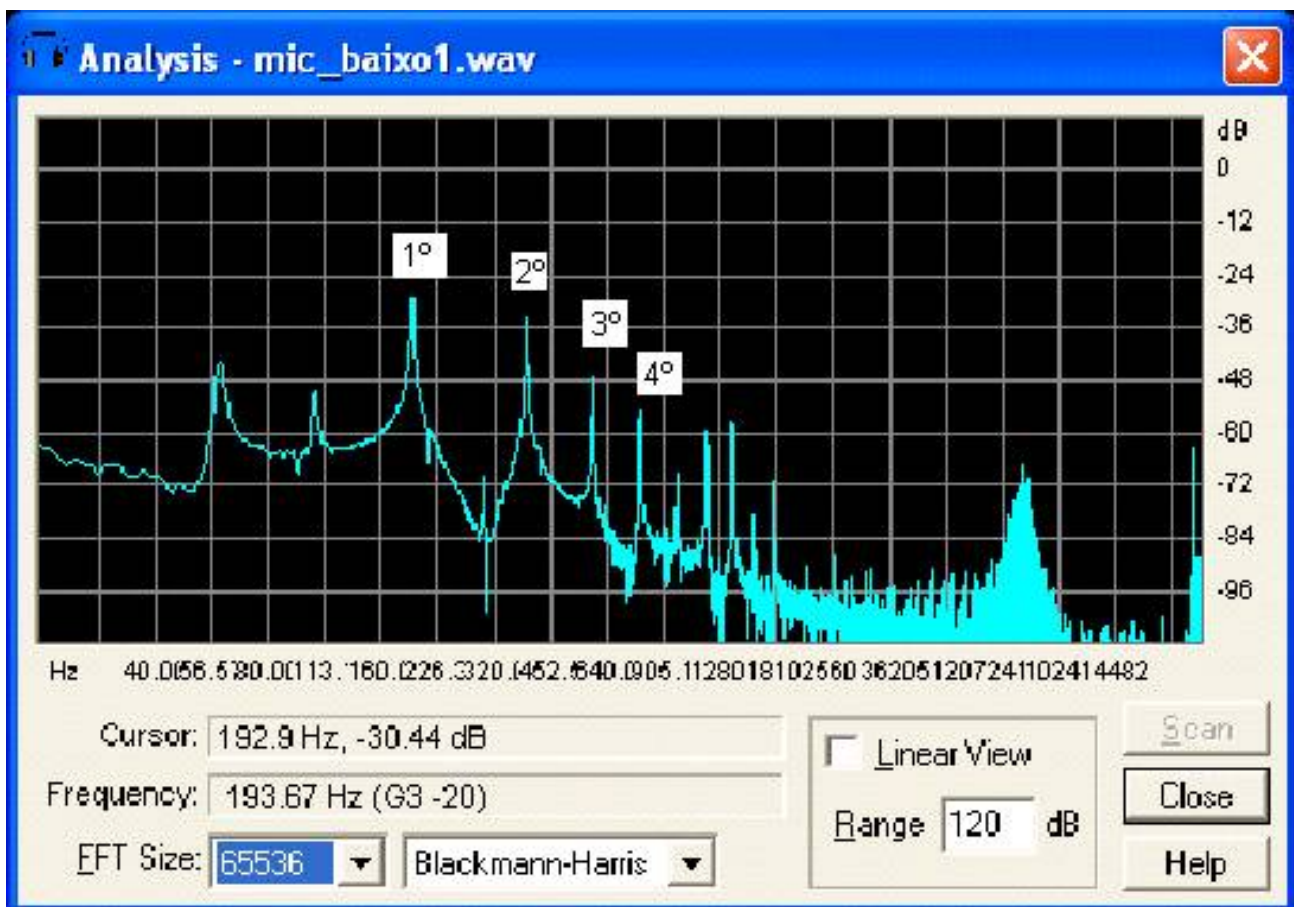


Fig. 3 - Vista lateral de um captador eletromagnético. Quando a corda metálica é colocada a oscilar, a variação do fluxo magnético acima da seção da bobina induz nela uma corrente.

