



**CENTRO UNIVERSITÁRIO DE BRASÍLIA – UnICEUB
FACULDADE DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA – FAET
CURSO DE ENGENHARIA DA COMPUTAÇÃO
PROJETO FINAL DE GRADUAÇÃO**

TRATAMENTO E RESTAURAÇÃO DE ESTALOS PROVENIENTES DE LP'S

**ALUNO: FABRÍCIO SANTOS CARDOSO
ORIENTADOR: CLAUDIO PENEDO DE ALBUQUERQUE**

BRASÍLIA, 2006

FABRÍCIO SANTOS CARDOSO

**TRATAMENTO E RESTAURAÇÃO DE ESTALOS
PROVENIENTES DE LP'S**

Orientador: Prof. M. C. Claudio Penedo de
Albuquerque

Monografia apresentada ao Centro
Universitário de Brasília – UniCEUB,
Faculdade de Ciências e Tecnologia –
FAET, para obtenção do Título de Bacharel
em Engenharia da Computação.

Brasília – DF, Dezembro de 2006.

AGRADECIMENTOS

A Deus, o grande Engenheiro do Universo,

A meu pai, minha mãe e meu irmão, por todo o carinho, apoio, motivação e compreensão do contexto social que me foi gerado ao longo deste trabalho,

Aos meus amigos e amigas, por constituírem minha segunda família e me fornecerem apoio incondicional em todas as horas e momentos,

Ao meu professor orientador Claudio Penedo, por todo o abrangente conhecimento e por sempre exigir o máximo de mim.

RESUMO

Atualmente, a restauração de áudio proveniente de mídias antigas de som (LP's – *Long Plays*, fitas cassete) está em grande evidência. Existem diversos métodos de restauração, os quais se aplicam aos mais diversos tipos de problemas encontrados. Propõe-se, neste trabalho, uma técnica de restauração digital de LP's largamente utilizada e que visa solucionar o problema mais comum encontrado nessas fontes sonoras: os estalos (*clicks*). São mostrados alguns conceitos sobre áudio digital, para uma fundamentação mais concisa, em conjunto com uma breve explicação sobre as mídias de LP's e toca-discos, desmistificando as causas do problema dos estalos. A técnica de restauração utilizada baseia-se no modelo auto-regressivo para o processamento digital do sinal. Aborda-se uma simulação do processo de restauração no *software Matlab®*, com o objetivo de se demonstrar a eficiência do método utilizado.

Palavras-Chave: Processamento de sinal, áudio digital, restauração digital, LP's, toca-discos, modelo auto-regressivo, estalos, *Matlab®*.

ABSTRACT

Nowadays the subject of audio restoration of old media (LP's – *Long Plays*, cassette tapes) is much discussed. There are several types of restoration, which can be applied to the most diverse kinds of sound problems encountered. This work proposes a widely used technique of digital restoration for LP's, which tries to solve the most common problem known on those media: the clicks. It is shown some concepts about digital audio in order to reach a better understanding about the audio itself, along with a succinct explanation about LP media and their players, unveiling the root causes of the problem. The restoration technique that is used in this work is based on the autoregressive model for digital signal processing. Then, after explaining the restoration technique, a simulation of the process is made using the *Matlab*® software, with the objective of demonstrating the efficiency of the utilized method.

Keywords: Signal processing, digital audio, digital restoration, LP's, vinyl players, autoregressive model, clicks, *Matlab*®.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	VIII
LISTA DE SIGLAS	X
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2 – RESTAURAÇÃO DE ÁUDIO	3
2.1. RESTAURAÇÃO ANALÓGICA E DIGITAL	4
2.2. ÁUDIO DIGITAL.....	6
2.3. DISCO DE VINIL.....	8
2.3.1. Gravação.....	11
2.3.2. Funcionamento	11
CAPÍTULO 3 – RESTAURAÇÃO DE ESTALOS.....	15
3.1. MODELO AUTO-REGRESSIVO.....	15
3.1.1. Conceitos	15
3.1.2. O equacionamento do modelo auto-regressivo.....	17
3.1.3. A técnica dos mínimos quadrados	19
3.1.4. Cálculo dos parâmetros	20
3.2. DETECÇÃO DE ESTALOS	24
3.2.1. Modelagem dos estalos	24
3.2.2. Características dos estalos	25
3.2.3. O Filtro AR inverso	26
3.2.4. Características do erro de predição	28
3.3. CORREÇÃO DE ESTALOS.....	40
3.3.1. O interpolador LSAR	41
3.3.2. Características e recomendações.....	48
CAPÍTULO 4 – IMPLEMENTAÇÃO	51
4.1. SELEÇÃO DO MODELO AUTO-REGRESSIVO	51
4.2. AJUSTE DOS PARÂMETROS	52
4.3. MONTAGEM DOS EQUIPAMENTOS	59
4.4. PROCESSO DE GRAVAÇÃO	60
4.5. MATLAB®.....	62
4.6. SIMULAÇÃO.....	64
4.7. TESTES.....	68
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÃO.....	82
REFERÊNCIAS.....	84
APÊNDICE A – Arquivo de configuração dos parâmetros de restauração	86

APÊNDICE B – Arquivo de mudança e encaixe dos blocos de amostras.....	87
APÊNDICE C – Arquivo de chamada das etapas de restauração	88
APÊNDICE D – Arquivo de construção do modelo AR	90
APÊNDICE E – Arquivo de construção do erro de predição	91
APÊNDICE F – Arquivo de construção do vetor de detecção	92
APÊNDICE G – Arquivo de construção do interpolador LSAR.....	93

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Sinal Contínuo e Discreto.....	4
Figura 2.2 – Sinal original, instantes de amostragem e sinal amostrado.	7
Figura 2.3 – Sinal quantizado.....	8
Figura 2.4 – LP.....	9
Figura 2.5 – LP Colorido.	9
Figura 2.6 – Gravador analógico de LP's.	11
Figura 2.7 – Esquema de funcionamento de um toca-discos.....	12
Figura 2.8 – Toca-discos.....	12
Figura 2.9 – LP deteriorado por arranhões.	14
Figura 3.1 – Eletrocardiograma.	16
Figura 3.2 – Distribuição dos valores de amplitude de um bloco de 2000 amostras (45ms) e curva gaussiana correspondente.	17
Figura 3.3 – Diagrama de Blocos do Filtro AR.	18
Figura 3.4 – Retas que mais se aproximam dos pontos.	19
Figura 3.5 – (a) Vetores \mathbf{X}_0 e \mathbf{X}_1 . (b) Vetor \mathbf{a}	21
Figura 3.6 – Diagrama de blocos para o filtro AR inverso.	26
Figura 3.7 – Diagrama de blocos para o filtro $H(z)$	27
Figura 3.8 – Erro de Predição, bloco de 1000 amostras.	28
Figura 3.9 – Histograma dos valores do erro de predição.....	29
Figura 3.10 – Histograma de um bloco de amostras limpo.	30
Figura 3.11 – Erro de predição em um sinal corrompido.....	31
Figura 3.12 – Bloco de amostras de um sinal limpo e densidade espectral de potência correspondente.	32
Figura 3.13 – Erro de predição e Densidade Espectral de Potência correspondente.	33
Figura 3.14 – (a) Bloco de amostras corrompido. (b) Erro de predição correspondente.	34
Figura 3.15 – (a) Sinal corrompido. (b) Erro de predição, K Igual a 5.....	35
Figura 3.16 – (a) Sinal limpo. (b) Erro de predição, K igual a 5.	36
Figura 3.17 – (a) Erro de predição. (b) Vetor de detecção.....	37
Figura 3.18 – Vetor de Detecção e o Sinal Corrompido, com adicional de 10 amostras.....	38
Figura 3.19 – Diagrama de Interpolação de Sinais.	40

Figura 3.20 – Diagrama representativo do bloco de amostras a ser corrigido.	42
Figura 3.21 – Diagrama representativo dos vetores antes, durante e depois do distúrbio.....	43
Figura 3.22 – Esquema de interpolação auto-regressiva pelo método dos mínimos quadrados.	44
Figura 3.23 – Sinal Corrompido e Sinal Corrigido.	48
Figura 3.24 – Sinal Corrompido e Sinal Corrigido, Primeira e Segunda Iterações.	49
Figura 4.1 – Sinal Corrompido, Erro de Predição e Vetor de Detecção.	54
Figura 4.2 – Sinal Corrompido e Sinal Corrigido, K igual a 5.....	55
Figura 4.3 – Sinal Corrompido, Erro de Predição e Vetor de Detecção para um bloco de amostras razoavelmente afetado.....	56
Figura 4.4 – Sinal Corrompido e Sinal Corrigido, bloco mais afetado.	57
Figura 4.5 – Sinal Corrompido, Corrigido com Adicional de 4 Amostras e 10 Amostras.	58
Figura 4.6 – Gradiente DS-30 <i>Magic Star</i>	59
Figura 4.7 – Diagrama esquemático da topologia de conexão dos equipamentos.	60
Figura 4.8 – <i>Sony SoundForge</i>	61
Figura 4.9 – Tela de gravação.....	62
Figura 4.10 – Tela do <i>Matlab®</i>	63
Figura 4.11 – Tela do <i>Editor</i>	64
Figura 4.12 – Diagrama de Blocos da Simulação.	66
Figura 4.13 – Sinal Corrompido, <i>Do the Bartman</i>	68
Figura 4.14 – Sinal Corrigido, <i>Do the Bartman</i>	69
Figura 4.15 – Sinal Corrigido, <i>Do the Bartman</i> , K igual a 3.	70
Figura 4.16 – Sinal corrompido, K.I.S.S.	72
Figura 4.17 – Sinal Corrigido, K.I.S.S.....	73
Figura 4.18 – Sinal Corrigido, banda K.I.S.S., K igual a 3.	74
Figura 4.19 – Sinal Corrompido, Louis Armstrong.....	76
Figura 4.20 – Sinal Corrigido, Louis Armstrong.....	77
Figura 4.21 – Sinal Corrompido, Cat Stevens.	79
Figura 4.22 – Sinal Corrigido, Cat Stevens.	80

LISTA DE SIGLAS

ARMA: *Autoregressive Moving Average* (Auto-regressivo média móvel).

AR: Auto-regressivo.

CD Player: Tocador de CDs.

CD-ROM: *Compact Disc – Read Only Memory* (Disco compacto com memória somente leitura).

dB: Decibel.

DSP: *Digital Signal Processor* (Processador de sinais digitais).

DVD: *Digital Versatile Disc* (Disco digital versátil).

EP: *Extended Play*.

IIR: Resposta ao impulso infinita.

Hz: Hertz.

LP: *Long Play*.

LSAR: *Least Squares Autoregressive Interpolation* (Interpolação Auto-regressiva pelos mínimos quadrados).

ms: Milisegundos.

PCM: *Pulse Code Modulation* (Modulação por impulso codificado).

PVC: Policloreto de Vinila.

Wave: Onda.

Waveform: Forma de onda.

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

Atualmente, nos ambientes onde se trabalha com música, existe um assunto que está em voga há algum tempo. Esse assunto é a restauração de áudio.

O objetivo da restauração de áudio está em tentar preservar a riqueza musical existente, sem distinção alguma. Como quase tudo o que é inerente a nossa realidade possui duração limitada, o tempo trata de se encarregar de degradar a qualidade sonora existente em mídias mais antigas. Com o devido cuidado, as músicas existentes nessas mídias podem ter sua deterioração atrasada, ou minimizada. Entretanto, infelizmente não há como evitar por completo que a degradação aconteça.

Pensando em toda essa problemática, estudiosos sobre som propuseram técnicas que alterassem a longevidade dessas gravações, tentando minimizar o impacto do tempo e da conservação inadequada. Porém, o tipo de restauração utilizado era de ordem analógica, algo extremamente limitado, principalmente a processos manuais.

Com o advento da tecnologia digital, a restauração se tornou bastante viável, dando surgimento a mais técnicas de restauração, que trouxeram um bom nível de qualidade e flexibilidade ao processo.

Este trabalho contempla uma solução inteiramente digital para o processo de restauração de LP's. Ele também se limita a suprimir apenas uma parcela dos possíveis problemas que podem ser encontrados. Esta parcela diz respeito aos estalos (*clicks*), um problema muito comum encontrado nesses tipos de mídia.

No Capítulo 1 é feita a introdução deste trabalho. No Capítulo 2 é dada uma visão geral do processo de restauração, do que ele trata e como pode ser feito. A primeira parte desse capítulo contempla a Seção 2.1, que diz respeito à restauração analógica e digital. Aborda-se também sobre como se comporta um sinal digital, na Seção 2.2. Em seguida, no mesmo capítulo, na Seção 2.3, é explanado a respeito das mídias de LP's e seus respectivos reprodutores, ou toca-discos, apontando os possíveis causadores de problemas.

No Capítulo 3 é abordada a técnica utilizada para a supressão do distúrbio. Todo o processo de restauração é feito através de variações do mesmo modelo, que é o modelo auto-regressivo (AR). Esse capítulo está dividido em três seções, seguindo a ordem de procedência. A Seção 3.1 trata sobre a modelagem do sinal a ser restaurado. A Seção 3.2, por sua vez, trata da detecção dos distúrbios e a Seção 3.3 fala a respeito da correção das regiões afetadas.

O procedimento prático está abordado no Capítulo 4. Nesse capítulo primeiramente justifica-se o porquê de se utilizar o método usando o modelo auto-regressivo, na Seção 4.1. É explicado na Seção 4.2 de que maneira os parâmetros de configuração do algoritmo de restauração funcionam. Mais adiante, na Seção 4.3, aborda-se sobre a parte física deste trabalho, explicando de que forma os equipamentos necessários para a gravação das músicas foram utilizados. Explica-se na Seção 4.4 o funcionamento do processo de gravação das músicas para o computador. Na Seção 4.5 trata-se do algoritmo no *software Matlab®* e como ele deve ser configurado para se tentar obter restaurações de boa qualidade. A Seção 4.6 aborda sobre como acontece a execução da simulação no *Matlab®* e finalmente, na Seção 4.7, parte-se para a execução da etapa de testes, a fim de se esclarecer as características, pontos positivos e negativos da técnica de restauração utilizada.

Por fim, no Capítulo 5 é feita a conclusão do trabalho, estabelecendo algumas sugestões e possibilidades de aperfeiçoamento para o método de restauração empregado.

CAPÍTULO 2 – RESTAURAÇÃO DE ÁUDIO

Os antigos processos de gravação envolviam instrumentos que além de gravar e reproduzir sons também geravam ruídos e distorções nas mídias. Com o passar dos anos, essas mídias começaram a deteriorar, devido tanto à sensibilidade da sua superfície (arranhões, marcas diversas e poeira) quanto à interferência eletromagnética, rupturas na superfície e cisalhamentos. Tais danos podem produzir deformações indesejáveis ao som, tais como estalos, alterações na tonalidade (*pitch*) ou afinação do sinal de áudio, entre outros.

Dessa maneira, houve uma grande motivação em se restaurar e conservar sons provindos desse tipo de gravação, com a capacidade de evitar perdas de informação e utilizar-se de mecanismos que evitassem afetar o material e o som proveniente deste. A tecnologia atual envolve mídias com maior durabilidade e *softwares* de gravação rápida que não estressam o meio de gravação.

O principal objetivo da restauração de áudio é identificar a natureza da degradação e aplicar um método que remova os distúrbios indesejáveis que estejam corrompendo o sinal e que possam estar ocorrendo simultaneamente na mídia.

Deve-se atentar para o fato de que nem todo áudio considerado como ruído presente no ambiente de gravação ou nos instrumentos é necessariamente passível de remoção ou correção. Pode-se citar como exemplo o som proveniente de uma platéia em gravação ao vivo. Visto essa característica, o tratamento do som deve ser realizado de acordo com a mídia, sempre em etapas, separando-se cada tipo de ruído a ser removido.

Existem, portanto, técnicas de restauração digital e analógica, capazes de filtrar diversos tipos de ruído de áudio provindos dos materiais de gravação, tais como fitas magnéticas e discos de vinil (LP - *Long Play*).

2.1. RESTAURAÇÃO ANALÓGICA E DIGITAL

Um sinal é uma função de variáveis independentes como tempo, distância, temperatura, posição e pressão (ALBUQUERQUE, 2002, p. 1). Pode-se representar a pressão do ar exercida pelos sinais encontrados no cotidiano, como um sinal de música ou de voz, por exemplo, como uma função do tempo em um ponto no espaço.

O processamento de restauração de sinais envolve uma representação matemática envolvendo o método de extração de informação carregada por este, e depende do tipo de sinal e da natureza desta informação (ALBUQUERQUE, 2002, p. 1). Existem dois tipos de sinais que variam no tempo: contínuo e discreto. O sinal contínuo ou sinal analógico são aqueles encontrados com mais frequência e ocorrem naturalmente, como por exemplo, em um cantar de um pássaro. Os sinais discretos são aqueles que não apresentam continuidade e podem ser representados apenas por valores de amplitude e tempo pré-determinados. Em suma, um sinal discreto seria uma seqüência de números pré-determinados variando discretamente ao longo do tempo, enquanto que um sinal contínuo pode assumir qualquer valor de amplitude a cada instante de tempo ao longo de uma escala vertical. Na Figura 2.1 é exemplificado um sinal contínuo e um discreto no tempo:

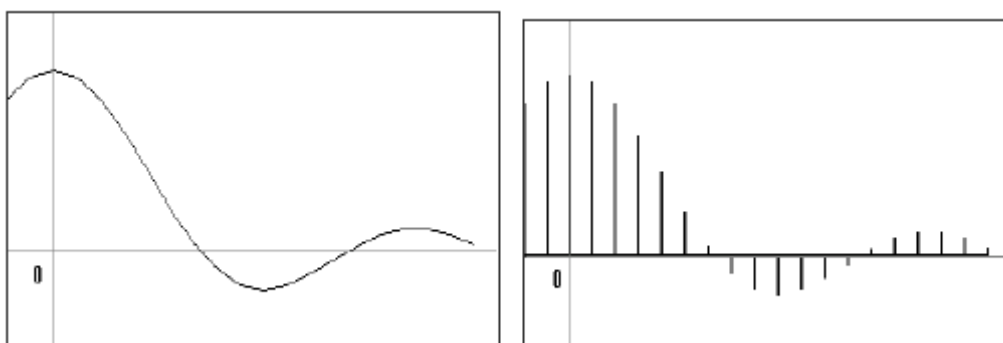


Figura 2.1 – Sinal Contínuo e Discreto.