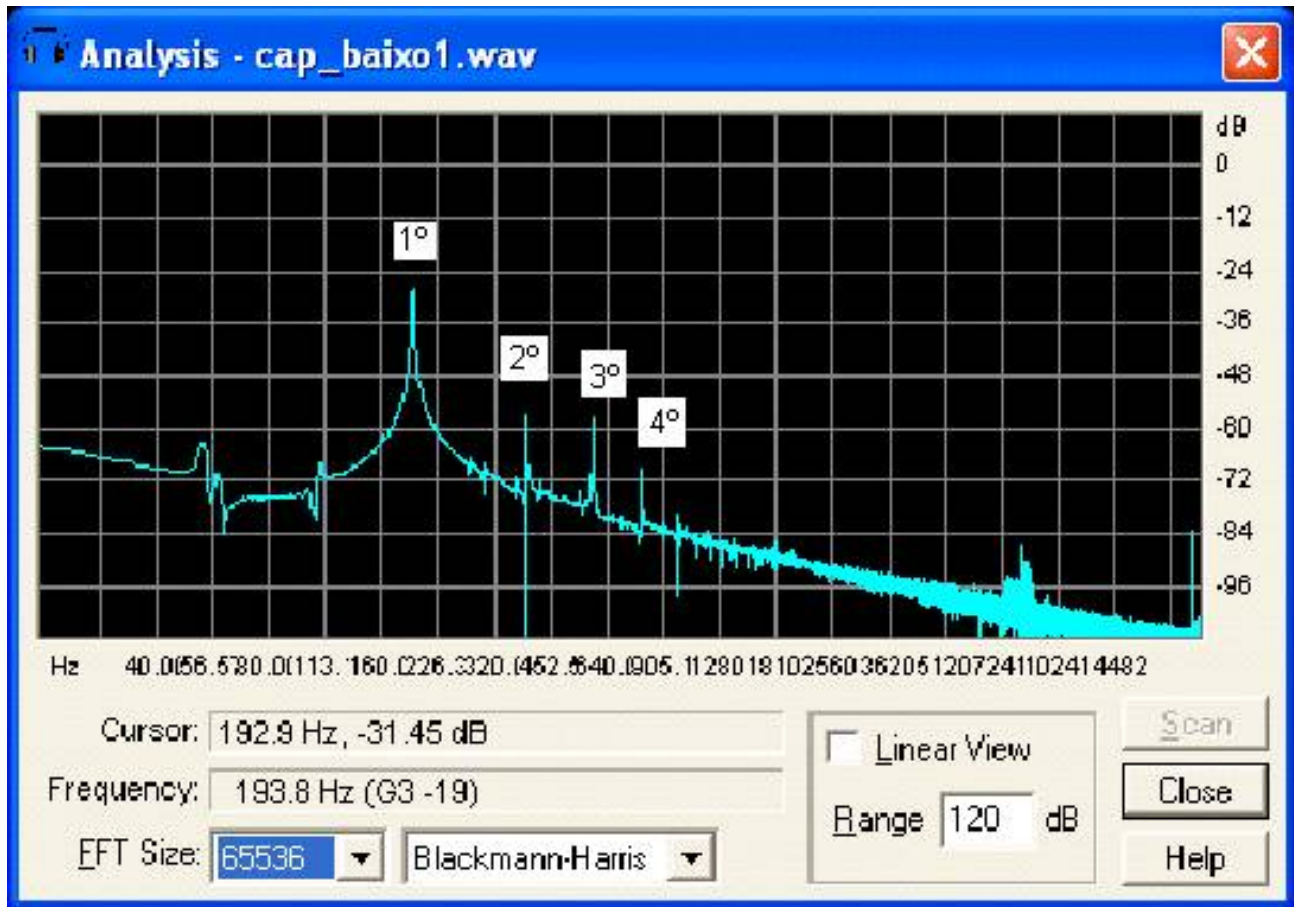
Resposta dos Captadores

Para verificar a resposta em frequência dos captadores eletromagnéticos fizemos a captação da nota musical Sol3 de um contrabaixo elétrico de duas maneiras (com o captador eletromagnético e com um microfone). Então verificamos seus espectros de frequências com o software "Cool Edit", comprovando assim que os mesmos harmônicos estão presentes no som captado pelo microfone e pelo captador magnético.

Abaixo temos o respectivo espectro de frequências do som obtido com o microfone. Nota-se a grande influência do ruído da linha (60 Hz), porém podemos ainda verificar a frequência fundamental da nota Sol em cerca de 194Hz.



Já no som obtido com o captador eletromagnético, percebemos um som bem mais definido com menos ruídos que o obtido com um microfone e a presença dos mesmos harmônicos listados na tabela 1.



Harmônico	Frequência (microfone) Hz	Frequência (Captador) Hz
fundamental	193,7	193,8
2°	388,1	388,1
3°	584,2	584,2
4°	780,1	780,6

Tabela 1 - Frequências correspondentes aos harmônicos marcados para o som obtido com o microfone e o captador eletromagnético.

Captadores e sua influência no timbre musical

Podemos obter diferentes timbres no som dependendo do arranjo de captadores utilizados no instrumento. Aqui faremos a captação de um mesmo som (nota musical Si) de uma guitarra elétrica, porém utilizando diversos arranjos com os captadores.

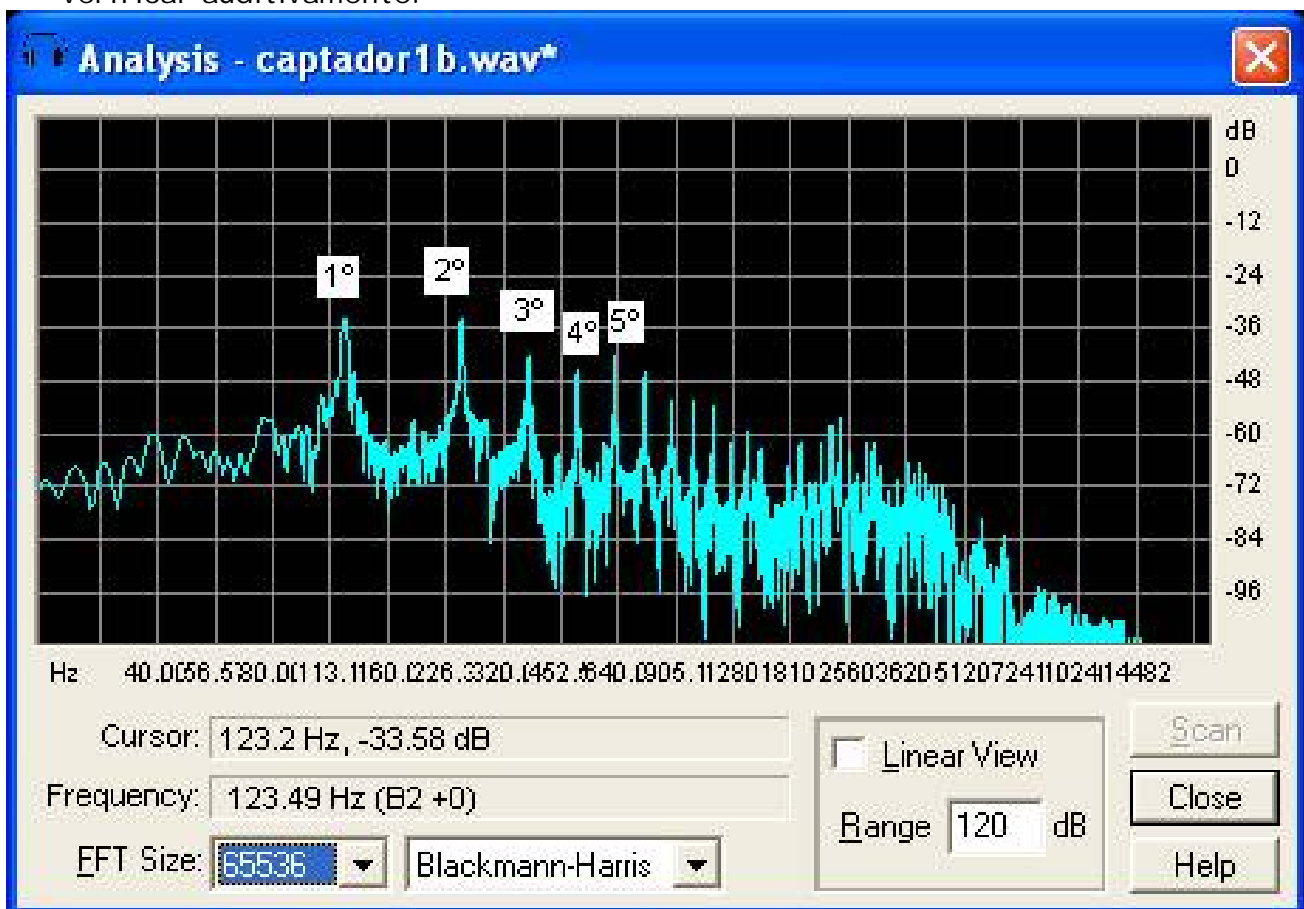
Para isto, utilizamos uma guitarra com três captadores de bobina simples e fizemos a captação da nota Si primeiramente apenas com o captador mais