Fonte: LARGO, 1999.

Os sinais digitais são aqueles que apresentam o tempo e a amplitude em função de valores binários, como zeros e uns. Alguns exemplos de sinais digitais são: discos de CD-ROM, DVDs e músicas digitalizadas.

Uma etapa importante no processamento de sinais é a detecção de ruídos que podem estar presentes neste. A detecção de um ruído inserido na informação do sinal não é uma tarefa muito simples. O ruído pode ser definido como sendo uma deformação sensível no sinal previamente encontrado.

As degradações constantes ou localizadas ocorridas em sinais de áudio provenientes de modificações indesejáveis em sua qualidade podem ser removidas por meio de técnicas de restauração analógica ou digital. A restauração analógica tornou-se disponível desde a existência da fita magnética, e consiste na edição manual de estalos, através de cortes nas regiões afetadas e remendos nessas mesmas regiões, ou então na equalização no domínio da frequência para ruídos de fundo. Todavia, esses processos de restauração somente se aplicam aos estágios de gravação das faixas de áudio (GODSILL, 1998, p. 1).

Até aproximadamente o ano de 1960 quase todo o processamento de sinais era analógico. Com o avanço dos estudos sobre a teoria de processamento de sinais e a tecnologia computacional ocorreu uma mudança para o processamento de sinais digitais. Segundo Simon Godsill (1998, p.2), o método digital tem a grande vantagem de permitir um maior grau de flexibilidade no processamento, além de se obter um maior potencial para remover ruídos. Mas também se atenta para o fato de que métodos digitais inapropriados aplicados indiscriminadamente em sinais ou sistemas podem ser mais desastrosos do que no processamento analógico.

Atualmente existem equipamentos de restauração digital utilizados freqüentemente em estúdios de gravação, processos de remasterização, sistemas de comunicação militares e companhias de transmissão de sinais, como empresas de telecomunicações. Esses equipamentos são capazes de retirar os ruídos de fundo considerados intrusivos, além de qualquer modificação resultante do processo de gravação, como imperfeições existentes no material (por exemplo: membrana do microfone, defeitos no corpo de um violão ou a mídia de gravação) ou até mesmo quando há transcrição para outra mídia (exemplo: transcrição de LP para fita cassete).

Existem tipos distintos de degradação encontrados em sinais de áudio, que podem ser classificados em dois grupos (GODSILL, 1998, p. 6):

- **Degradações localizadas:** são aquelas que afetam somente um trecho distinto do sinal original, gerando descontinuidades na forma da onda. São também denominadas de ruído rosa. Entre as mais conhecidas, incluem-se os estalos ou ruídos impulsivos (podem ser percebidos como interferências randômicas existentes no tempo e amplitude do sinal original), os arranhões e as pequenas quebras ou imperfeições na superfície da mídia.
- **Degradações globais:** são aquelas que afetam toda a forma de onda do sinal de áudio, e também são denominados de ruído branco ou ruído de banda larga. Incluem-se nesta classificação: os ruídos de fundo, certos tipos de distorções de caráter não linear (desgastes na superfície da mídia, como um LP empenado) e flutuações na reprodução (alterações na tonalidade ou afinação do sinal de áudio).

2.2. ÁUDIO DIGITAL

Os sons encontrados na natureza são de ordem analógica. São sinais que possuem continuidade no tempo. O áudio digital é um sinal armazenado de forma a assumir apenas determinados valores (ou valores discretos), para a facilidade de representação, reprodução (ou replicabilidade, ou seja, a possibilidade de que se possa refazer o processamento quantas vezes forem necessárias) e manipulação do som que se quer analisar, garantindo-se um bom patamar de flexibilidade.

Ele busca representar o sinal analógico de forma limitada para o seu uso em ambientes eletrônicos, ou seja, em equipamentos como computadores, *CD players*, televisores e assim por diante, onde os recursos utilizados para o seu funcionamento são visivelmente limitados em quantidade (número de transistores, capacitores, indutores, resistores) e qualidade (capacidade de acumulação de carga de um capacitor, resistência do resistor, condutividade elétrica do material utilizado e assim por diante).

Para se obter uma representação do mundo analógico no mundo digital é necessária a execução de uma conversão. O processo de conversão de analógico para digital deve seguir algumas regras e passos, para se obter uma boa fidelidade na sua representação. Os passos são: amostragem e quantização.

O primeiro passo diz respeito à qualidade da conversão na amostragem, que deve obedecer ao seguinte teorema, elaborado por *Harry Nyquist*: a quantidade de amostras por unidade de tempo de um sinal, chamada taxa ou frequência de amostragem, deve ser maior que o dobro da maior frequência contida no sinal a ser amostrado, para que ele possa ser reproduzido integralmente (ROLAND, 1999).

A amostragem é obtida através da mensuração de valores do sinal analógico em intervalos regulares de tempo. Cada valor dessa mensuração é chamado de amostra. Esses valores são codificados para prover uma representação digital do sinal analógico. Um exemplo pode ser visto na Figura 2.2:

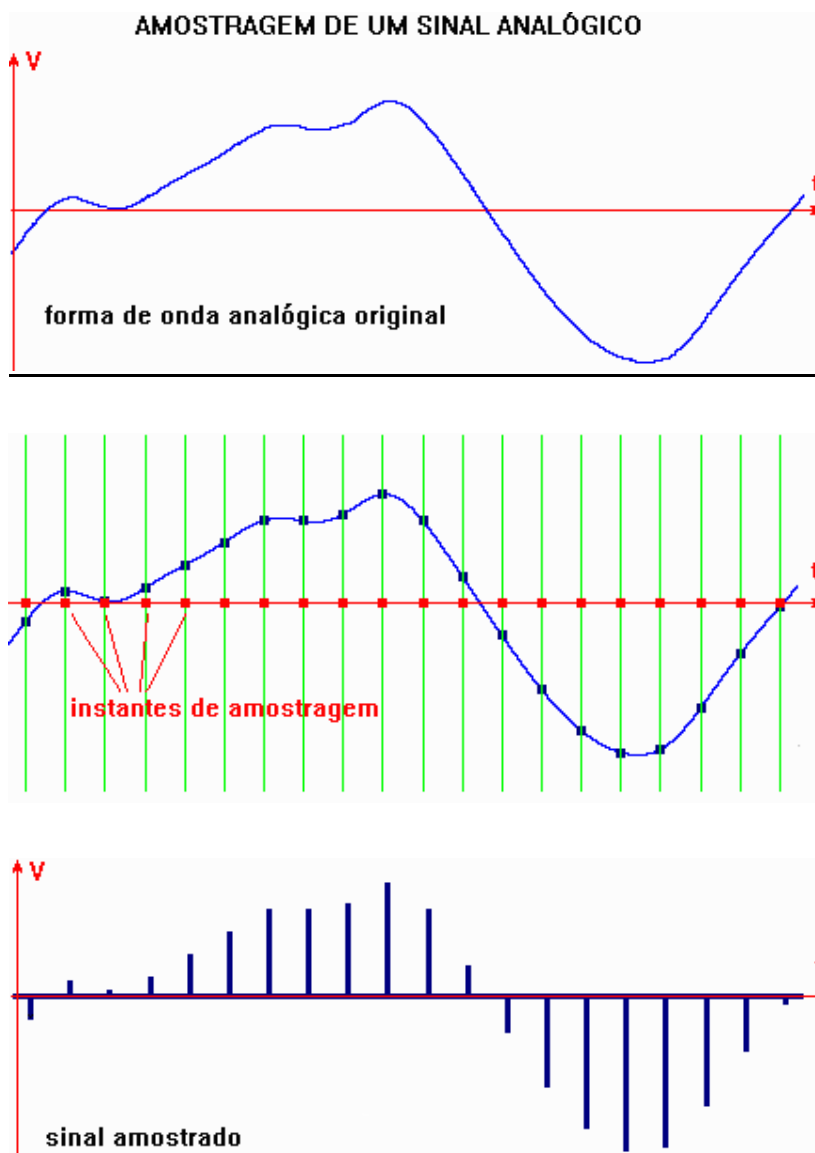


Figura 2.2 – Sinal original, instantes de amostragem e sinal amostrado.

Fonte: ROLAND, 1999.

Na Figura 2.2, o sinal analógico é dividido em espaços eqüidistantes. Estes espaços são chamados de intervalos, e cada amostra é chamada de instante de amostragem. Obtêm-se assim representações do sinal analógico em espaços limitados no tempo. As gravações digitais encontradas atualmente, como os CDs, utilizam uma taxa de amostragem de 44,100 amostras para cada segundo de música (44,1 kHz). Logicamente, quanto maior o número de amostras utilizadas para a representação da forma de onda, melhor representado estará o sinal.

No processo de quantização estabelece-se que cada amostra assumirá apenas valores pré-determinados. Esses valores são limitados pela quantidade de bits que pode ser utilizada. No exemplo da Figura 2.3, uma quantização de 2 bits os valores das amostras poderão assumir 2^2 valores diferentes, ou seja, 4 valores.

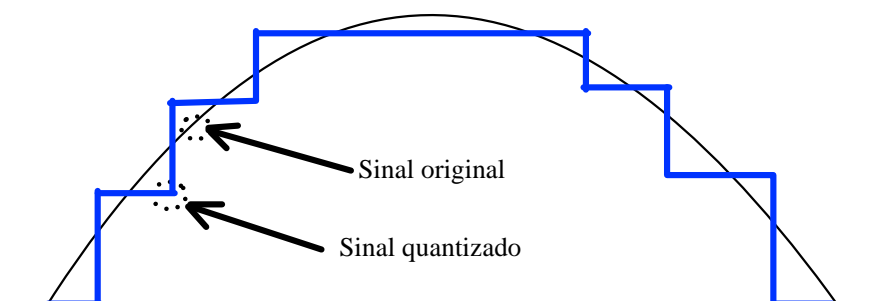


Figura 2.3 – Sinal quantizado.

2.3. DISCO DE VINIL

O disco de vinil (LP) é uma mídia que já foi bastante utilizada para a gravação e reprodução de músicas. Ele foi criado na década de 50 e é basicamente uma mídia plana em formato de disco, contendo ranhuras em espiral que conduzem a agulha dos toca-discos da sua borda até perto de seu centro. A mídia de um LP suporta apenas um meio de reprodução e gravação, que é o meio analógico, o que significa que todos os LP's são gravados e reproduzidos mecanicamente. Na Figura 2.4 pode-se visualizar um LP:



Figura 2.4 – LP.

O material mais utilizado para a fabricação do vinil é o PVC, um tipo de plástico. Geralmente, utiliza-se esse material na cor preta. Todavia, podem existir LP's com cores diferentes. Um exemplo de vinil colorido pode ser visto na Figura 2.5:



Figura 2.5 – LP Colorido.

Fonte: GRAMOPHONE, 2006.

Durante a época de fabricação em massa dos *Long Plays* existiram algumas versões que possuíam algumas diferenças, tais como a sua capacidade por lado e a quantidade de rotações por minuto. Os tipos de LP's são divididos em (DISCO, 2006):

- **LP:** Disco com 31 cm de diâmetro, era tocado a 33 e 1/3 rotações por minuto. A sua capacidade normal era de cerca de 20 minutos por lado. O formato LP era utilizado, usualmente, para a comercialização de álbuns completos.
- **EP:** abreviatura de *Extended Play*. Disco com 17 cm de diâmetro que era tocado a 45 rotações por minuto. A sua capacidade normal era de cerca de 8 minutos por lado. O EP normalmente continha em torno de quatro faixas de áudio.
- **Single:** abreviatura de *Single Play*. Também conhecido como *compacto simples*. Tinha 17 cm de diâmetro e era tocado usualmente a 45 rotações por minuto. Sua capacidade normal era de 4 minutos por lado. O *single* era geralmente empregado para a difusão das músicas de trabalho de um álbum completo a ser posteriormente lançado.
- **Maxi:** abreviatura de *Maxi Single*. Disco com 31 cm de diâmetro e que era tocado a 45 rotações por minuto. A sua capacidade era de cerca de 12 minutos por lado.

O vinil é um tipo de plástico bastante delicado. A qualidade sonora destas mídias pode ser comprometida caso ela seja afetada por eventos diversos, tais como arranhões, poeira, rachaduras, exposição prolongada ao sol, armazenamento indevido e assim por diante. Estes problemas funcionam como abrasivos, danificando tanto o disco em si como a agulha dos toca-discos.

Para a devida conservação de LP's precisa-se limpar constantemente sua superfície, manuseá-los com cautela (pelas bordas) e deixá-los sempre livres de poeira e do sol. Eles devem também ser guardados sempre na posição vertical, dentro de uma capa e um envelope de proteção. Uma vez bem conservados, sugere-se utilizá-los o mínimo possível, para uma maior durabilidade e, se possível, regravá-los em outra mídia mais nova, ou em mídias de diferentes tecnologias, como em CDs. Tomadas estas precauções, evita-se que o LP seja contaminado por poeira e arranhões. Esses são a maior causa do surgimento de estalos nas músicas de LP's.

2.3.1. Gravação

O processo de gravação de LP's consiste em utilizar-se um aparelho que produza ranhuras na superfície lisa da mídia. A produção de ranhuras cria uma forma de onda contínua, de fora para dentro do LP. Um exemplo de gravador analógico de LP's pode ser visto na Figura 2.6:

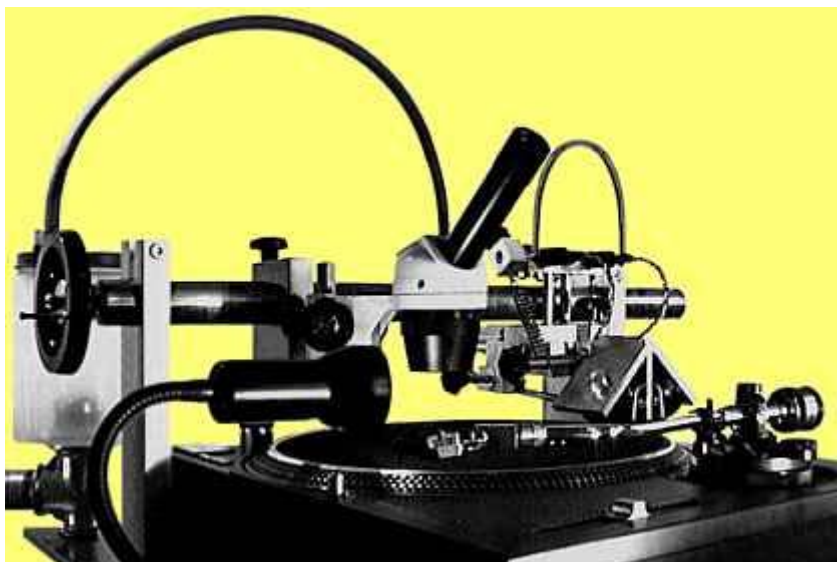


Figura 2.6 – Gravador analógico de LP's.

Fonte: GRAMOPHONE, 2006.

O aparelho da Figura 2.6 é feito artesanalmente. O processo de gravação por esse método é bastante delicado e sensível a ajustes. Felizmente, o resultado é bastante satisfatório.

2.3.2. Funcionamento

O funcionamento da reprodução de LP's é bastante simples. As ranhuras (ou sulcos) existentes em sua superfície fazem com que a agulha do toca discos vibre e essa vibração seja transformada em sinal elétrico, através da cápsula fonocaptora (Transdutor). Esse, por sua vez, é amplificado e transformado em som audível. Um exemplo de seu funcionamento pode ser visto na Figura 2.7:

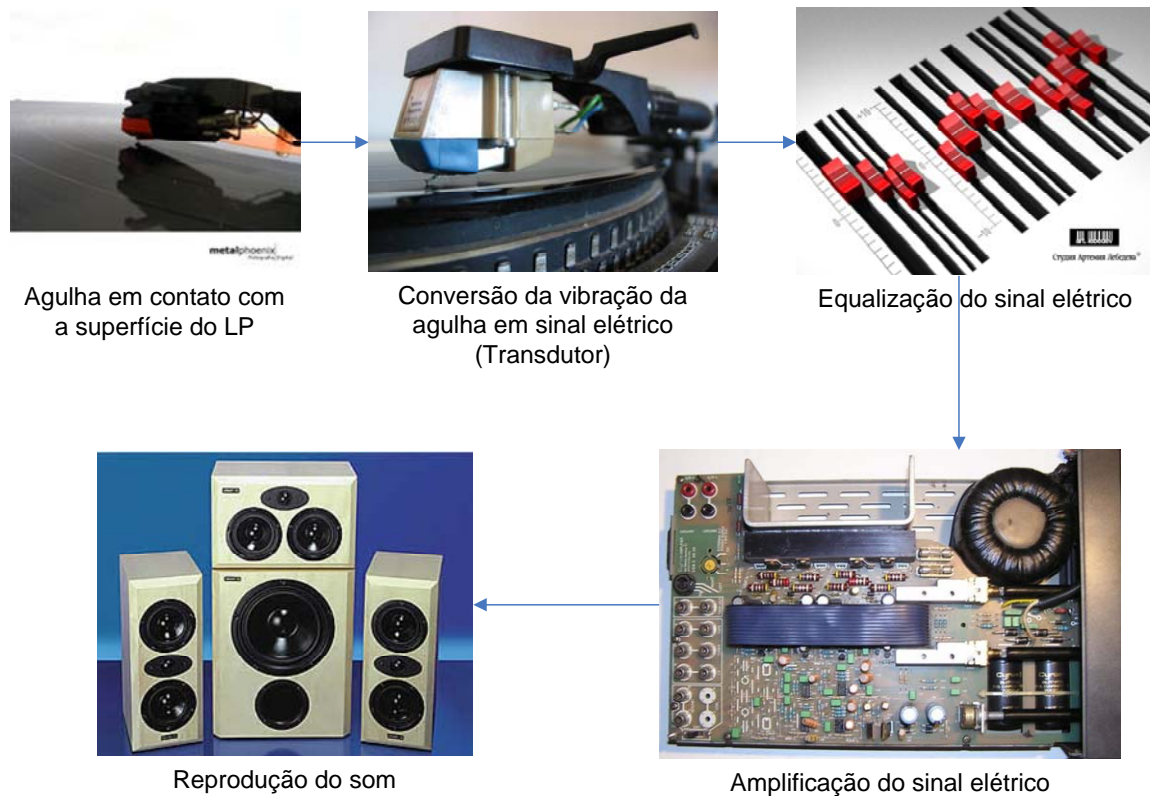


Figura 2.7 – Esquema de funcionamento de um toca-discos.

A agulha é controlada por meio de um aparelho: o toca-discos. Ele pode ser visualizado na Figura 2.8:



Figura 2.8 – Toca-discos.

O toca-discos é composto por uma base onde se encaixam as seguintes partes (TOCA-DISCOS, 2006):

- **Prato circular** – onde se acomoda o LP. Ele gira de acordo com um motor;
- **Pino central** - onde se encaixa o LP;
- **Braço pivotante** – onde se encontra a cápsula fonocaptora (transdutor que transforma as vibrações mecânicas em impulsos elétricos) e a agulha.

A cápsula fonocaptora determina o nível de resposta à frequência dos toca-discos. Quanto maior esse nível de resposta, melhor será a reprodução do som contido no LP. Ela possui dois componentes: a bobina e o ímã. Baseado nestes dois componentes tem-se os seguintes tipos de cápsulas (TOCA-DISCOS, 2006):

- **Cápsula Magnetodinâmica** - o ímã é móvel e a bobina é fixa. Os movimentos da agulha pelos sulcos são transmitidos ao ímã, que se movimenta, fazendo variar a indução de seu campo magnético sobre a bobina, criando uma corrente elétrica através desta e originando o sinal sonoro;
- **Cápsula Dinâmica** - o ímã é fixo e a bobina é móvel. A bobina, acoplada à agulha, se movimenta dentro do campo magnético do ímã e provoca a circulação de uma corrente elétrica através da bobina, originando o sinal sonoro;
- **Cápsula Magnética ou de Relutância Variável** - O ímã e a bobina são fixos. As vibrações da agulha são transmitidas a uma pequena lâmina que, ao vibrar, corta as linhas do campo magnético do ímã, variando a indução sobre a bobina, acarretando a circulação de uma corrente e originando o sinal sonoro.

As agulhas podem ser feitas a partir de dois materiais diferentes: a safira ou o diamante, sendo este o mais resistente. Elas são divididas em duas categorias (TOCA-DISCOS, 2006):

- **Agulha Cônica** – Possui seção transversal circular;
- **Agulha Elíptica (ou Bi-Radial)** – Possui seção transversal semelhante à de uma elipse, com dois raios de circunferência diferentes.

Ambas as partes integrantes do braço pivotante tem papel fundamental na reprodução dos discos. Caso alguma dessas partes não esteja funcionando corretamente pode-se obter uma reprodução de má qualidade, podendo ocasionar danos à mídia do LP. Agulhas desgastadas, por exemplo, podem se

tornar pontiagudas e causar arranhões de diferentes profundidades, afetando a disposição das ranhuras e causando os mais variados tipos de estalos, ou até mesmo inserindo ruído de baixa frequência, caso o contato da agulha com a mídia seja prolongado. A Figura 2.9 ilustra um LP que foi degradado por arranhões:



Figura 2.9 – LP deteriorado por arranhões.

Como pode ser visto na Figura 2.9, os arranhões geralmente ocasionam alterações visíveis à superfície e são os maiores responsáveis pelo aparecimento dos estalos em um sinal musical, seguidos pela poeira. Esse tipo de degradação pode ocorrer em intensidade variável, ou seja, podem existir LP's que possuem arranhões superficiais e que são difíceis de serem identificados a olho nu, quanto LP's com arranhões mais profundos, favorecendo a sua deterioração e podendo afetar seriamente a qualidade do som reproduzido.

Visto as características dos LP's e seus possíveis problemas, parte-se para um estudo direcionado a restauração dos estalos, assunto que será tratado no Capítulo 3 deste trabalho.

CAPÍTULO 3 – RESTAURAÇÃO DE ESTALOS

3.1. MODELO AUTO-REGRESSIVO

3.1.1. Conceitos

O modelo AR é talvez a parte mais importante no processo de entendimento da supressão de ruído impulsivo (estalos) utilizado neste trabalho, uma vez que o procedimento de restauração permanece, em sua maioria, baseado neste recurso. Ele é uma particularização do modelo Auto-regressivo Média Móvel (ARMA – *Autoregressive Moving Average*) (GODSILL, 1998, p. 86), e possui uma relativa facilidade de interpretação de resultados. O uso de modelos estatísticos como esse para se modelar um sinal musical é de grande utilidade e versatilidade.

De acordo com (CDM, 2001), o termo auto-regressivo significa usar dados históricos (passados) para prever dados futuros. Logo, a idéia de se modelar auto regressivamente consiste em construir-se uma representação de um sinal estacionário aleatório no qual cada valor pertencente a ele dependa somente de uma soma ponderada de seus valores anteriores, somados com ruído branco.

Um sinal estacionário aleatório é aquele que não é capaz de ser predito tanto na frequência quanto no tempo (como uma chuva que cai em um telhado, onde não se pode prever o local onde irá cair cada gota, tampouco com que frequência elas cairão), mas que possui características estatísticas uniformes ao longo do tempo, como sua média para cada bloco de amostras, que pode ser constante, por exemplo.

Esse tipo de modelagem é largamente utilizado em processos de produção de sinais de áudio e de voz, bem como em análises médicas, como na medida do ritmo de batimentos cardíacos (eletrocardiograma) ou na medida de impulsos cerebrais (eletroencefalograma). Na Figura 3.1 é ilustrado um exemplo de sinal de eletrocardiograma:

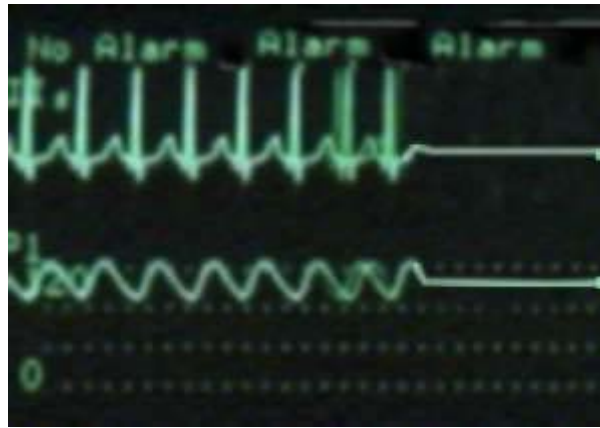


Figura 3.1 – Eletrocardiograma.

Fonte: COLEGIO, 2001.

Para se modelar um sinal segundo o modelo AR é necessário seguir alguns pré-requisitos. Um deles diz respeito às características do sinal a ser modelado, que deve ser considerado estacionário, gaussiano e com média zero (ESQUEF, 1999, p. 4). Entretanto, para exemplos reais, estas características só são válidas para um curto intervalo de tempo, pois para blocos com um grande número de amostras sua média tende a variar cada vez mais e a fugir do propósito de estacionariedade que se deve seguir. O trecho considerado deve ser tipicamente menor do que 50ms, segundo Paulo Esquef (1999, p. 4). Um exemplo de como um bloco de 2000 amostras (45ms) de um sinal musical pode ser considerado como gaussiano encontra-se na Figura 3.2:

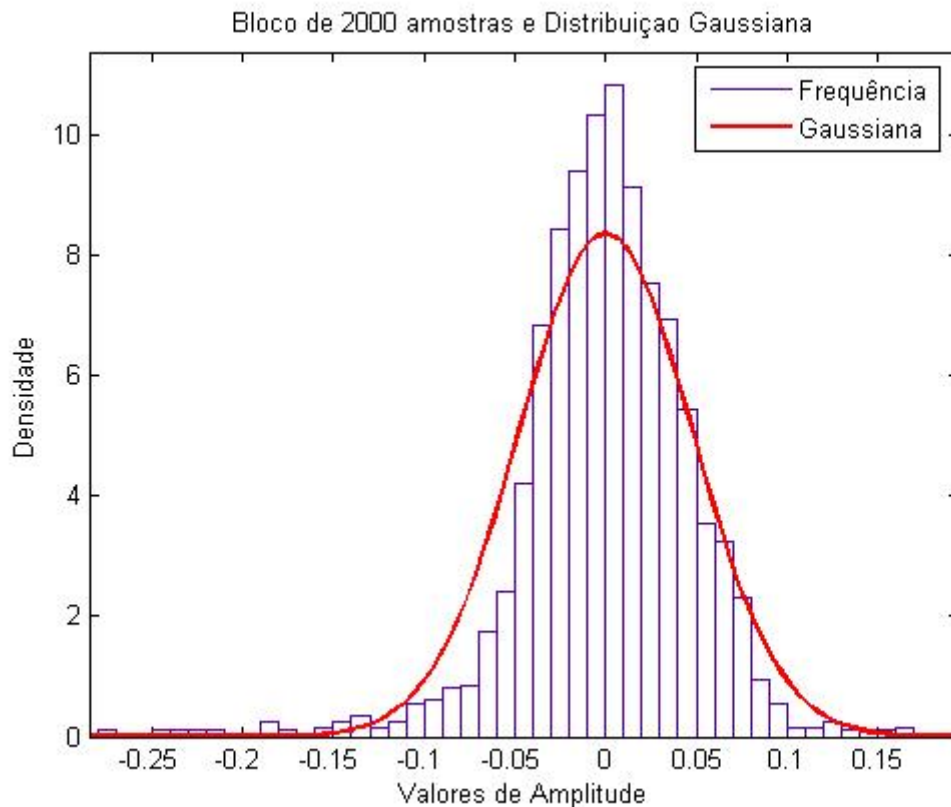


Figura 3.2 – Distribuição dos valores de amplitude de um bloco de 2000 amostras (45ms) e curva gaussiana correspondente.

Observa-se na Figura 3.2 que a distribuição dos valores de amplitude do bloco tende a obedecer a uma distribuição gaussiana, aprovando o uso do modelo AR para a representação de sinais musicais.

Para efetivamente se modelar o sinal segundo o modelo AR devem-se obter duas informações: os parâmetros do modelo auto-regressivo e a matriz de auto-regressão. Isso será tratado nas Subseções 3.1.2, 3.1.3 e 3.1.4.

3.1.2. O equacionamento do modelo auto-regressivo

Um sinal musical, denotado por $x[n]$, pode ser modelado como sendo uma saída de um filtro IIR linear que recebeu ruído branco, denotado por $e[n]$, como entrada, tal como na Figura 3.3:



Figura 3.3 – Diagrama de Blocos do Filtro AR. $e[n]$

Suponha que se deseje modelar esse sinal $x[n]$ usando o filtro AR, ou seja, a técnica de auto-regressão. Prevê-se cada amostra de $x[n]$ utilizando-se sempre amostras anteriores a ela, ponderadas pelo uso de parâmetros, que serão denotados por a_i . Esse cálculo é feito usando-se P parâmetros. Cada valor de $x[n]$ em um instante n pode ser calculado usando a Equação 3.1 (GODSILL, 1998, p. 104):

$$x[n] = \sum_{i=1}^P a_i x[n-i] + e[n] \quad (3.1)$$

onde o termo a_i corresponde aos parâmetros do filtro AR, $x[n-i]$ corresponde aos valores anteriores a $x[n]$, $e[n]$ representa o ruído branco e $x[n]$ o valor atual do modelo no instante n . A constante P faz referência ao número de parâmetros do somatório, e é também chamado de ordem do modelo AR. A escolha de P está intimamente ligada ao sinal musical em análise e varia normalmente de acordo com a riqueza de timbres do som. Por exemplo, para uma orquestra sinfônica com vários instrumentos seria adequado utilizar um P de valor em torno de 100, visando representar mais fielmente o sinal. Já em uma música instrumental mais simples (como apenas um violão, por exemplo) seria razoável utilizar um valor de P em torno 20 ou 30 (ESQUEF, 1999, p. 5).

Para se estimar os valores dos parâmetros a_i do modelo AR podem ser utilizadas várias técnicas, separadamente ou em conjunto. Podem ser mencionadas técnicas como o método de *Yule-Walker* (GIDON, 2001) ou o método de *Burg*, ou Máxima Entropia (WEISSTEIN, 1999). O método a ser empregado neste trabalho consiste em uma abordagem que utiliza a técnica dos mínimos quadrados como base.

3.1.3. A técnica dos mínimos quadrados

A técnica dos mínimos quadrados consiste em determinar uma curva que melhor se aproxime a determinados pontos existentes no plano. Para se obter essa aproximação é necessário que essa curva assuma valores que minimizem a distância entre seus valores e os pontos do plano que se deseje aproximar por tal curva. Um exemplo pode ser visto na Figura 3.4:

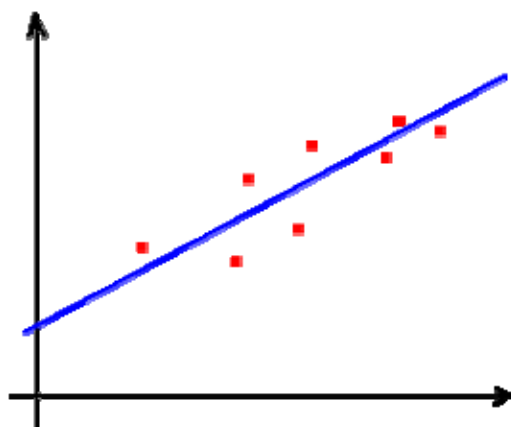


Figura 3.4 – Reta que mais se aproxima dos pontos.

Como pode ser visto para os pontos do plano exemplificado na Figura 3.4, para que a reta se aproxime destes pontos é necessário que ela assuma valores que minimizem a distância entre seus pontos e os pontos que se quer aproximar. Para uma análise que englobe todos os pontos que quer se aproximar deve-se minimizar a soma dos quadrados das distâncias (ou diferenças, ou desvios) entre os pontos e a reta.

A distância entre dois pontos (x_i, y_i) e (\bar{x}_i, \bar{y}_i) é dada por $D = \sqrt{(x_i - \bar{x}_i)^2 + (y_i - \bar{y}_i)^2}$. Para minimizar o valor de D basta minimizar o valor que está dentro da raiz, pois para o valor da raiz ser mínimo o valor de $(x_i - \bar{x}_i)^2 + (y_i - \bar{y}_i)^2$ também deve ser mínimo. Isto é feito calculando-se o quadrado da distância D , denotado por D^2 . Este procedimento de minimização é chamado de método dos mínimos quadrados. Seja o par ordenado (x_i, y_i) chamado de \mathbf{p}_i e o par ordenado (\bar{x}_i, \bar{y}_i) chamado de $\bar{\mathbf{p}}_i$. A fórmula que expressa esta minimização está na Equação 3.2:

$$\sum_{i=1}^m D_i^2 = \sum_{i=1}^m (\mathbf{p}_i - \bar{\mathbf{p}}_i)^2 \quad (3.2)$$

onde D_i representa a distância do ponto (x_i, y_i) ao ponto (\bar{x}_i, \bar{y}_i) da curva, p_i é o valor verdadeiro do ponto, \bar{p}_i é o valor aproximado e m é o número de pontos a serem aproximados. Mais detalhes a respeito do método dos mínimos quadrados pode ser obtido em (MEYER, 1965, p. 270).

3.1.4. Cálculo dos parâmetros

Suponha-se que existam dois vetores, \mathbf{X} e \mathbf{a} , onde \mathbf{X} é o vetor de amostras e \mathbf{a} o vetor de parâmetros. Suponha ainda que \mathbf{X} possua N elementos e que \mathbf{a} tenha P elementos, onde $P < N$.

Divide-se o vetor \mathbf{X} em duas partes, \mathbf{X}_0 e \mathbf{X}_1 , como na Equação 3.3:

$$\mathbf{X} = \left[\underbrace{x[1], x[2], \dots, x[P]}_{x_0}, \underbrace{x[P+1], x[P+2], \dots, x[N]}_{x_1} \right]^T \quad (3.3)$$

Com isto tem-se:

$$\mathbf{X}_0 = [x[1] \quad x[2] \quad \dots \quad x[P]]^T \quad (3.4)$$

$$\mathbf{X}_1 = [x[P+1] \quad x[P+2] \quad \dots \quad x[N]]^T \quad (3.5)$$

O vetor \mathbf{a} é formado pelos elementos a_i , $i = 1, \dots, P$. Ele está disposto como na Equação 3.6:

$$\mathbf{a} = [a_1 \quad a_2 \quad \dots \quad a_P]^T \quad (3.6)$$

A Figura 3.5a faz uma representação dos vetores encontrados nas Equações 3.4 e 3.5, enquanto que a Figura 3.5b traz uma representação da Equação 3.6:

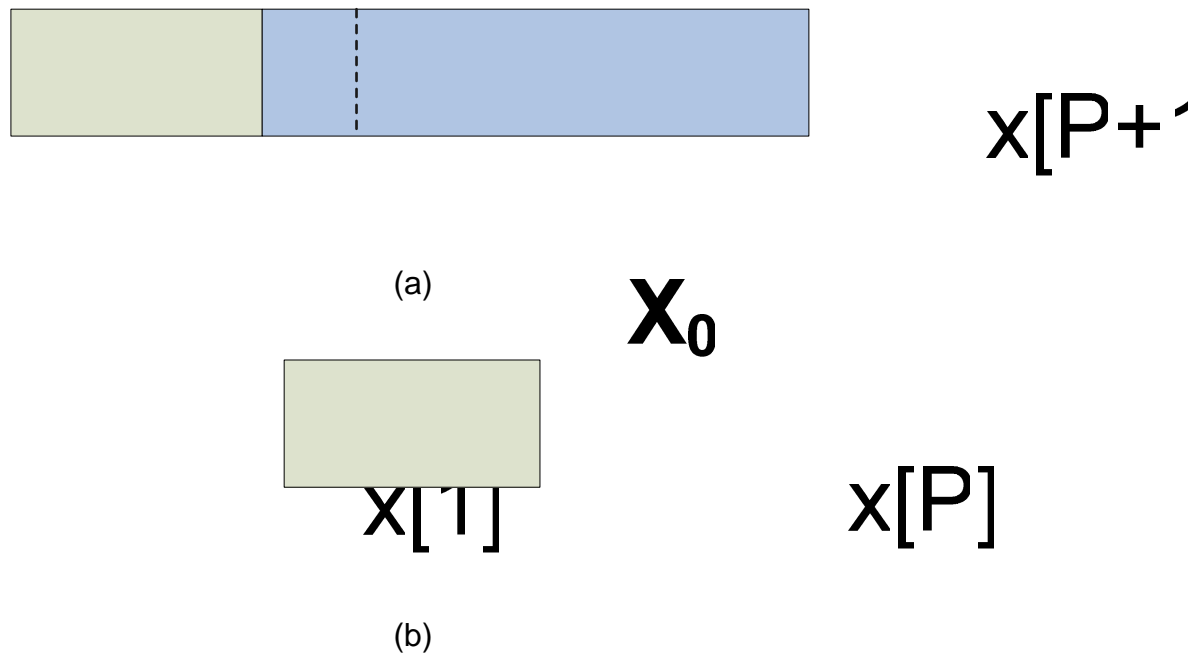


Figura 3.5 – (a) Vetores \mathbf{X}_0 e \mathbf{X}_1 . (b) Vetor \mathbf{a} .