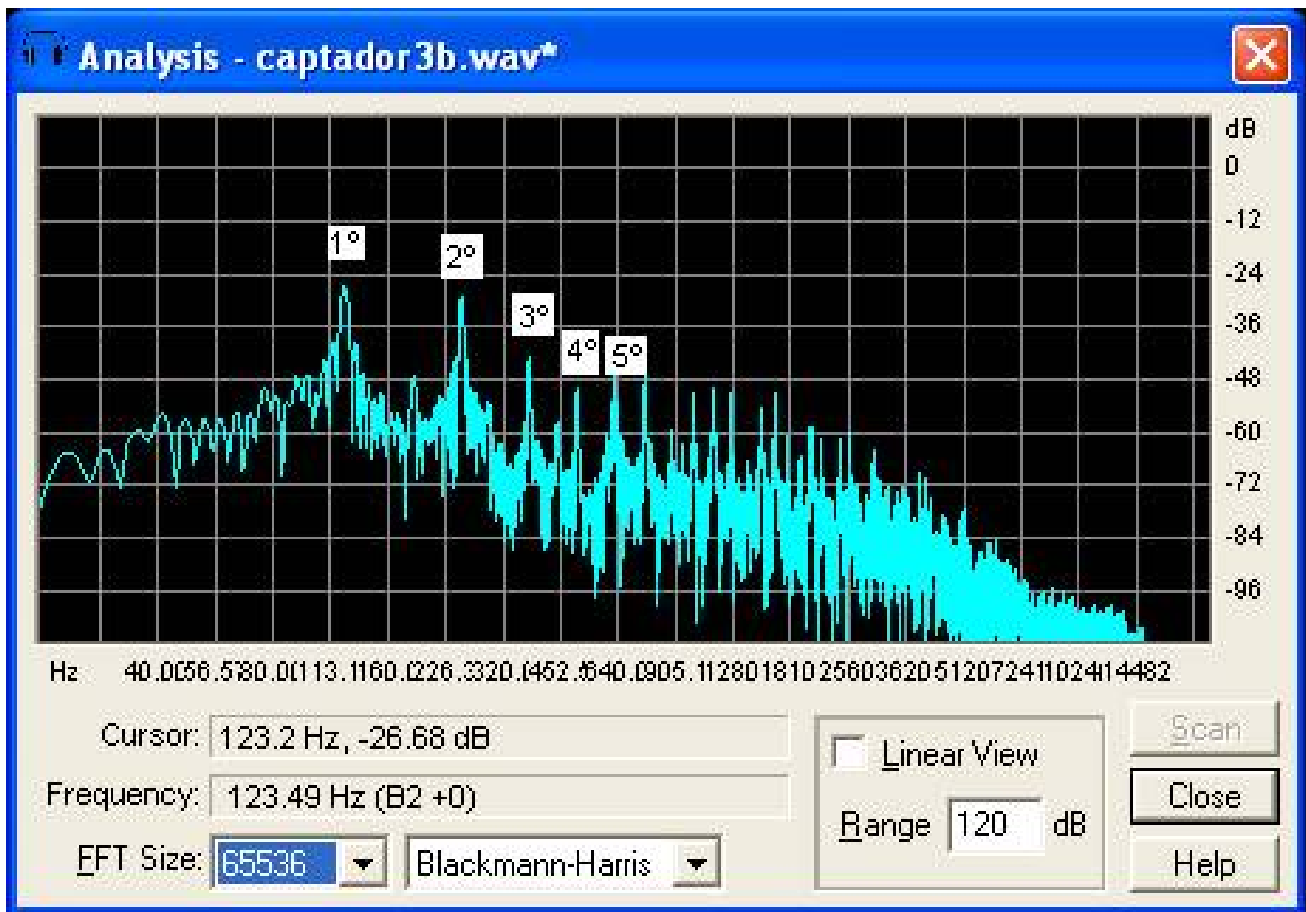
próximo a ponte (captador 1) ligado e posteriormente somente com o captador mais próximo ao braço do instrumento ligado (captador 2).



Fig. 6 -Guitarra com dois captadores de bobina dupla e outra com três captadores de bobina simples respectivamente.