Visualizando as Figuras 3.5a e 3.5b se torna mais fácil descrever o funcionamento dos vetores. Para o cálculo de cada amostra $x[n]$, $(P+1) \leq n \leq N$, serão utilizadas as P amostras de \mathbf{X} anteriores a ela, em conjunto com os respectivos parâmetros a_i , de a_1 até a_p . Por exemplo, para se calcular $x[P+1]$ deve-se utilizar os seguintes valores de $x[n]$: $x[P]$, $x[P-1]$, $x[P-2]$, $x[P-3]$ até $x[1]$, sempre multiplicados pelo respectivo coeficiente a_i . Já para o cálculo de $x[P+2]$ deve-se utilizar o recém calculado $x[P+1]$ até $x[2]$ e assim por diante. Esse processo de cálculo regressivo é enumerado pela Equação 3.7:

$$x[n] = a_1 x[n-1] + a_2 x[n-2] + a_3 x[n-3] + \dots + a_p x[1] + e[n], \quad (P+1 \leq n \leq N) \quad (3.7)$$

Com esse funcionamento em mente é possível escrever a Equação 3.7 na forma matricial dada pela Equação 3.8, a qual represente os valores que irão ser calculados de forma auto-regressiva (GODSILL, 1998, p. 87):

$$\mathbf{X}_1 = \mathbf{G}\mathbf{a} + \mathbf{e} \quad (3.8)$$

onde \mathbf{G} é uma matriz que é composta apenas pelos elementos de \mathbf{X} e tem tamanho $(N-P) \times P$. Cada linha de \mathbf{G} corresponde às amostras passadas que

serão utilizadas no cálculo de cada amostra do vetor \mathbf{X}_1 . Ela é chamada de matriz de auto-regressão (GODSILL, 1998, p. 87):

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} x[P] & x[P-1] & \cdots & x[2] & x[1] \\ x[P+1] & x[P] & \cdots & x[3] & x[2] \\ \vdots & & \ddots & & \vdots \\ x[N-2] & x[N-3] & \cdots & x[N-P] & x[N-P-1] \\ x[N-1] & x[N-2] & \cdots & x[N-P+1] & x[N-P] \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

O elemento e da Equação 3.8 é chamado de vetor de excitação. Naturalmente ele possui o mesmo tamanho de \mathbf{X}_1 e é da forma:

$$\mathbf{e} = [e[P+1] \quad e[P+2] \quad \cdots \quad e[N]]^T \quad (3.10)$$

E \mathbf{a} é o vetor dos parâmetros, como na Equação 3.6. Conferida a organização de cada vetor e matriz que compõe a Equação 3.8, pode-se expandi-la e representá-la matricialmente, segundo a Equação 3.11:

$$\begin{bmatrix} x[P+1] \\ x[P+2] \\ \vdots \\ x[N] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x[P] & x[P-1] & \cdots & x[2] & x[1] \\ x[P+1] & x[P] & \cdots & x[3] & x[2] \\ \vdots & & \ddots & & \vdots \\ x[N-2] & x[N-3] & \cdots & x[N-P] & x[N-P-1] \\ x[N-1] & x[N-2] & \cdots & x[N-P+1] & x[N-P] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e[P+1] \\ e[P+2] \\ \vdots \\ e[N] \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

Pode-se, também, representar a Equação 3.8 de outra forma, que será muito útil posteriormente, na etapa da interpolação de estalos. Ela está representada na Equação 3.12:

$$\mathbf{e} = \mathbf{A}\mathbf{X} \quad (3.12)$$

A Equação 3.12, de forma algébrica, é proveniente do isolamento de $e[n]$ da Equação 3.7, conforme a Equação 3.13:

$$e[n] = -a_p x[1] - \dots - a_3 x[n-3] - a_2 x[n-2] - a_1 x[n-1] + x[n], \quad (P+1 \leq n \leq N) \quad (3.13)$$

A Equação 3.12 se utiliza de uma nova matriz, denotada por \mathbf{A} . Ela é formada apenas pelos valores do vetor \mathbf{a} e está representada na Equação 3.14:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -a_p & \cdots & -a_1 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & -a_p & \cdots & -a_1 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \cdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & -a_p & \cdots & -a_1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

A matriz \mathbf{A} possui a função de “mapear” os parâmetros do vetor \mathbf{a} de acordo com as amostras de \mathbf{X} que serão preditas, ou seja, de $x[P+1]$ até $x[N]$. \mathbf{X} é o vetor da Equação 3.3. Cada linha da matriz \mathbf{A} filtra os valores do vetor \mathbf{X} que serão utilizados para o cálculo regressivo de cada $e[n]$, gerando o mesmo resultado de quando se isola a variável e na Equação 3.8.

Para uma melhor visualização da Equação 3.12 pode-se representá-la matricialmente, de acordo com a Equação 3.15:

$$\begin{bmatrix} e[P+1] \\ e[P+2] \\ \vdots \\ e[N] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a_p & \cdots & -a_1 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & -a_p & \cdots & -a_1 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \cdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & -a_p & \cdots & -a_1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x[1] \\ x[2] \\ \vdots \\ x[N] \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

A Equação 3.12 assume uma disposição muito parecida com a o modelo linear paramétrico, onde cada elemento do modelo AR tem de ser rigorosamente calculado a partir de seus P valores anteriores (GODSILL, 1998, p. 88).

Segundo Paulo Esquef (1999, p. 5), uma das formas de se calcular os parâmetros do modelo AR consiste em arbitrar uma função custo F , derivá-la em relação aos parâmetros e igualar a derivada dessa função à zero. Na abordagem por mínimos quadrados utiliza-se como função custo $F = e^T e$. Nesse caso, a minimização de F por \mathbf{a} resulta em:

$$\mathbf{a} = (\mathbf{G}^T \mathbf{G})^{-1} \mathbf{G}^T \mathbf{X}_1 \quad (3.16)$$

Tendo calculado os parâmetros denotados por \mathbf{a} e achado a matriz de auto-regressão \mathbf{G} já é possível obter o modelo AR correspondente ao sinal que se deseja modelar. Isso dá seguimento ao processo de detecção de estalos, tratado na seção 3.2.

3.2. DETECÇÃO DE ESTALOS

Uma das partes mais interessantes do assunto de restauração de áudio é a detecção da região das amostras corrompidas, ou seja, da região afetada pelos estalos presentes em uma música. Esta parte do processo é a parte que requer a maior atenção e estudo, pois o grande desafio está em detectar os distúrbios o mais precisamente possível, sem que regiões limpas sejam afetadas de forma a provocar distorções audíveis ao sinal.

Existem vários métodos para tentar resolver o problema da detecção. Os mais sofisticados se concentram em modelar o ruído separadamente do sinal, de uma forma muito especial, visando extrair informações que existiam antes do processo de corrupção, fazendo com que o sinal corrigido se aproxime ainda mais ao sinal da gravação original. Tais técnicas envolvem o uso de probabilidade Bayesiana (GODSILL, 1998, p. 191) ou até mesmo o uso de Cadeias de Markov (GODSILL, 1998, p. 233). O método a ser abordado neste trabalho vislumbra a detecção de ruído impulsivo pela aplicação inversa do filtro AR, visto na Seção 3.1 deste trabalho. Esse filtro possui nível de dificuldade mediano de implementação e possui vários pontos fortes, como a fácil configuração de seus parâmetros. Porém, necessita de alguns ajustes para alcançar-se uma melhor eficiência no seu uso, pois o uso desses parâmetros gerenciará toda a etapa de correção, fazendo com que ela funcione corretamente ou não. Tais parâmetros serão explicados nas Subseções 3.2.1, 3.2.2, 3.2.3 e 3.2.4. O primeiro passo da detecção de estalos é entender como eles se comportam em um sinal musical.

3.2.1. Modelagem dos estalos

O processo da modelagem de ruído impulsivo (estalos) em um sinal musical obedece a duas regras. A primeira diz que o ruído deve ser considerado como aditivo ao sinal. Um sinal $y[n]$, que é o sinal afetado por ruído impulsivo, é então modelado como sendo a soma de um modelo AR do sinal limpo $x[n]$ somado com o ruído, denotado pela parcela $i[n]d[n]$. Isto pode ser visto matematicamente através da Equação 3.17:

$$y[n] = x[n] + i[n]d[n] \quad (3.17)$$

onde o vetor $i[n]$ é o vetor binário de detecção e $d[n]$ a amplitude de cada amostra corrompida n . O vetor de detecção $i[n]$ funciona da seguinte forma: se uma amostra for considerada afetada, $i[n]$ assume valor 1. Se não, assume valor 0. Infere-se dessa forma que $d[n]$ só armazenará os valores de amplitude se $i[n]$ for igual a 1. O nome de vetor binário de detecção foi originado do princípio que $i[n]$ só admite um dos dois valores para cada amostra, ou seja, ou 0 ou 1.

A segunda regra da modelagem de estalos diz que o ruído impulsivo deve ser independente do sinal limpo, como visto na Equação 3.17, onde a parcela $i[n]d[n]$ não depende dos valores do sinal limpo $x[n]$ para existir.

3.2.2. Características dos estalos

Na tentativa de se caracterizar de forma bem definida o local onde se encontra o ruído impulsivo deve-se atentar a algumas características que foram observadas ao longo das diversas pesquisas feitas no ramo da restauração digital de áudio. As características mais comuns observadas em ruídos impulsivos em sinais musicais são:

- As degradações tendem a ocorrer em “explosões” contínuas (surtos) de amostras consideradas corrompidas, começando em posições aleatórias na forma de onda e de duração randômica (tipicamente entre 20 e 200 amostras usando uma amostragem de 44,1 kHz) (GODSILL, 1998, p. 100).
- É consideravelmente mais difícil tratar conjuntos de estalos do que um simples estalo, pois os efeitos de estalos adjacentes podem se cancelar no espaço de detecção e ocasionarem a não-detecção do problema, ou se adicionarem construtivamente, dando a impressão de se haver mais impulsos presentes, ocasionando o surgimento de alarmes falsos.
- A amplitude dos distúrbios pode variar bastante ao longo do sinal. Poderão existir estalos com amplitudes maiores do que o próprio sinal quanto estalos que estarão em níveis audíveis muito abaixo do nível sonoro do bloco de amostras. Em particular, os de maior

amplitude tendem a polarizar o cálculo dos parâmetros do modelo, fazendo com que os de menor amplitude não sejam detectados.

Dadas as características apresentadas se torna mais fácil o entendimento do procedimento de detecção, que visa solucionar o problema a partir dos aspectos apresentados. Entendidos estes aspectos, pode-se avançar para o próximo passo, que é a construção do filtro AR inverso.

3.2.3. O Filtro AR inverso

A técnica de detecção de ruído impulsivo pelo filtro AR inverso é talvez uma das técnicas mais utilizadas na restauração de sinais musicais. Seu uso é muito comum em aplicações comerciais de restauração de áudio.

O processo de construção do filtro inverso é bastante parecido com o do filtro AR. O procedimento consiste em aplicar o filtro AR de maneira a ter sua entrada e sua saída permutadas entre si. Portanto, ao invés de se ter como entrada o ruído branco $e[n]$ tem-se como entrada um sinal AR modelado, denotado por $y[n]$. Aplica-se o filtro AR inverso em $y[n]$, de forma a ter como saída o ruído $e[n]$, ou também chamado de erro de predição. Um diagrama que pode servir de exemplo para a visualização desse processo se encontra na Figura 3.6:



Figura 3.6 – Diagrama de blocos para o filtro AR inverso.

Esse filtro é obtido a partir da função de transferência encontrada na Equação 3.18 (ESQUEF, 1999, p. 15):

$$H(z) = 1 - \sum_{i=1}^P a_i z^{-i} \quad (3.18)$$

onde os coeficientes a_i são aqueles que foram levantados na modelagem auto-regressiva do sinal, descrita na seção 3.1. Para esse filtro, o diagrama de blocos da Figura 3.6 fica da seguinte forma:



Figura 3.7 – Diagrama de blocos para o filtro $H(z)$.

A Equação 3.18 pode ser revertida para o domínio de tempo discreto utilizando-se a transformada Z inversa. Para isso representa-se a Equação 3.18 em função da sua entrada $Y(z)$ e sua saída $E(z)$:

$$\frac{E(z)}{Y(z)} = 1 - \sum_{i=1}^P a_i z^{-i} \quad (3.19)$$

Isola-se $E(z)$, de forma a se obter a saída do filtro:

$$E(z) = \left(1 - \sum_{i=1}^P a_i z^{-i} \right) Y(z) \quad (3.20)$$

Aplicando a propriedade distributiva:

$$E(z) = Y(z) - \sum_{i=1}^P a_i z^{-i} Y(z) \quad (3.21)$$

Calcula-se a transformada Z inversa, para achar o filtro no domínio de tempo discreto:

$$e[n] = y[n] - \sum_{i=1}^P a_i y[n-i] \quad (3.22)$$

que é a saída do filtro AR inverso que se deseja encontrar. Os valores de $e[n]$ representam a excitação, ou erro de predição.

Um exemplo de um vetor de erro de predição para um bloco de 1000 amostras se encontra na Figura 3.8:

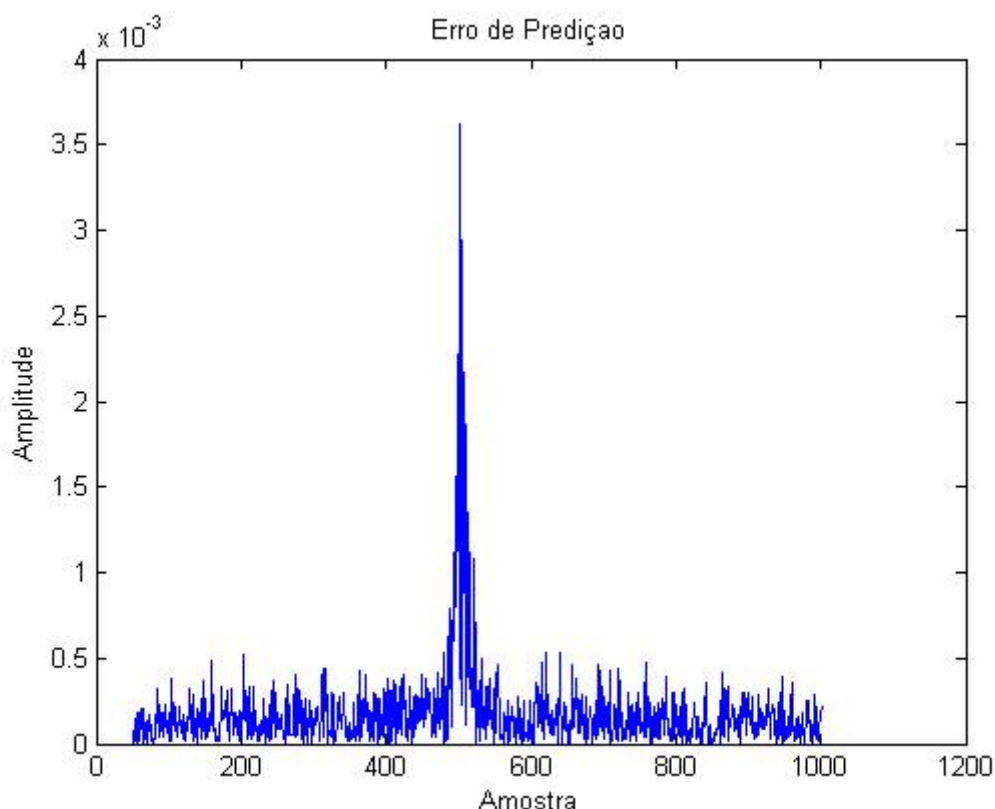


Figura 3.8 – Erro de Predição, bloco de 1000 amostras.

Na Figura 3.8 pode-se observar a ação do erro de predição, evidenciando a região do bloco onde o estalo se encontra, mais precisamente entre as amostras de número 450 e 550, possuindo amostras com um valor de amplitude notadamente maior do que no resto do bloco.

3.2.4. Características do erro de predição

O erro de predição apresenta algumas características passíveis de serem analisadas, para um melhor entendimento do seu funcionamento e do porquê dele evidenciar os estalos.

As amostras de $e[n]$ assumem a seguinte condição: ao calcular o erro de predição para um bloco de 2000 amostras e logo após utilizar a função *hist* do software *Matlab*® para obter o histograma (frequência dos valores das amostras)

do vetor é possível observar que os valores das amostras de $e[n]$ estão distribuídos de forma a representar uma distribuição Gaussiana, tal como no gráfico da Figura 3.9:

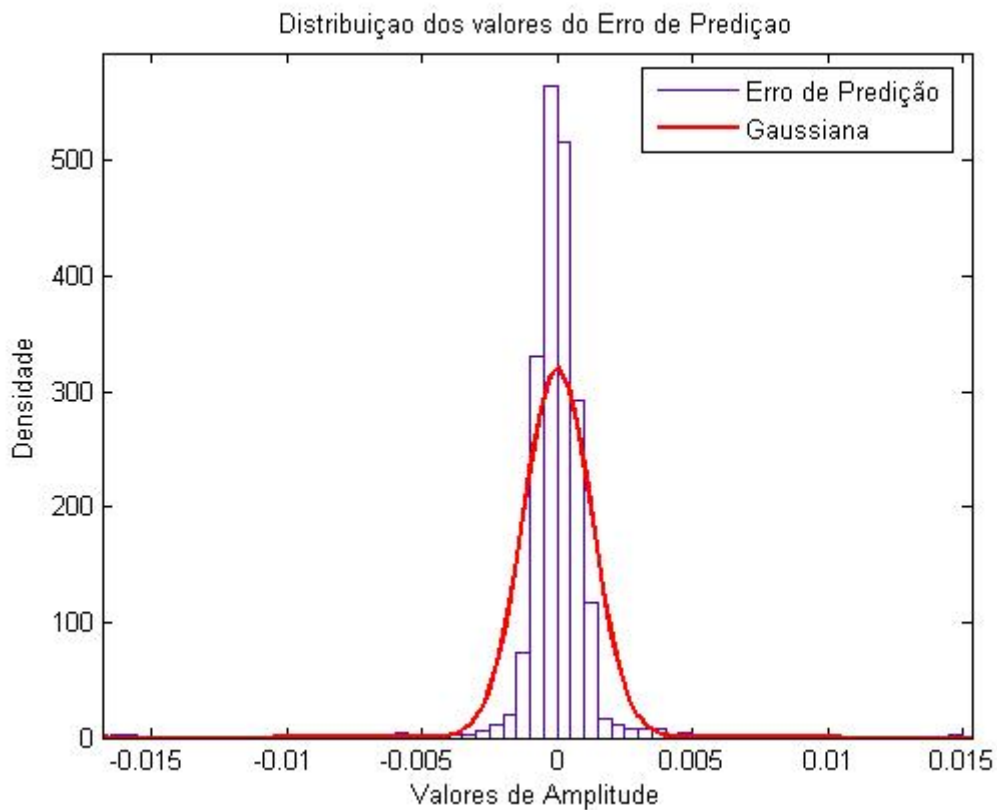


Figura 3.9 – Histograma dos valores do erro de predição.

Pode-se assumir que seus valores terão baixa variância ao longo de um bloco de amostras considerado limpo (livre de estalos). Um exemplo se encontra na Figura 3.10:

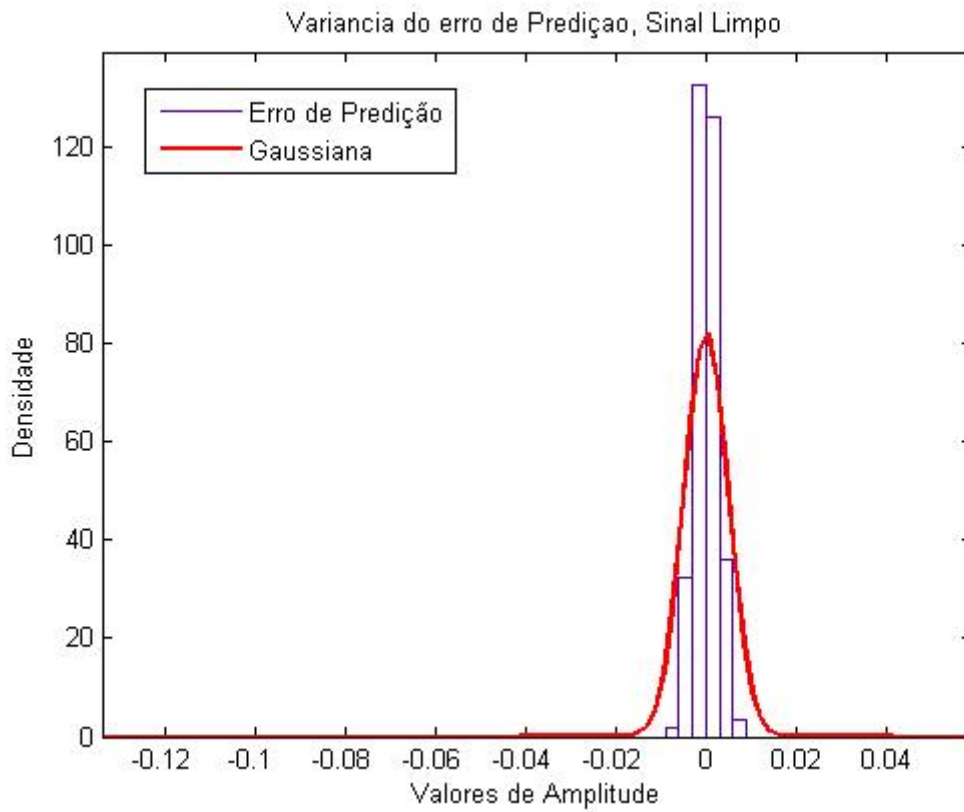


Figura 3.10 – Histograma de um bloco de amostras limpo.

A base do histograma da Figura 3.10 confirma que a variância é baixa, pois ela se encontra bastante reduzida. Na Figura 3.11 vê-se o comportamento de um bloco de amostras corrompido:

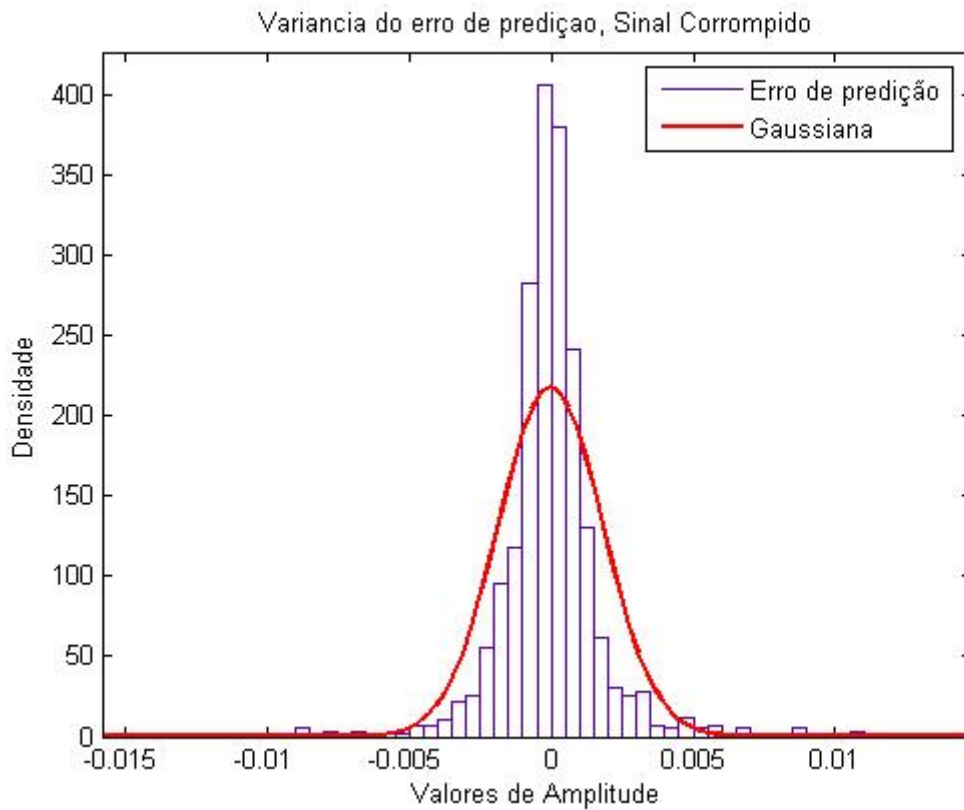


Figura 3.11 – Erro de predição em um sinal corrompido.

A Figura 3.11 evidencia que a variância do erro de predição, desta vez, é maior do que o caso da Figura 3.10, assumindo diversos valores de amplitude.

Outra característica a ser notada é que o filtro AR inverso registra atenuações de cerca de 40 dB ou mais na potência do sinal. Tomando como exemplo uma atenuação na saída de 40 dB é possível obter a relação entre a potência de saída p_{sa} , referente a $e[n]$, e a potência de entrada p_{en} , referente a $y[n]$:

$$40 = 10 \log \frac{p_{sa}}{p_{en}} \quad (3.23)$$

Isolando o logaritmo:

$$\log \frac{p_{sa}}{p_{en}} = 4 \quad (3.24)$$

Resolvendo a Equação 3.24 de forma a obter a relação $\frac{p_{sa}}{p_{en}}$:

$$\frac{p_{sa}}{p_{en}} = 10^{-4} = \frac{1}{10000} \quad (3.25)$$

o que propõe que a potência do sinal de saída p_{sa} do filtro AR inverso seria dez mil vezes menor do que a potência p_{en} do sinal de entrada. Esse fato pode ser visualizado através da Figura 3.12, onde é mostrado um bloco de um sinal limpo (sinal de entrada do filtro AR inverso sem corrupção por estalos) em conjunto com sua densidade espectral de potência:

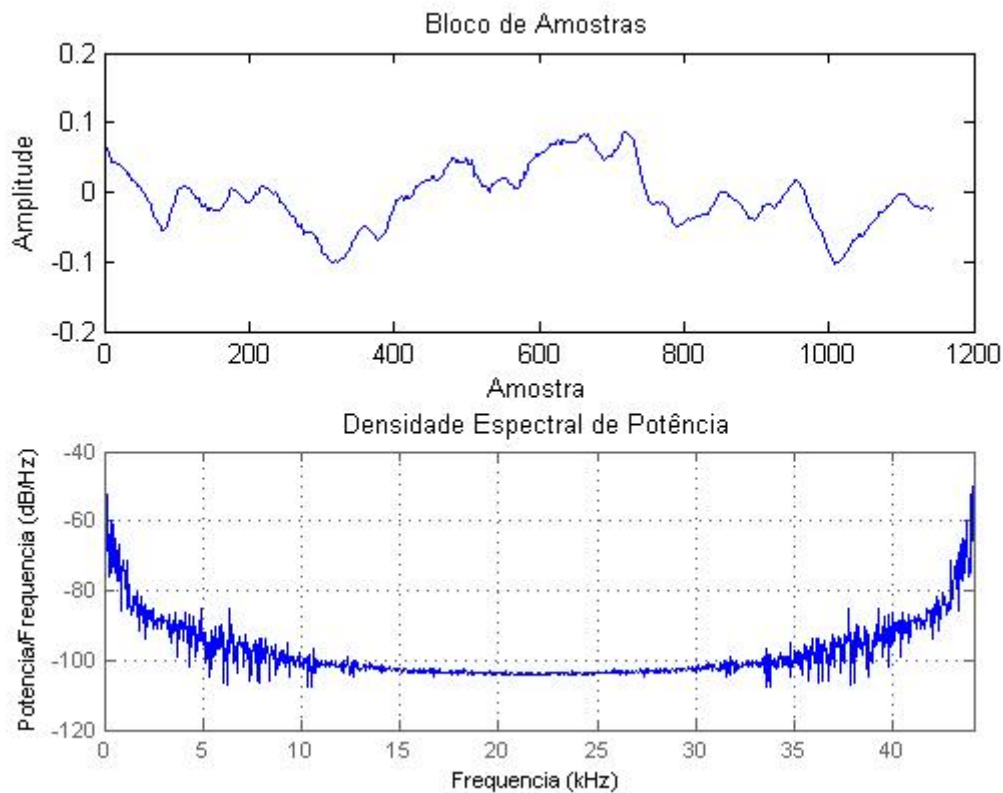


Figura 3.12 – Bloco de amostras de um sinal limpo e densidade espectral de potência correspondente.

Mostra-se na Figura 3.13 o erro de predição do bloco de amostras da Figura 3.12 e sua respectiva densidade espectral de potência:

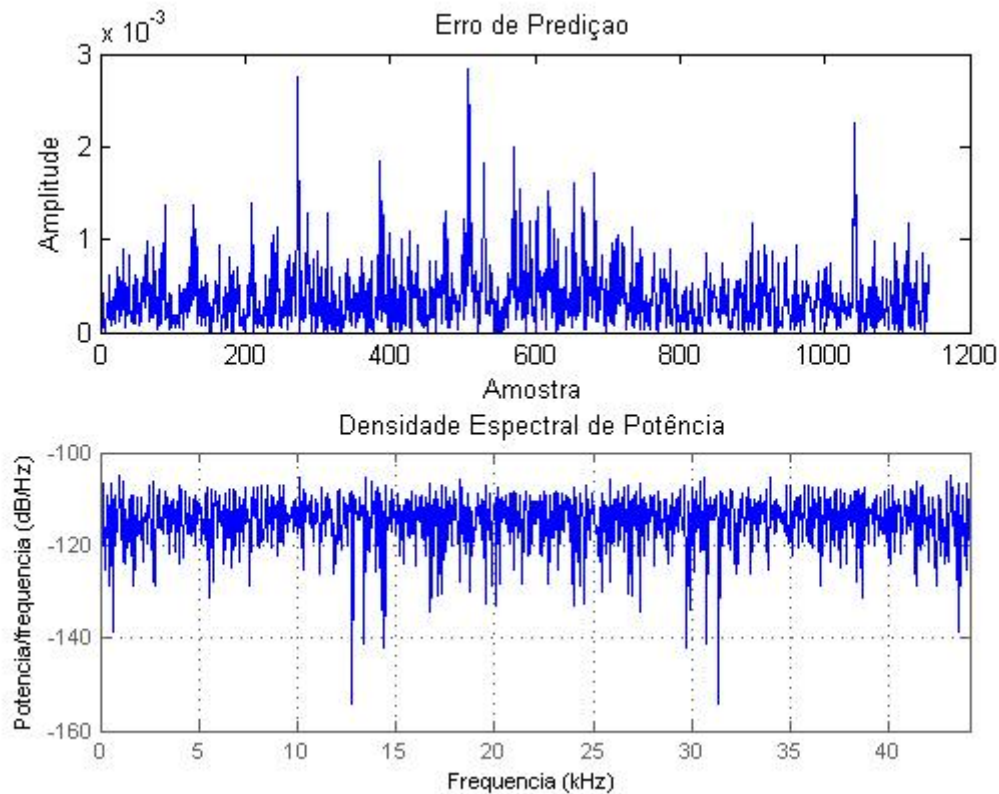
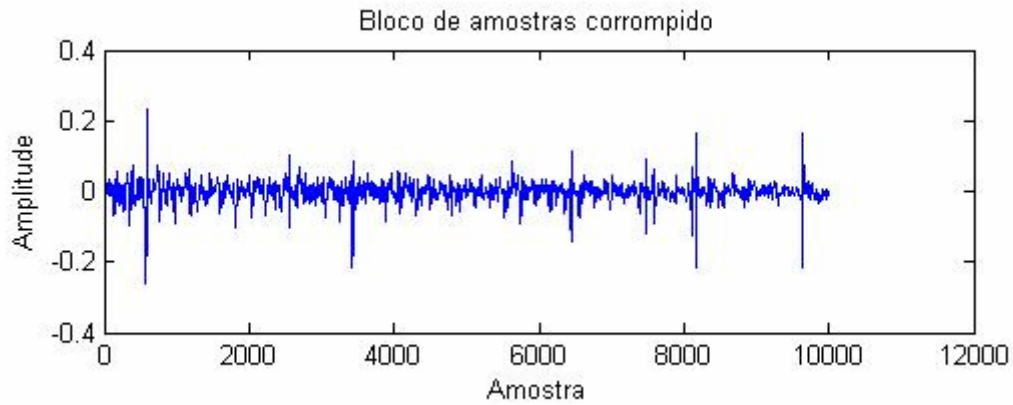


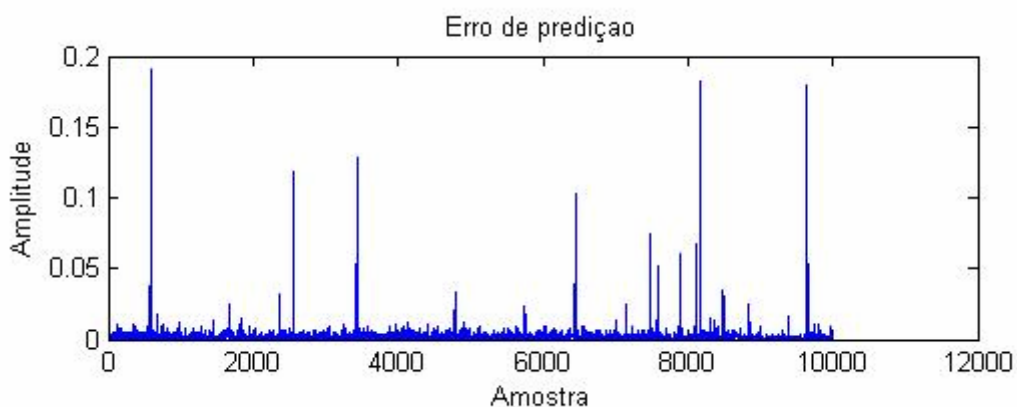
Figura 3.13 – Erro de predição e Densidade Espectral de Potência correspondente.

Observa-se que na Figura 3.12 o menor valor de potência atinge cerca de -108 dB/Hz nas frequências médias, enquanto que na Figura 3.13 o maior valor de potência fica em torno de -108 dB/Hz, ao longo de todo o espectro, evidenciando uma expressiva queda na potência no sinal para todas as frequências.