Posteriormente foi feita a análise de Fourier para os dois casos onde é possível verificar abaixo a mudança nas intensidades relativas dos harmônicos que compõem o som gravado, fato que altera o timbre sonoro como é possível verificar auditivamente.





A seguir temos na tabela 2 as intensidades dos harmônicos para os dois captadores:

Harmônico	Frequência (Hz)	Int. Captador 1 (dB)	Int. Captador 3 (dB)
fundamental	123,5	-35,4	-26,7
2°	245,8	-35,2	-30,4
3°	368,3	-40,8	-40,6
4°	498,7	-44,8	-50,2
5°	620,8	-40,7	-48,2

Tabela 2 - Intensidades dos harmônicos assinalados para diferentes captadores do instrumento.

Desta forma podemos verificar que o captador mais próximo ao braço do instrumento (captador 3) é mais sensível aos primeiros harmônicos enquanto que o captador mais próximo a extremidade das cordas (captador 1) é mais sensível aos harmônicos superiores.

Para tentarmos explicar este fato podemos verificar que para os primeiros harmônicos a variação de fluxo será maior no captador que está mais distante da extremidade das cordas sendo este mais sensível a sons mais graves. Justificando assim a mudança no timbre com a posição do captador.

Note que após certo harmônico a variação de fluxo tende a ficar igual independente da posição do captador.

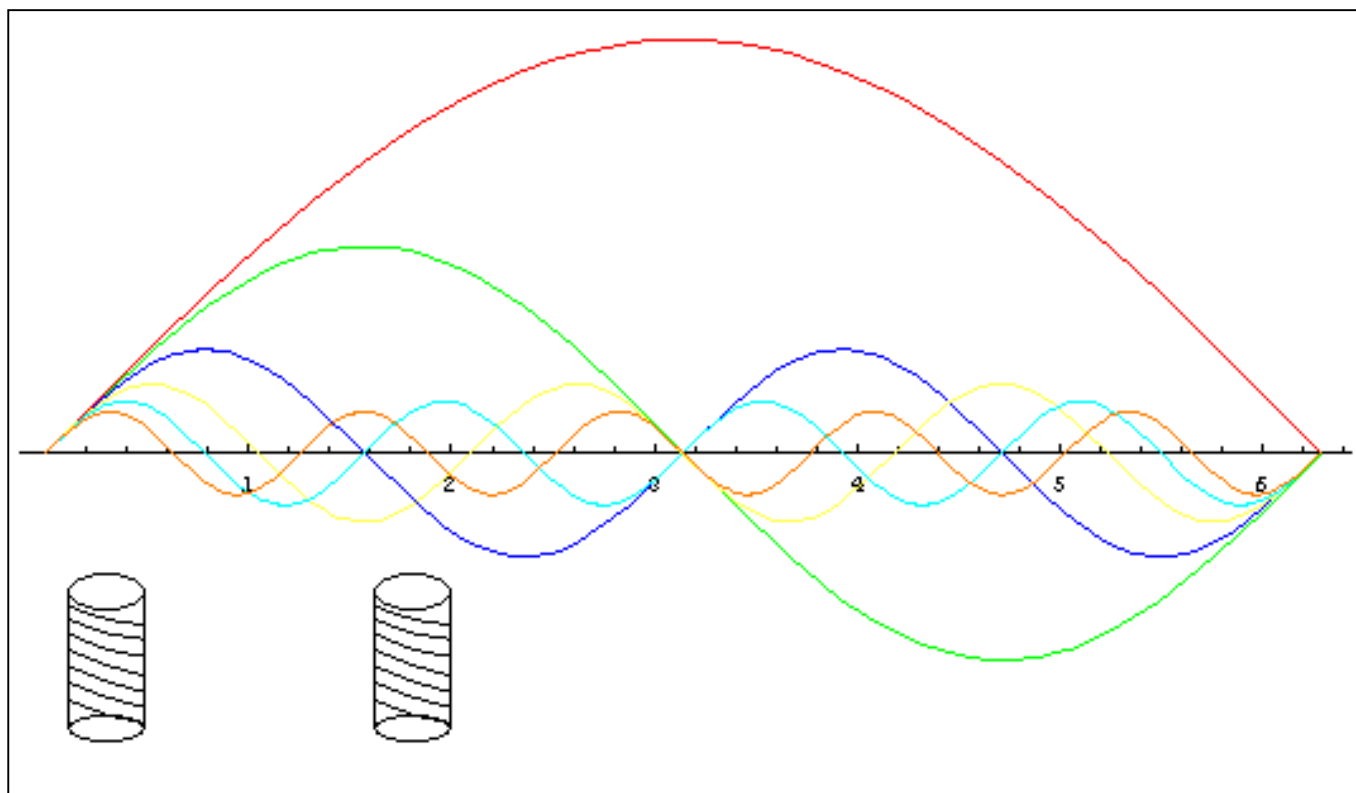


Fig. 9 - Harmônicos e a sensibilidade do captador dependendo de sua posição.

Efeitos e Distorções

Encontramos em vários estilos musicais alguns efeitos sonoros que são amplamente usados pelos músicos. Exemplificaremos aqui dois dos efeitos mais usados em guitarras, os chamados "wah-wah" e "overdrive", de forma a verificar a relação entre o espectro de frequências do som original e modificado, analisando assim sua relação com a alteração do timbre do som.

O efeito "overdrive" é aquele que distorce o som deixando com uma aparência saturada dando a impressão de que os amplificadores não suportam aquela intensidade sonora. De certa forma o que ocorre é isto, ou seja, o sinal de entrada é amplificado acima do limite do amplificador.