Em geral, o filtro AR inverso tende a amplificar as regiões que não possuem muita relação com as partes não afetadas do sinal, ou seja, assume valores de maior magnitude quando amostras com baixa correlação com o sinal são detectadas. Os estalos, por serem considerados adicionados ao sinal, não possuem alta correlação com o sinal. Um exemplo disso se encontra nas Figuras 3.14a e 3.14b:



(a)



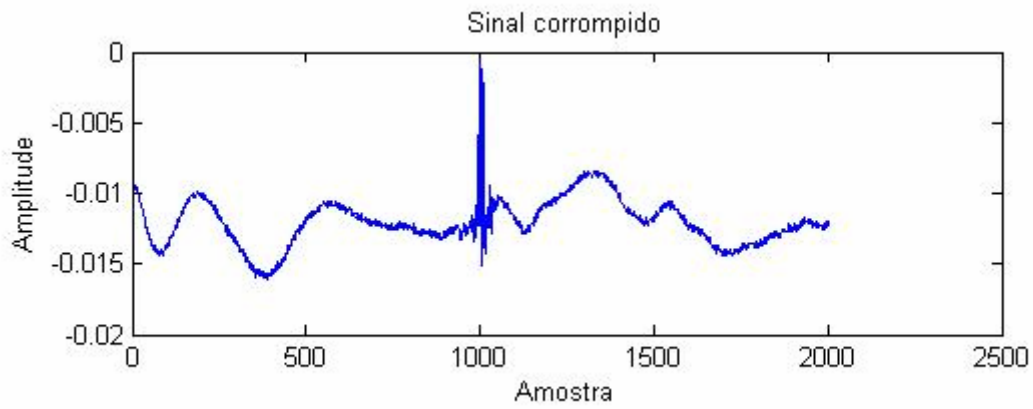
(b)

Figura 3.14 – (a) Bloco de amostras corrompido. (b) Erro de predição correspondente.

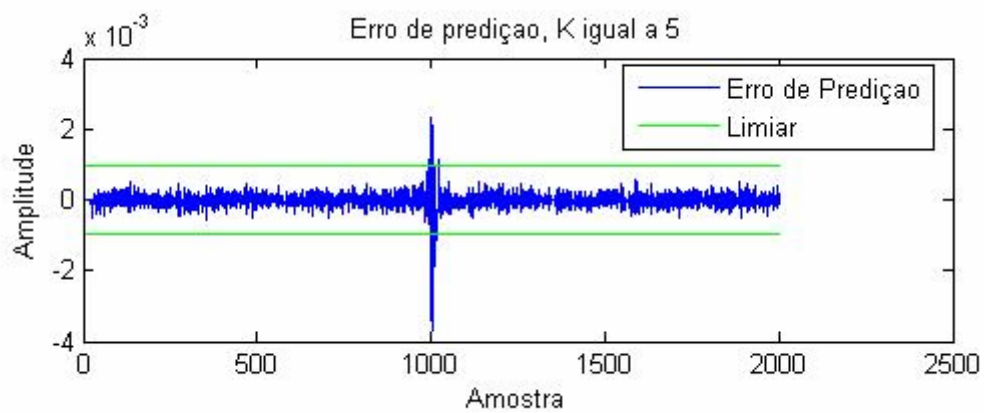
Conhecendo-se os valores de $e[n]$ para o bloco de amostras a ser analisado uma formulação de detecção de estalos baseada em limiar pode ser feita da seguinte forma (GODSILL, 1998, p. 130):

- Se $|e[n]| > K\sigma_e^2$, então a amostra é considerada afetada, senão a amostra é considerada limpa, onde σ_e^2 é a variância do erro de predição e K é chamado de parâmetro de detecção.

A seguir, nas Figuras 3.15a e 3.15b, pode-se visualizar um bloco de amostras corrompido e seu respectivo erro de predição, onde um distúrbio foi localizado. O erro de predição põe em evidência a região onde está localizado o estalo. Com o parâmetro K igual a cinco, por exemplo, consegue-se detectar um número de amostras corrompidas:



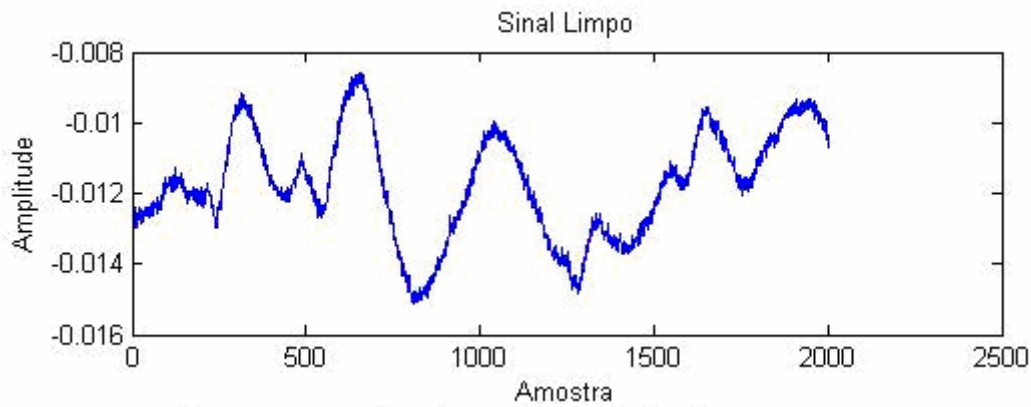
(a)



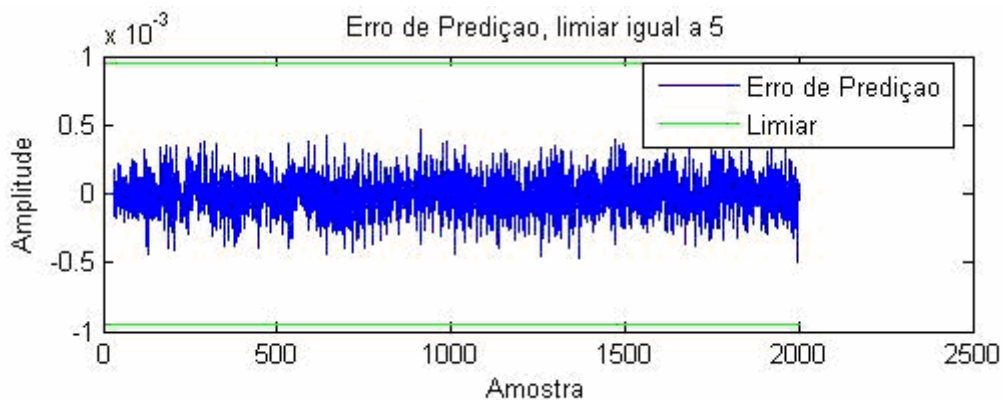
(b)

Figura 3.15 – (a) Sinal corrompido. (b) Erro de predição, K Igual a 5.

Na Figura 3.16 é possível visualizar um bloco de amostras considerado limpo em conjunto com o limiar, que não chega a “cortar” nenhuma parte da forma de onda, não detectando nenhum distúrbio. Novamente utiliza-se o valor de K igual a cinco:



(a)



(b)

Figura 3.16 – (a) Sinal limpo. (b) Erro de predição, K igual a 5.

O uso do limiar se faz necessário para uma análise onde se espera que algumas partes do sinal sejam selecionadas, especialmente as que caracterizem ruído impulsivo, na esperança de se achar dois aspectos importantes na detecção: a localização e a duração do ruído.

Para blocos de amostras onde estão presentes estalos de grande amplitude é viável selecionar um K de maior valor, na tentativa de que apenas estes distúrbios sejam detectados. Para estalos de menor amplitude seria coerente selecionar um K de menor valor. Vale a pena lembrar que em ambas as situações, partes que na realidade não são distúrbios podem ser detectadas da mesma forma e serão afetadas durante o processo de correção. Portanto, o valor de K a ser utilizado é de caráter inteiramente empírico.

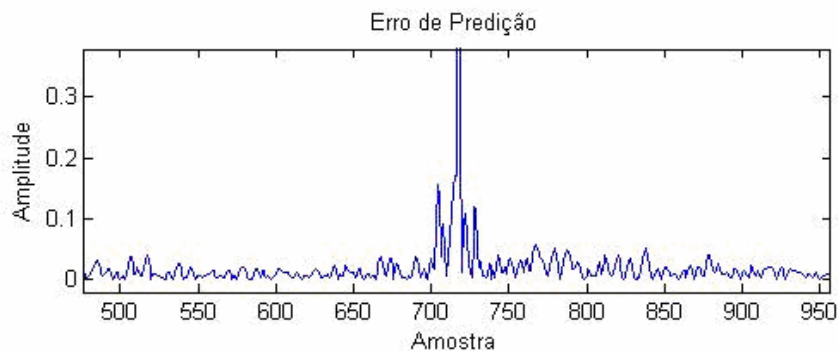
O valor da variância de $e[n]$ pode ser calculado de várias formas. Dentre elas podem ser citados cálculos como o encontrado na Equação 3.26 (BISCAINHO, 2000, p. 127):

$$\sigma_e^2 = 1,4826 \times \text{mediana}|e[n]| \quad (3.26)$$

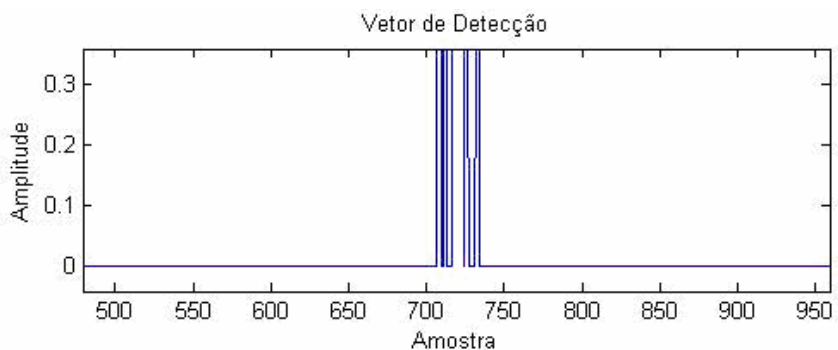
onde a mediana de $e[n]$ é o valor da amostra do meio do bloco analisado, caso o tamanho do bloco seja ímpar. Caso seja par, pegam-se os 2 valores centrais do bloco e calcula-se a média aritmética entre eles.

Achados os valores necessários, sendo eles o vetor $e[n]$, o parâmetro K e a variância σ_e^2 parte-se para a construção do vetor binário de detecção, que será denotado pela variável $i[n]$, de acordo com a Equação 3.17.

Um exemplo de um erro de predição e seu respectivo vetor de detecção está nas Figuras 3.17a e 3.17b, em visão aproximada (*zoom in*):



(a)



(b)

Figura 3.17 – (a) Erro de predição. (b) Vetor de detecção.

Nota-se que o vetor de detecção não detecta todas as amostras pertencentes ao estalo. Algumas poucas amostras de $i[n]$ permanecem com valor zero.

Para contornar esse problema é proposta uma generalização no sentido de que para qualquer estalo encontrado deve-se arbitrar que amostras adjacentes a ele também sejam consideradas como corrompidas. Por exemplo: para cada duas amostras consideradas corrompidas conta-se o número de amostras não corrompidas entre elas. Se o número de amostras for de até 5 ou 10, estas amostras serão consideradas corrompidas, da mesma forma assumindo valor 1 no vetor de detecção. Isto visa facilitar a detecção de estalos de maior duração. Todavia, esse recurso tende a superestimar impropriamente a duração de estalos de menor duração.

Um exemplo com um adicional de 10 amostras pode ser visto na Figura 3.18:

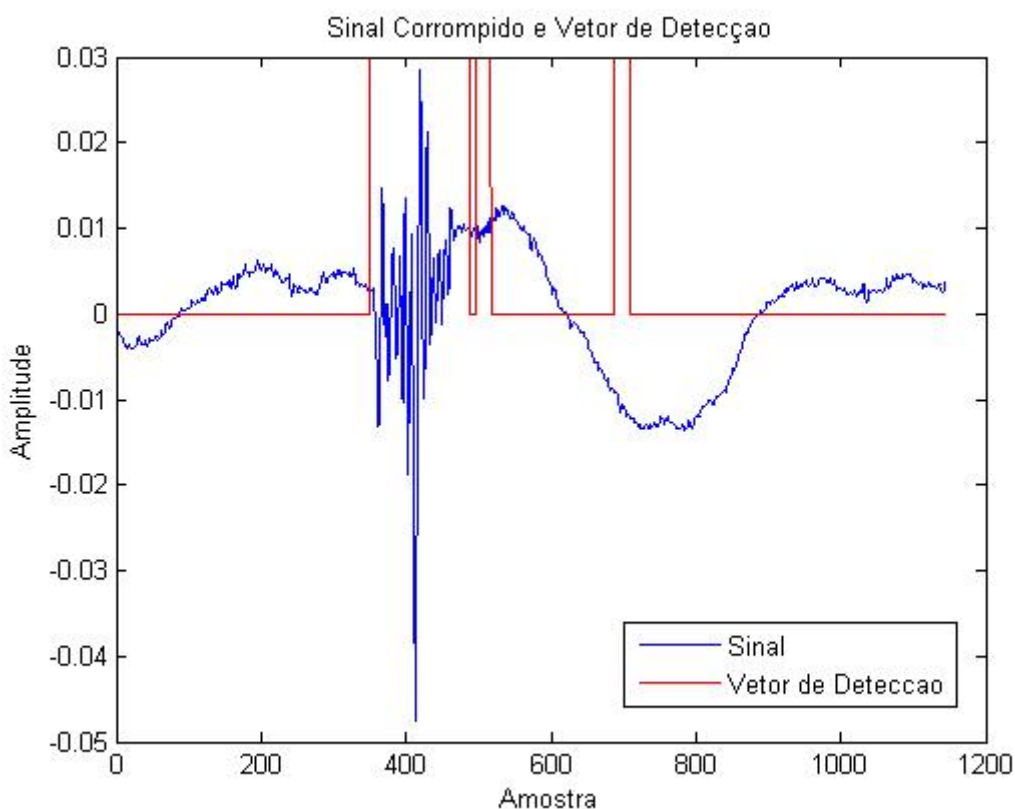


Figura 3.18 – Vetor de Detecção e o Sinal Corrompido, com adicional de 10 amostras.

O vetor de detecção da Figura 3.18 teve sua escala reduzida para atender aos níveis de amplitude do sinal a manter uma boa visualização do que acontece, estabelecendo valor 0.03 para amostras consideradas corrompidas, ao invés do valor 1.

Como pôde ser visto durante esta seção, o processo de detecção possui diversas características a serem analisadas e estudadas para uma detecção eficiente. Existem mais alguns ajustes que podem ser efetuados, como a detecção do ruído pelo sentido inverso, ou seja, inverte-se o bloco de amostras corrompido e o vetor dos parâmetros do modelo AR, reestimando-se a localização e a duração de cada estalo, utilizando-se o mesmo procedimento. Este processo visa detectar mais precisamente o fim de cada estalo.

O processo de detecção por limiar é bastante robusto, isto é, executa bem o que se propõe a fazer. Porém, apresenta uma desvantagem: não há garantias de que todos os estalos em um conjunto de amostras sejam efetivamente localizados e que suas durações sejam eficientemente estimadas.

Terminada a etapa de detecção dá-se início ao procedimento de correção do sinal, assunto que será tratado na Seção 3.3 desse trabalho.

3.3. CORREÇÃO DE ESTALOS

A última parte do processo de restauração de estalos em um sinal musical diz respeito à interpolação das regiões onde eles se encontram, ou seja, estimar os valores das amostras que existiam nos lugares onde o distúrbio se encontra através de uma técnica que utiliza o modelo AR como base. Este algoritmo é largamente utilizado em sistemas comerciais de restauração de áudio e está entre os métodos de correção mais simples.

A idéia começa logo após o processo de detecção de estalos, onde se supõe que, para cada bloco, as amostras corrompidas foram detectadas e dispostas de modo a se construir o vetor binário de detecção, explicado na Seção 3.2. O algoritmo de interpolação assume que o sinal musical já esteja devidamente modelado pelo modelo AR, ou seja, já tem seus parâmetros e a matriz de auto-regressão já calculados. A técnica de correção a ser utilizada neste trabalho é chamada de técnica de interpolação auto-regressiva pelo método dos mínimos quadrados (LSAR – *Least Squares Autoregressive Interpolation*). Na Figura 3.19, é mostrado um diagrama que explica um sistema de interpolação iterativo:

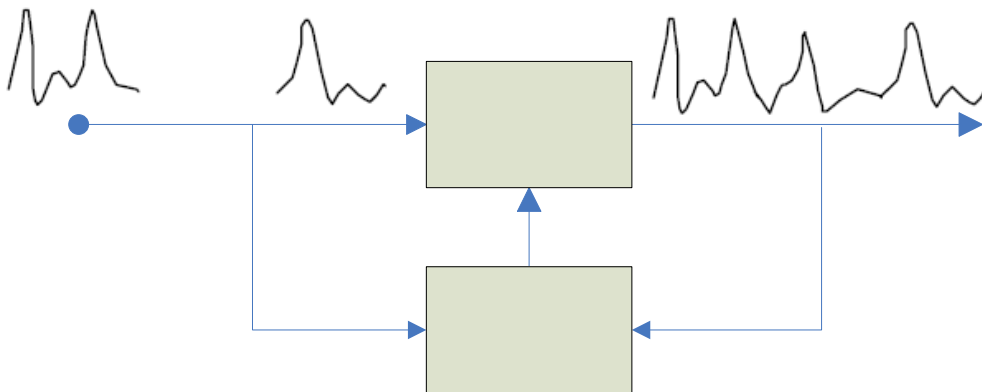


Figura 3.19 – Diagrama de Interpolação de Sinais.

Fonte: VASEGHI, 2000, p. 314.

Ao determinar-se a qualidade da interpolação devem-se levar em conta alguns aspectos, os quais são (VASEGHI, 2000, p. 324):

- **Estrutura de correlação do sinal** – Para sinais determinísticos como senóides o erro de interpolação (diferença entre o sinal que se quer ter e o interpolado) é zero. Entretanto, sinais que carregam muita informação

podem possuir um alto grau de aleatoriedade, fazendo com que uma interpolação perfeita seja impossível.