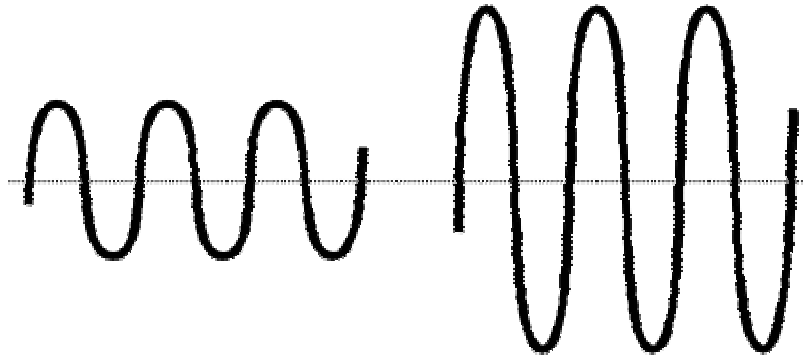


Fig. 10 - Sinal antes e depois de ser amplificado

Se amplificarmos o sinal além do limite do amplificador obteremos um sinal praticamente similar ao de uma onda quadrada conforme vemos abaixo.

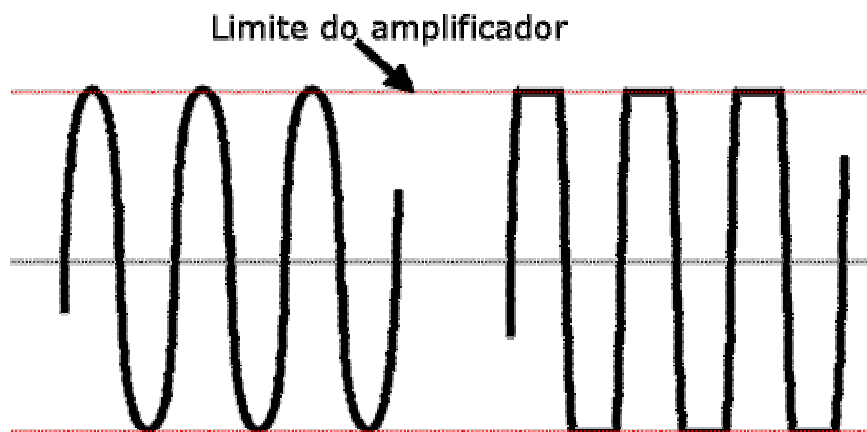


Fig. 11 - Sinal amplificado e sinal saturado (amplificado além do limite do amplificador) respectivamente.

Os amplificadores valvulados profissionais possuem vários estágios de potência permitindo o ajuste da amplificação em etapas separadas. Desta forma é possível ultrapassar o limite de amplificação no primeiro estágio e

obter um som saturado independente do quanto as outras etapas amplificarão o som.

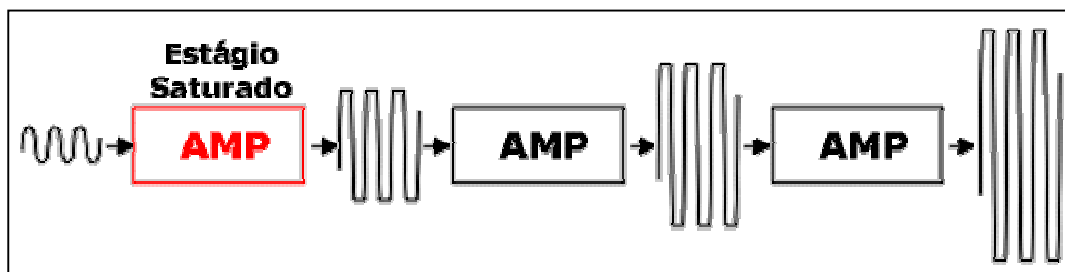
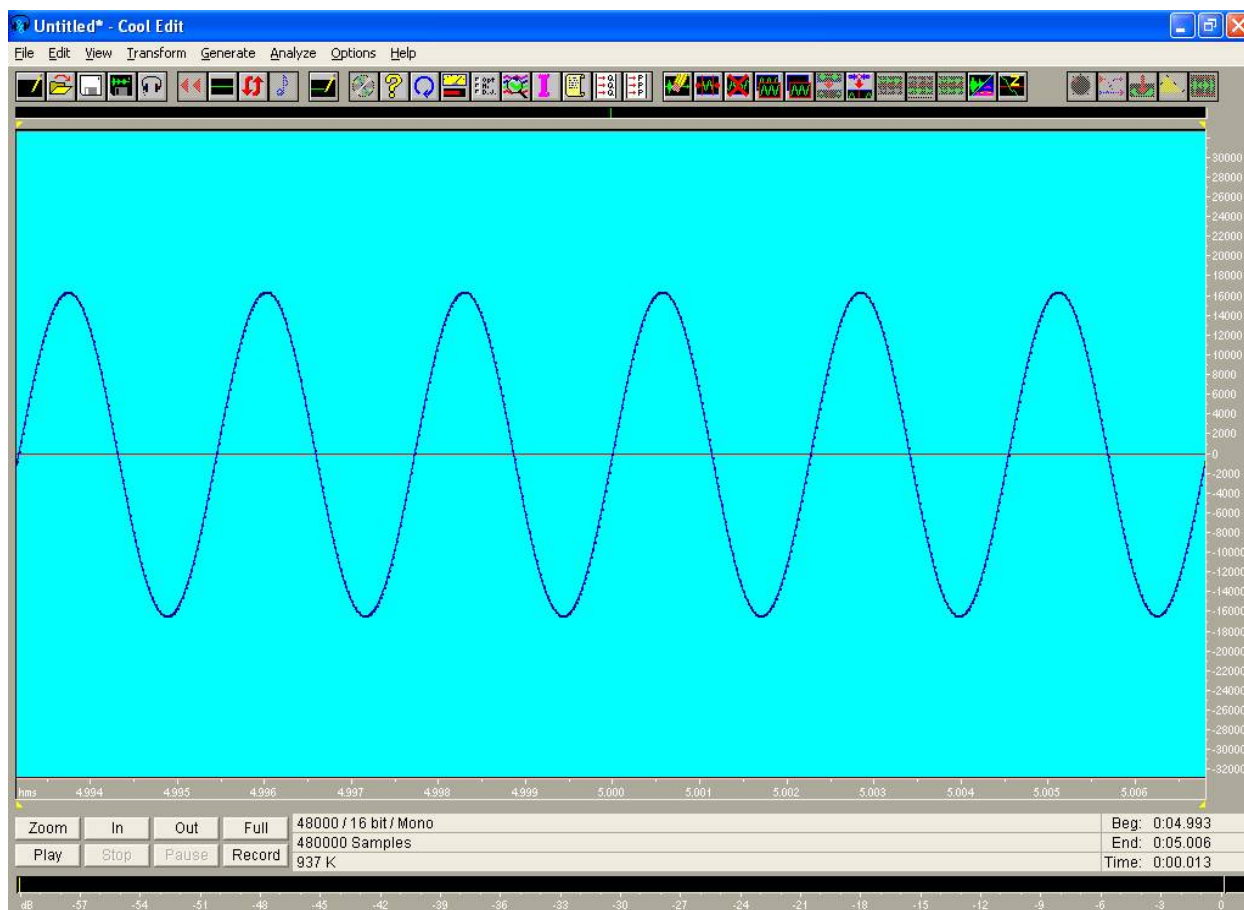


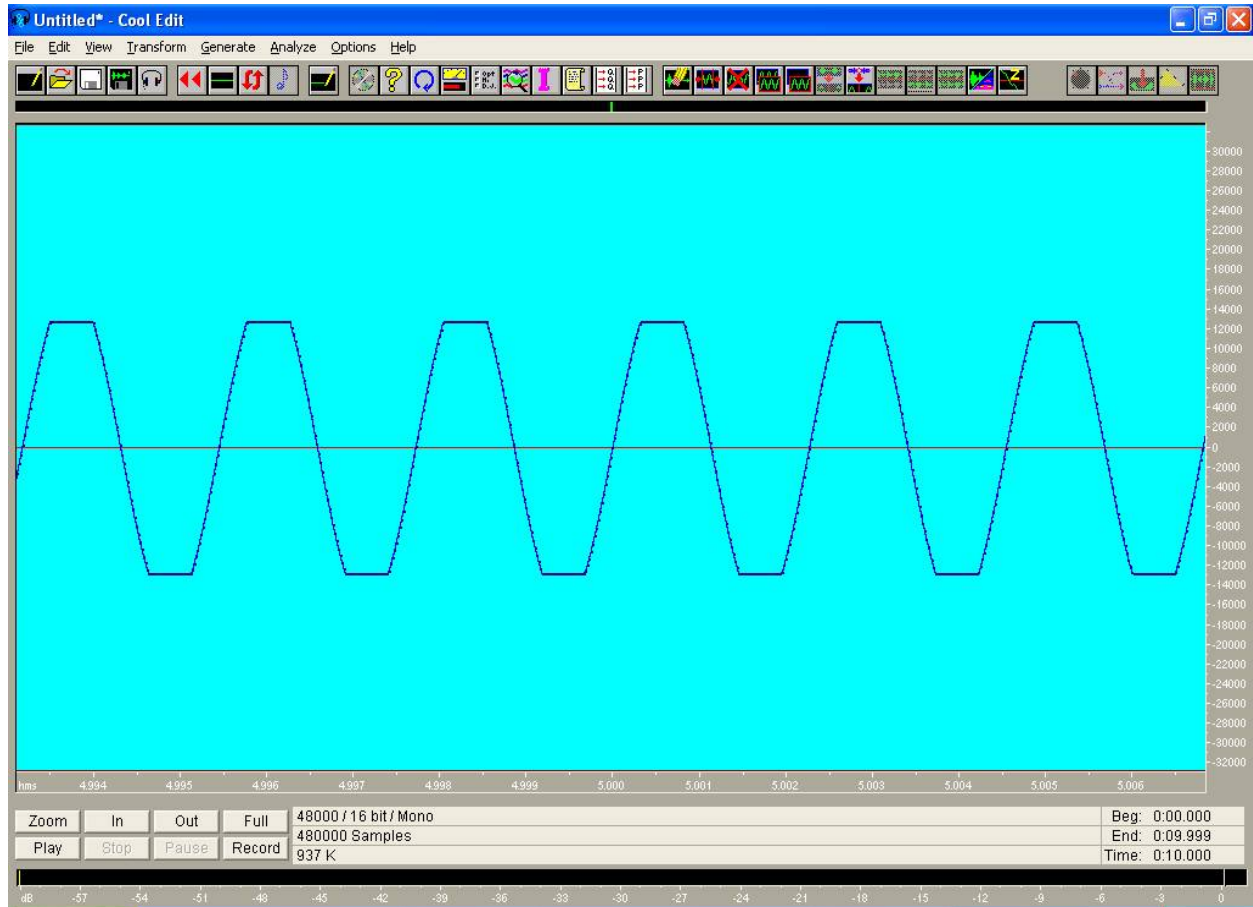
Fig. 12 - Sinal saturado na primeira etapa e amplificado independentemente nos outros estágios.

Existem ainda pedais eletrônicos que simulam essas distorções obtidas em amplificadores valvulados. No caso do efeito "overdrive" é possível obter algo semelhante usando diodos e amplificadores operacionais de forma a cortarem o sinal de entrada acima de certo limite.

Assim, um sinal de entrada do tipo senoidal (neste caso a nota musical Lá - 440 Hz), com somente um harmônico (um termo de sua série de Fourier):



é modificado e fica com a seguinte forma:



Desta forma este novo sinal possui outras componentes de sua série de Fourier o que altera seu som em relação a nossa percepção musical, uma vez que é a frequência do som que caracteriza sua nota musical. Assim como podemos ver abaixo na transformada de Fourier obtida com o software Cool Edit, outras frequências (além da original) compõem este novo som dando a sua aparência distorcida.