- **Tamanho do segmento a ser interpolado** – A quantidade de informação perdida aumenta com o número de amostras corrompidas. Com esse aumento, o algoritmo de interpolação se torna cada vez mais impreciso. Em uma seqüência de amostras corrompidas o erro de interpolação geralmente é maior naquelas que se localizam no meio do conjunto de amostras afetadas.
- **Natureza do ruído presente no sinal** – A interpolação LSAR não consegue analisar as características do ruído presente no sinal. Em geral, esta técnica tende a subestimar a energia do ruído presente.
- **Ordem do modelo e técnica utilizada para o cálculo dos parâmetros** – O erro de interpolação depende da ordem do modelo AR utilizado. Em geral, uma ordem do modelo com valor que seja duas ou três vezes maior do que o tamanho de cada seqüência de amostras corrompidas já mostra bons resultados.

Vistas estas características tenta-se obter um interpolador de amostras que consiga atendê-las e respeitá-las, maximizando os resultados e alcançando um nível satisfatório de correção das amostras.

3.3.1. O interpolador LSAR

Considere-se um bloco de amostras $x[n]$, que contenha N amostras. O processo de interpolação é iniciado a partir da equação base do modelo AR, mostrada na Equação 3.1. Para facilitar a execução dos cálculos computacionais deve-se representá-la na forma matricial. A equação do modelo AR:

$$x[n] = \sum_{i=1}^P a_i x[n-i] + e[n] \quad (3.27)$$

É escrita para o vetor de amostras \mathbf{X}_1 , como na Equação 3.28:

$$\mathbf{X}_1 = \mathbf{G}\mathbf{a} + \mathbf{e} \quad (3.28)$$

A Equação 3.28, como observado na Equação 3.12 (visto na Seção 3.1), pode ser reescrita como na Equação 3.26:

$$\mathbf{e} = \mathbf{A}\mathbf{X} \quad (3.29)$$

onde \mathbf{e} é o vetor com os valores do erro de predição e \mathbf{X} é o vetor de amostras. Novamente, \mathbf{A} é uma matriz que vem do vetor de parâmetros \mathbf{a} da Equação 3.6 (visto na Seção 3.1) e é da forma da Equação 3.30:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -a_p & \cdots & -a_1 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & -a_p & \cdots & -a_1 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \cdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & -a_p & \cdots & -a_1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

Agora suponha-se que uma quantidade M de amostras seja corrompida em um bloco e essa corrupção comece a partir da amostra L . Para a visualização deste exemplo tem-se a Figura 3.20:



Figura 3.20 – Diagrama representativo do bloco de amostras a ser corrigido.

O valor de L deve ser maior do que $P+1$ e menor do que $N-M$, para que o processo de interpolação funcione corretamente.

O vetor de amostras \mathbf{X} da Equação 3.29 é então dividido em dois vetores: um vetor apenas com amostras corrompidas, chamado de \mathbf{x}_c , e outro vetor, apenas com amostras não corrompidas, chamado de \mathbf{x}_n . Esse, por sua vez, é dividido em duas partes, uma antes e outra depois do distúrbio. Entenda-se \mathbf{x}_{an} como o vetor de amostras não corrompidas antes do distúrbio e \mathbf{x}_{dn} como o vetor de amostras não corrompidas depois do distúrbio. Um diagrama representativo deste processo de divisão pode ser visualizado na Figura 3.21:

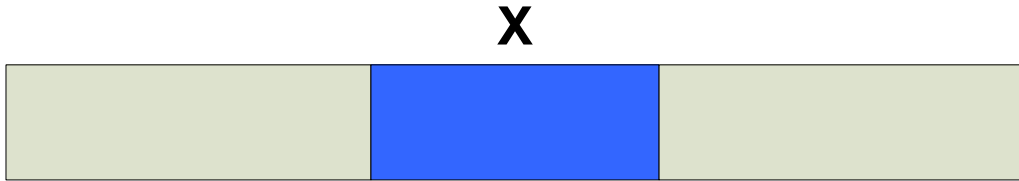


Figura 3.21 – Diagrama representativo dos vetores antes, durante e depois do distúrbio.

Vista a abstração de **X** da Figura 3.21 pode-se representá-la na forma matricial. Logo, **X** é reescrito como na Equação 3.31:

$$\mathbf{X} = [\mathbf{x}_{an} \quad \mathbf{x}_c \quad \mathbf{x}_{dn}]^T \quad (3.31)$$

Substituindo-se a Equação 3.31 na Equação 3.29 tem-se um **e** como na Equação 3.32. A notação utilizada para a matriz **A** é semelhante à usada na Equação 3.31. **A_{an}** representa a matriz **A** com apenas as colunas correspondentes a **x_{an}**. **A_{dn}** expressa a matriz **A** com apenas as colunas correspondentes a **x_{dn}**:

$$\mathbf{e} = [\mathbf{A}_{an} \quad \mathbf{A}_c \quad \mathbf{A}_{dn}] \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{an} \\ \mathbf{x}_c \\ \mathbf{x}_{dn} \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

Ao efetuar a multiplicação vetorial existente na Equação 3.32 tem-se que:

$$\mathbf{e} = \mathbf{A}_{an}\mathbf{x}_{an} + \mathbf{A}_c\mathbf{x}_c + \mathbf{A}_{dn}\mathbf{x}_{dn} \quad (3.33)$$

A Equação 3.33 pode ser agrupada (adicionada) novamente em função das amostras corrompidas e das amostras não corrompidas. Logo, as parcelas **A_{an}x_{an}** e **A_{dn}x_{dn}** serão adicionadas, uma vez que ambas pertencem ao mesmo conjunto de amostras, que é o conjunto de amostras não corrompidas. O resultado está desenvolvido na Equação 3.34, onde **A_n** é a matriz que representa a matriz dos parâmetros das amostras não corrompidas e **x_n** o vetor apenas dos valores das amostras não corrompidas:

$$\mathbf{A}_{an}\mathbf{x}_{an} + \mathbf{A}_{dn}\mathbf{x}_{dn} = \mathbf{A}_n\mathbf{x}_n \quad (3.34)$$

Vista a adição da Equação 3.34, pode-se resumir a Equação 3.33 como na Equação 3.35:

$$\mathbf{e} = \mathbf{A}_c \mathbf{x}_c + \mathbf{A}_n \mathbf{x}_n \quad (3.35)$$

Como visto na Subseção 3.1.2, a técnica dos mínimos quadrados fornece um meio para se encontrar uma curva que melhor se ajuste aos pontos dispersos em um plano. Dessa forma, para se corrigir o ruído impulsivo pela técnica auto-regressiva dos mínimos quadrados deve-se achar valores do vetor corrompido \mathbf{x}_c que minimizem o valor do quadrado do vetor de erro \mathbf{e} , o qual assume valores muito altos nas regiões onde se encontra o distúrbio. Minimizando-se esse valor diminui-se a diferença entre o distúrbio e a parte do sinal que mais lhe está próxima, fazendo com que a amplitude do estalo se atenue e tenda a se assemelhar às partes do sinal que lhe estão adjacentes. Isto pode ser mais bem visualizado na Figura 3.22:

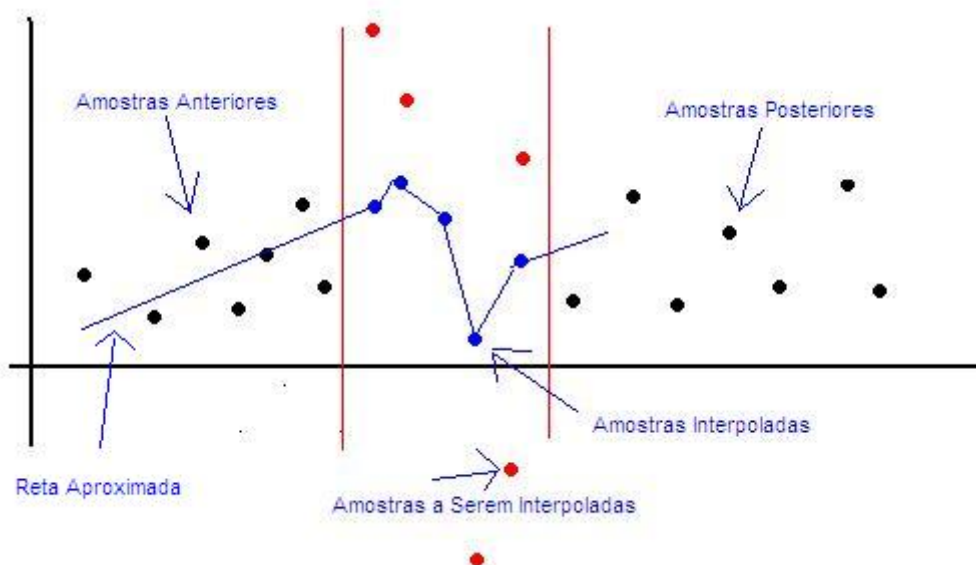


Figura 3.22 – Esquema de interpolação auto-regressiva pelo método dos mínimos quadrados.

Calcula-se, então, a soma quadrática de \mathbf{e} , de forma a atender à técnica dos mínimos quadrados. Esta soma será denotada por \mathbf{E} e é feita de acordo com a Equação 3.36 (GODSILL, 1998, p. 106):

$$\mathbf{E} = \sum_{n=P+1}^N e[n]^2 \quad (3.36)$$

Para se achar o vetor \mathbf{x}_c deve-se expandir e diferenciar a equação 3.36. Derivando-a com relação à \mathbf{x}_c , tem-se:

$$\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial \mathbf{x}_c} = 2 \left(e[P+1] \frac{\partial e[P+1]}{\partial \mathbf{x}_c} + \dots + e[N] \frac{\partial e[N]}{\partial \mathbf{x}_c} \right) \quad (3.37)$$

Representa-se a Equação 3.37 matricialmente, separando as derivadas dos elementos de \mathbf{e} :

$$\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial \mathbf{x}_c} = 2 \begin{bmatrix} e[P+1] & e[P+2] & \dots & e[N] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial e[P+1]}{\partial \mathbf{x}_c} \\ \frac{\partial e[P+2]}{\partial \mathbf{x}_c} \\ \vdots \\ \frac{\partial e[N]}{\partial \mathbf{x}_c} \end{bmatrix} \quad (3.38)$$

Retira-se da matriz coluna o termo que expressa a derivada:

$$\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial \mathbf{x}_c} = 2 \begin{bmatrix} e[P+1] & e[P+2] & \dots & e[N] \end{bmatrix} \frac{\partial}{\partial \mathbf{x}_c} \begin{bmatrix} e[P+1] \\ e[P+2] \\ \vdots \\ e[N] \end{bmatrix} \quad (3.39)$$

A matriz linha da Equação 3.39 é a transposta de \mathbf{e} . A matriz coluna, por sua vez, é o próprio \mathbf{e} . Logo, substituindo por \mathbf{e}^T e \mathbf{e} :

$$\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial \mathbf{x}_c} = 2 \mathbf{e}^T \frac{\partial \mathbf{e}}{\partial \mathbf{x}_c} \quad (3.40)$$

Substituindo-se o vetor \mathbf{e} da Equação 3.40 pela expressão da Equação 3.35 tem-se:

$$\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial \mathbf{x}_c} = 2 [\mathbf{A}_c \mathbf{x}_c + \mathbf{A}_n \mathbf{x}_n]^T \frac{\partial [\mathbf{A}_c \mathbf{x}_c + \mathbf{A}_n \mathbf{x}_n]}{\partial \mathbf{x}_c} \quad (3.41)$$

Derivando a Equação 3.41:

$$2[\mathbf{A}_c \mathbf{x}_c + \mathbf{A}_n \mathbf{x}_n]^T \mathbf{A}_c = 0 \quad (3.42)$$

Uma das propriedades das matrizes diz que a transposta de uma soma de duas matrizes é a soma das transpostas. Logo:

$$2[(\mathbf{A}_c \mathbf{x}_c)^T + (\mathbf{A}_n \mathbf{x}_n)^T] \mathbf{A}_c = 0 \quad (3.43)$$

Uma outra propriedade diz que a transposta de uma multiplicação de matrizes é a transposta das matrizes, com suas posições permutadas:

$$2[\mathbf{x}_c^T \mathbf{A}_c^T + \mathbf{x}_n^T \mathbf{A}_n^T] \mathbf{A}_c = 0 \quad (3.44)$$

Simplificando por 2 e aplicando-se a propriedade distributiva na Equação 3.44:

$$\mathbf{x}_c^T \mathbf{A}_c^T \mathbf{A}_c + \mathbf{x}_n^T \mathbf{A}_n^T \mathbf{A}_c = 0 \quad (3.45)$$

Isolando-se a parcela que contém \mathbf{x}_c :

$$\mathbf{x}_c^T \mathbf{A}_c^T \mathbf{A}_c = -\mathbf{x}_n^T \mathbf{A}_n^T \mathbf{A}_c \quad (3.46)$$

Multiplicam-se, pela direita, ambos os membros pela inversa de $\mathbf{A}_c^T \mathbf{A}_c$, ou seja, $(\mathbf{A}_c^T \mathbf{A}_c)^{-1}$, a fim de se obter \mathbf{x}_c :

$$\mathbf{x}_c^T = -\mathbf{x}_n^T \mathbf{A}_n^T \mathbf{A}_c (\mathbf{A}_c^T \mathbf{A}_c)^{-1} \quad (3.47)$$

Entretanto, \mathbf{x}_c está na sua forma transposta. Para sanar este problema calcula-se a transposta da transposta, que é a própria matriz:

$$\mathbf{x}_c = \left[-\mathbf{x}_n^T \mathbf{A}_n^T \mathbf{A}_c (\mathbf{A}_c^T \mathbf{A}_c)^{-1} \right]^T \quad (3.48)$$

Aplicando novamente a propriedade da transposta de uma multiplicação:

$$\mathbf{x}_c = \left[(\mathbf{A}_c^T \mathbf{A}_c)^{-1} \right]^T \left[-\mathbf{x}_n^T \mathbf{A}_n^T \mathbf{A}_c \right]^T \quad (3.49)$$

$$\mathbf{x}_c = \left[(\mathbf{A}_c^T \mathbf{A}_c)^{-1} \right]^T \mathbf{A}_c^T (-\mathbf{x}_n^T \mathbf{A}_n^T)^T \quad (3.50)$$

$$\mathbf{x}_c = \left[(\mathbf{A}_c^T \mathbf{A}_c)^{-1} \right]^T \mathbf{A}_c^T (\mathbf{A}_n^T)^T [(-\mathbf{x}_n)^T]^T \quad (3.51)$$

Aplicando-se novamente a transposta da transposta:

$$\mathbf{x}_c = \left[(\mathbf{A}_c^T \mathbf{A}_c)^{-1} \right]^T \mathbf{A}_c^T \mathbf{A}_n (-\mathbf{x}_n) \quad (3.52)$$

A transposta da inversa, por sua vez, é a inversa da transposta. Logo:

$$\mathbf{x}_c = \left[(\mathbf{A}_c^T \mathbf{A}_c)^T \right]^{-1} \mathbf{A}_c^T \mathbf{A}_n (-\mathbf{x}_n) \quad (3.53)$$

E mais uma vez aplica-se a propriedade da transposta de uma multiplicação, seguido pela transposta da transposta:

$$\mathbf{x}_c = \left[\mathbf{A}_c^T (\mathbf{A}_c^T)^T \right]^{-1} \mathbf{A}_c^T \mathbf{A}_n (-\mathbf{x}_n) \quad (3.54)$$

$$\mathbf{x}_c = (\mathbf{A}_c^T \mathbf{A}_c)^{-1} \mathbf{A}_c^T \mathbf{A}_n (-\mathbf{x}_n) \quad (3.55)$$

Rearranjando a Equação 3.55:

$$\mathbf{x}_c = -(\mathbf{A}_c^T \mathbf{A}_c)^{-1} \mathbf{A}_c^T \mathbf{A}_n \mathbf{x}_n \quad (3.56)$$

A Equação 3.56 fornece os valores do vetor corrompido \mathbf{x}_c que satisfazem a técnica da interpolação auto-regressiva pelos mínimos quadrados.

Um exemplo de um sinal corrompido e seu respectivo sinal interpolado na região afetada pelo estalo pode ser visto na Figura 3.23:

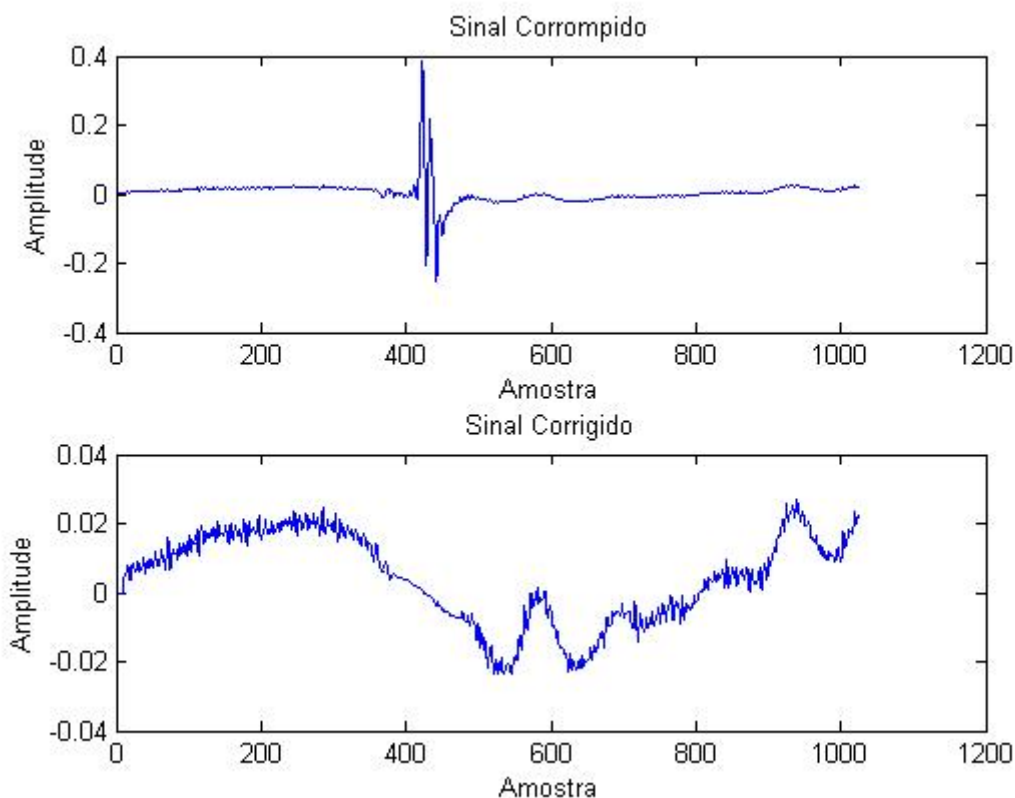


Figura 3.23 – Sinal Corrompido e Sinal Corrigido.