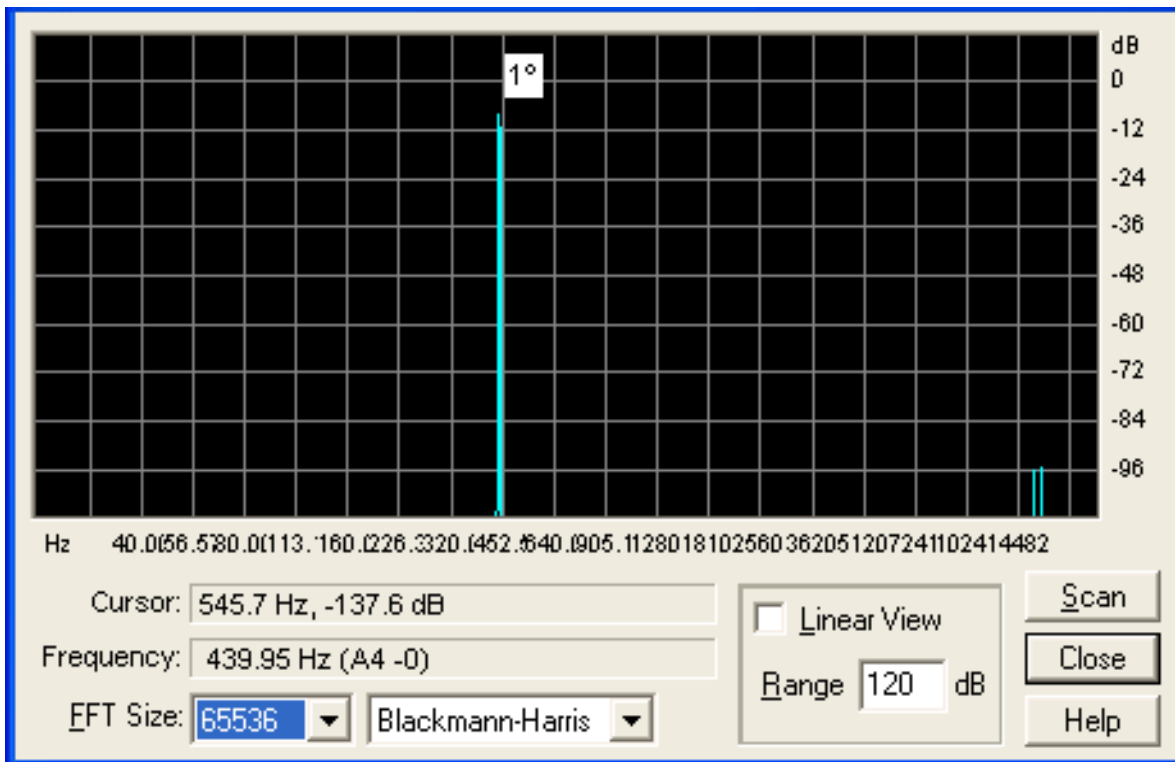


Fig. 15 - Transformada de Fourier do sinal senoidal.

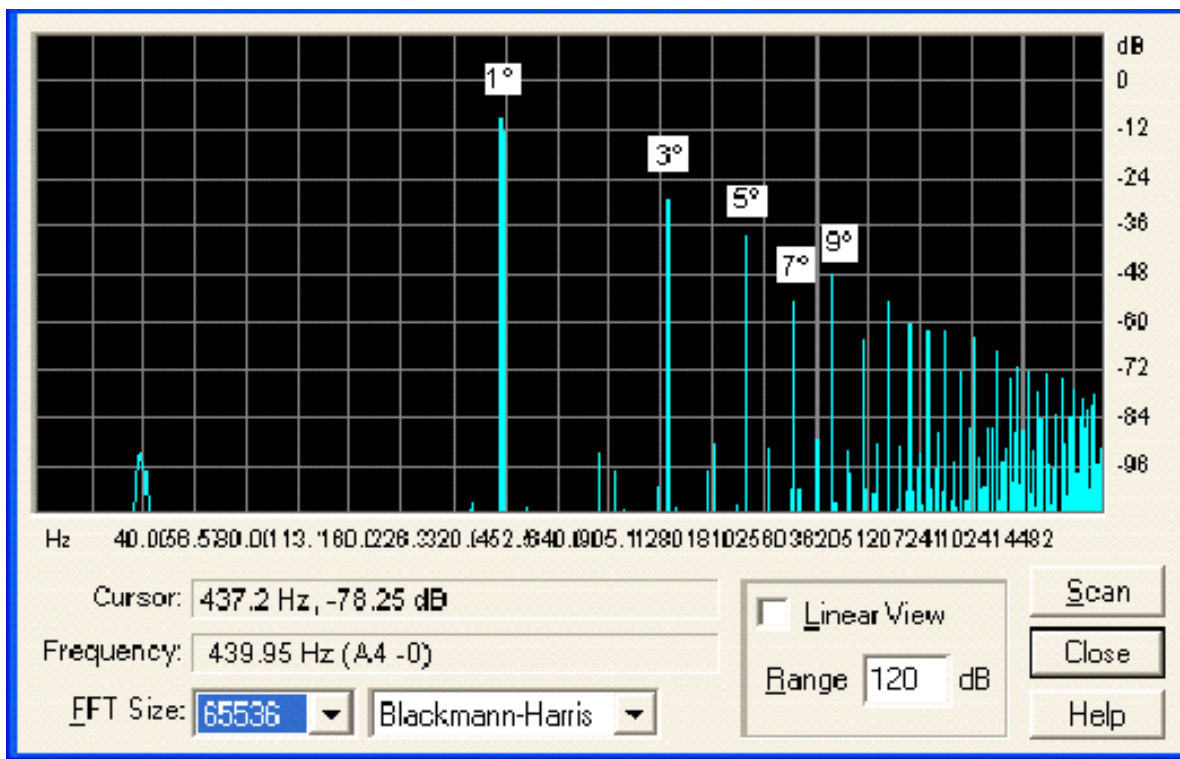


Fig. 16- Transformada de Fourier do sinal saturado.

Como podemos notar, além da frequência original (1º harmônico), aparece a contribuição de outras frequências em seu espectro (harmônicos ímpares), responsáveis pelo efeito distorcido que ouvimos.

Já no efeito "wah-wah" o que acontece é mais simples. O efeito basicamente desloca o pico no espectro de frequências rapidamente conforme o pedal é acionado pelo músico, ou seja, comprime e estica horizontalmente a onda do som.

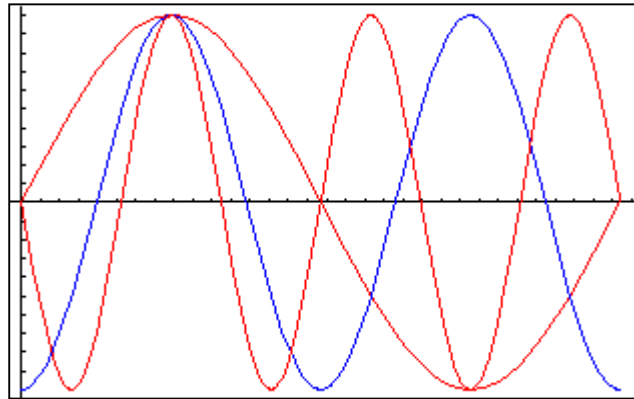


Fig. 17 - Variação súbita da frequência do som original (azul) responsável pelo efeito "wah-wah".

Evoluções e Novas Perspectivas: a Guitarra Digital

A história nos mostrou a capacidade que o homem possui de superar barreiras e descobrir novos meios. Após o desenvolvimento dos captadores eletromagnéticos, deparamos nos atualmente com o desenvolvimento de uma guitarra digital. A Gibson, uma das mais importantes empresas de instrumentos musicais do mundo, recentemente apresentou seu mais novo lançamento. A guitarra digital promete acabar com alguns problemas enfrentados pelos músicos e ainda abrir novas possibilidades para aqueles que se utilizam deste instrumento.

Diferentemente das guitarras convencionais que, como vimos anteriormente, utilizam captadores eletromagnéticos que sentem as vibrações das cordas e repassam um sinal analógico para sua saída através de um cabo de áudio, a guitarra digital oferece um novo método para a transmissão do som. A novidade nestes novos instrumentos é a inclusão de um captador eletromagnético extra que separa o som da guitarra em seis sinais de dados independentes (um para cada corda).

Em seu interior o captador extra abriga um circuito baseado em chips desenvolvidos pela Gibson Labs em parceria com outras empresas que converte o sinal analógico coletado por este captador em sinais digitais que podem ser transferidos para outros equipamentos por meio de um conector compatível com os atuais cabos de rede padrão Ethernet.



Fig. 18- Guitarras digitais com saídas analógicas convencionais e a saída digital para cabo de rede Ethernet.

A transmissão dos dados pela saída digital fica a cargo de uma nova tecnologia de rede batizada de MaGIC. Esta nova tecnologia (abreviação de Media-accelerated Global Information Carrier) é um novo protocolo de rede desenvolvido a partir do Ethernet que permitirá conectar todos os equipamentos de som, gravação e instrumentos musicais por meio de simples cabos de rede em vez dos cabos analógicos utilizados nos dias de hoje.

O MaGIC utiliza tecnologia de hardware e cabeamento do Ethernet que permite o tráfego de até 32 canais de som e segue especificações de modo que poderá fornecer energia pelo cabo de rede.

Os benefícios trazidos pela guitarra digital são inúmeros no que diz respeito à indústria musical. Nos estúdios de gravação esta tecnologia contribui em vários aspectos, por exemplo, o som das cordas pode ser gravado individualmente obtendo-se assim um maior controle na qualidade sonora. Imagine utilizar um amplificador para cada corda ou ainda utilizar efeitos de distorção nas cordas de som mais grave e som limpo nas cordas de som agudo ao mesmo tempo.

A tecnologia também facilitará a montagem e configuração de todo conjunto de som utilizado em grandes shows musicais e dos próprios estúdios de gravação, uma vez que todos os equipamentos poderão ser identificados dentro de uma rede MaGIC. Já os usuários domésticos poderão usufruir desta tecnologia conectando sua guitarra diretamente ao PC tendo amplas possibilidades de configurar e mixar seu som.

Conclusões

Neste trabalho foi possível verificar a aplicação de uma importante lei da física em nosso cotidiano. Explicamos como funcionam os captadores eletromagnéticos de instrumentos musicais, tal como guitarras e contrabaixos, através da Lei de Indução de Faraday. Vimos ainda a resposta destes captadores com relação ao som dos instrumentos (suas frequências), bem como alguns efeitos utilizados frequentemente na música e sua relação com o timbre do som.

Referências

- www.gibson.com
- www.gibsonmagic.com
- www.royalmusic.com.br/nelsonJr.asp
- "Fundamentos de Física" (Halliday, D. Resnick), volume 3.
- "Introduction to Electrodynamics" (David J. Griffiths), Prentice Hall, terceira edição.
- "How things work: the physics of every day live" (Louis P. Bloomfield). John Wiley & Sons, Inc., New York/USA, 1997.
- "Music, physics and engineering" (H. F. Olson). Dover publications, Inc., New York/USA, 1967.
- "Propriedades das ondas numa corda" (Giorgia Taiacol Aleixo). IFGW/UNI CAMP, F 809, primeiro semestre de 2003.