3.3.2. Características e recomendações

Recomenda-se que o processo de interpolação seja feito iterativamente, ou seja, repetido algumas vezes. Deve-se, portanto, especificar um número fixo de iterações para cada bloco do sinal. Este número é determinado experimentalmente, dado o estado do problema em relação à música que se quer restaurar. Na teoria, quanto maior a diversidade de estalos encontrados maior deverá ser o número de iterações. Todavia, este parâmetro de iteração pode ou não ser algo que ajudará no processo de correção, sendo necessária a utilização de testes para a devida comprovação.

Uma observação a ser feita diz respeito às amostras corrompidas que não foram detectadas. Uma vez que o algoritmo de detecção não reconheça aquela região como pertencente a um estalo não haverá como corrigi-la utilizando-se os mesmos parâmetros (mesmo limiar de detecção, mesma ordem do modelo e assim por diante). Conseqüentemente, o conjunto de amostras relativo àquele estalo permanecerá intacto até segundo ajuste.

Um exemplo de como um estalo não detectado permanece no bloco de amostras pode ser visto na Figura 3.24:

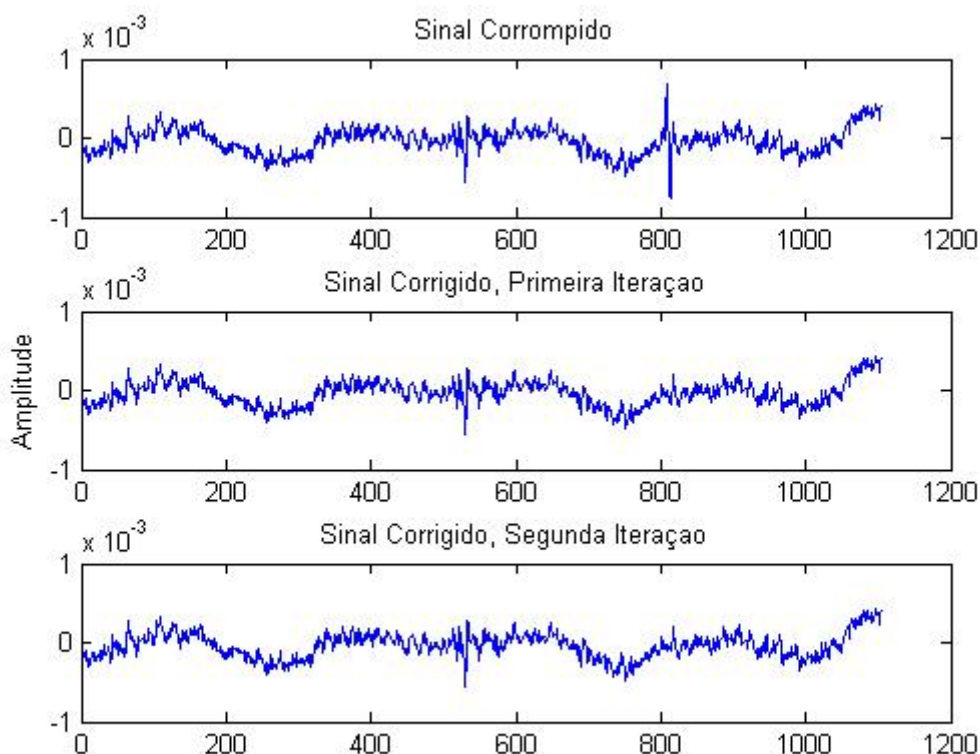


Figura 3.24 – Sinal Corrompido e Sinal Corrigido, Primeira e Segunda Iterações.

Nota-se na Figura 3.24 que o estalo localizado ao centro do bloco de amostras não foi detectado, e acaba por permanecer do jeito que ele se encontra.

Para tentar solucionar este problema deve-se pensar em um ajuste mais elaborado com relação aos parâmetros do algoritmo de detecção, alterando valores como a ordem do modelo, realizando uma redução no valor do parâmetro K de detecção ou até mesmo aumentando o número de amostras consideradas corrompidas adjacentes ao estalo. Tais proposições podem ajudar na detecção, porém o algoritmo de interpolação possui estreita ligação com o método de detecção, fazendo com que sua dependência possa afetar negativamente os resultados obtidos.

O objetivo de se utilizar um número fixo de iterações é para que o processo de correção seja suficiente para que o erro de predição $e[n]$ resultante de cada iteração diminua gradativamente e fique entre os valores estabelecidos pelo limiar. Dessa forma, a necessidade de se efetuar iterações fica mais clara para

onde os estalos estão sendo corrigidos. Para alguns tipos de estalos, uma única iteração já pode ser suficiente. Já para outros, é necessário talvez mais de três ou quatro iterações para se obter um resultado satisfatório.

Mais detalhes a respeito do comportamento da interpolação serão mostrados no Capítulo 4 deste trabalho, que corresponde à parte da implementação do processo de restauração.

Visto todo o processo teórico de restauração ao longo deste capítulo, parte-se para a abordagem prática, presente no Capítulo 4.

CAPÍTULO 4 – IMPLEMENTAÇÃO

Tendo visto a teoria do processo de restauração parte-se para a etapa de obtenção dos resultados, ou implementação. Essa parte consistiu em construir uma simulação utilizando a teoria vista no Capítulo 3, abordando desde o processo de seleção do modelo AR até os resultados finais obtidos.

4.1. SELEÇÃO DO MODELO AUTO-REGRESSIVO

O modelo AR é uma abordagem de modelagem de sinais amplamente utilizada nos dias de hoje, e possui diversas aplicações, dentre as quais algumas foram citadas na Seção 3.1. O uso deste modelo na representação de sinais de áudio se tornou algo bastante difundido e sua utilização se provou altamente eficaz para a restauração de sinais musicais.

Existem diversas abordagens que complementam o uso do modelo AR para a devida representação do sinal a ser restaurado. Dentre elas existem técnicas que combinam o uso de modelos determinísticos, como o sinusoidal (GODSILL, 1998, p. 115) com o modelo AR, acarretando em melhores resultados quando as técnicas são utilizadas em conjunto. Uma outra variação seria a de se utilizar o modelo AR em conjunto com um modelo determinístico usando *Wavelets*.

A escolha desse modelo em sua forma simples, ou seja, sem combinações com outros métodos, justifica-se em dois aspectos: a redução da carga computacional exigida para o seu funcionamento e a reduzida complexidade no entendimento dos processos de cálculo envolvidos. Atualmente, existem diversas técnicas de restauração que contemplam soluções mais eficientes, porém são mais onerosas em termos computacionais e possuem expressiva complexidade no seu entendimento. Um bom exemplo a ser citado é a correção de estalos utilizando probabilidade Bayesiana (GODSILL, 1998, p. 191). A idéia dessa técnica consiste em detectar e corrigir os distúrbios através do uso de probabilidade condicional e aplicar o método de restauração de uma vez só em todo o sinal, sem a necessidade de dividi-lo em blocos. Entretanto, tal abordagem necessita de uma análise mais aprimorada para ser implementada, efetuando

uma modelagem matemática do comportamento de cada estalo, e uma possível previsão de como o sinal se comportava antes mesmo de ser afetado pelo problema. Em comparação com o método de restauração pelo modelo AR o método de restauração pelo uso de probabilidade Bayesiana demanda maior capacidade de processamento, uma vez que são utilizadas diversas expressões de probabilidade condicional até se obter o resultado da restauração.

Com isso torna-se bastante indicado o uso do modelo AR, que além de ser um método de relativa simplicidade é bastante poderoso e realmente eficiente para o problema de restauração de estalos.

4.2. AJUSTE DOS PARÂMETROS

O modelo AR faz o uso de diversos cálculos para sua execução. Ao selecionar suas configurações deve-se tomar como base experiências de restauração já observadas por profissionais ou autores da área.

De acordo com a Seção 3.1, para o ajuste da ordem do modelo, deve-se previamente escutar a música a ser restaurada e escolher um valor que possa atender satisfatoriamente as variações do sinal e do ruído impulsivo. Por exemplo, para uma música com poucos instrumentos musicais pode-se ter uma ordem de valor baixo, pois não há muita variação de timbres e, portanto, não será necessário utilizar muitos parâmetros para a sua representação. Uma boa sugestão seria utilizar um P com valor 30 ou 40 para esses casos. Já para uma música de *jazz*, onde existem os mais variados instrumentos de sopro, corda, percussão e voz, deve-se estabelecer um valor mais alto, que atenda as diversas variações da forma de onda. Para estes casos é aconselhável ajustar o parâmetro P para valores maiores ou iguais a 60.

A próxima etapa de seleção dos parâmetros diz respeito ao tamanho do bloco que se deve utilizar. Segundo Paulo Esquef (1999, p.5), esta análise deve levar em conta a estacionariedade do sinal. Devem-se escolher blocos de tamanho fixo, variando de 500 a 2000 amostras, para que a média dos valores do bloco se mantenha quase constante e conseqüentemente o conceito de sinal estacionário mantenha-se válido. O valor selecionado neste trabalho foi o de um tamanho de bloco de 1024 amostras, o qual foi inteiramente arbitrário. Esse valor

foi escolhido com o intuito de se manter um valor que fique estabelecido entre os dois limites estipulados.

A seguir escolhe-se o valor de K utilizado para a detecção dos estalos. Esse parâmetro é talvez o de maior importância do processo de restauração, pois para uma restauração satisfatória deve-se achar um K tal que signifique o equilíbrio entre dois aspectos: a não detecção de estalos e a falsa detecção dos mesmos. Autores como Simon Godsill e Paulo Esquef determinam como bons valores para K números reais entre 3 e 5, e afirmam que tais números estabelecem um bom compromisso entre a não detecção e a falsa detecção.

Como visto na Seção 3.2, o valor de K é multiplicado pelo valor da variância do erro de predição (σ_e^2). Esta análise visa achar os valores do erro de predição e que possuam uma maior distância da média das amostras do bloco analisado e que cujos valores ultrapassem o valor de $K\sigma_e^2$, possivelmente identificando algum ruído impulsivo que esteja presente. Para estalos com valores de amplitude altos o erro de predição das amostras correspondentes também assumirá um valor alto, favorecendo a detecção da sua localização. Caso o valor de K seja demasiadamente grande o processo de localização falhará, pois possivelmente não haverá amplitudes do sinal que alcancem valores extremamente altos.

Para se estimar a duração de cada estalo é proposto um recurso adicional, que proporciona um aumento forçado do número de amostras detectadas, como visto na Seção 3.2, para uma detecção mais abrangente da duração dos estalos analisados. Tomando-se como exemplo um K de valor igual a 5 e um P igual a 80 tem-se um exemplo dos passos de detecção em uma música na Figura 4.1:

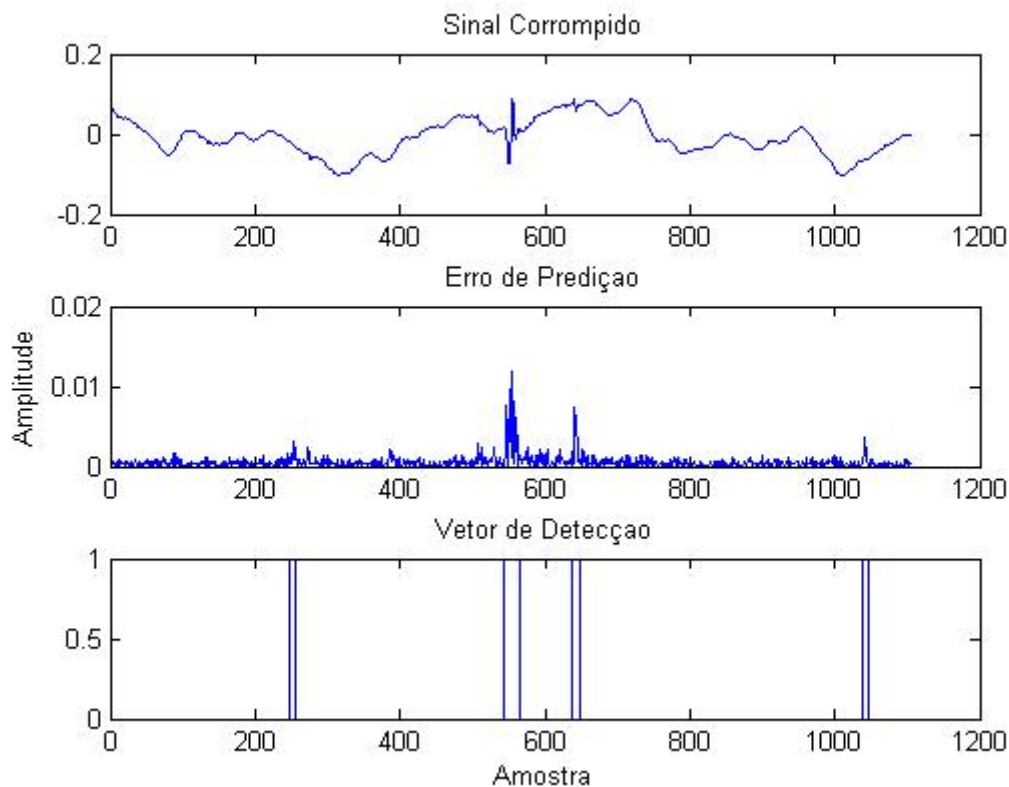


Figura 4.1 – Sinal Corrompido, Erro de Predição e Vetor de Detecção.

Na Figura 4.1 as duas etapas de detecção (Erro de Predição e Vetor Binário de Detecção) conseguiram localizar e determinar a duração do estalo central de forma satisfatória, utilizando um K com valor igual a 5. Empregou-se um acréscimo de até quatro amostras consideradas afetadas entre cada duas amostras detectadas.

O algoritmo de detecção também se comportou de forma semelhante com o pequeno estalo localizado à direita do estalo central. Sua localização e duração foram detectadas com um bom nível de precisão.

Da mesma forma, amostras que claramente não fazem parte de estalos foram acusadas como sendo amostras corrompidas. Portanto, na etapa de correção o algoritmo de interpolação LSAR irá corrigi-las. Todavia, a distorção provocada pela interpolação nestes trechos não provoca alterações consideráveis na audição do sinal, pois o número de amostras limpas detectadas como corrompidas é muito baixo, fazendo com que o algoritmo de interpolação não comprometa a qualidade da restauração. A forma de onda da Figura 4.1 corrigida pode ser visualizada na Figura 4.2:

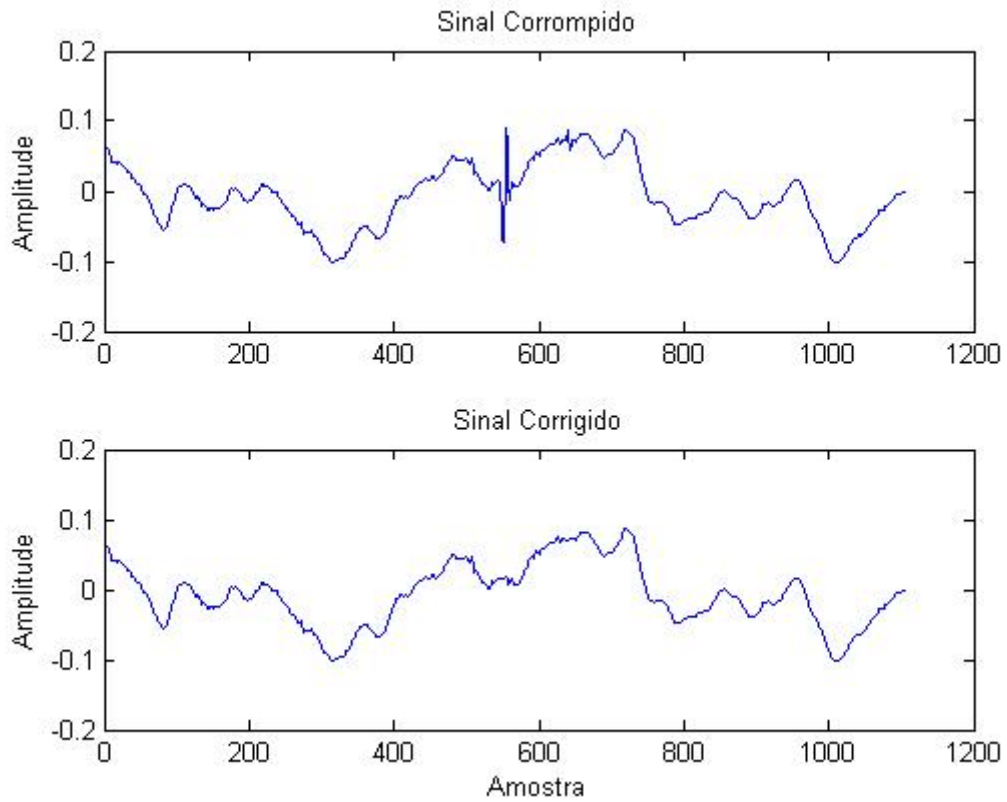


Figura 4.2 – Sinal Corrompido e Sinal Corrigido, K igual a 5.

Tomando como exemplo agora um bloco de amostras com uma boa quantidade de ruído impulsivo, com o mesmo valor de K e P utilizados anteriormente, tem-se a Figura 4.3:

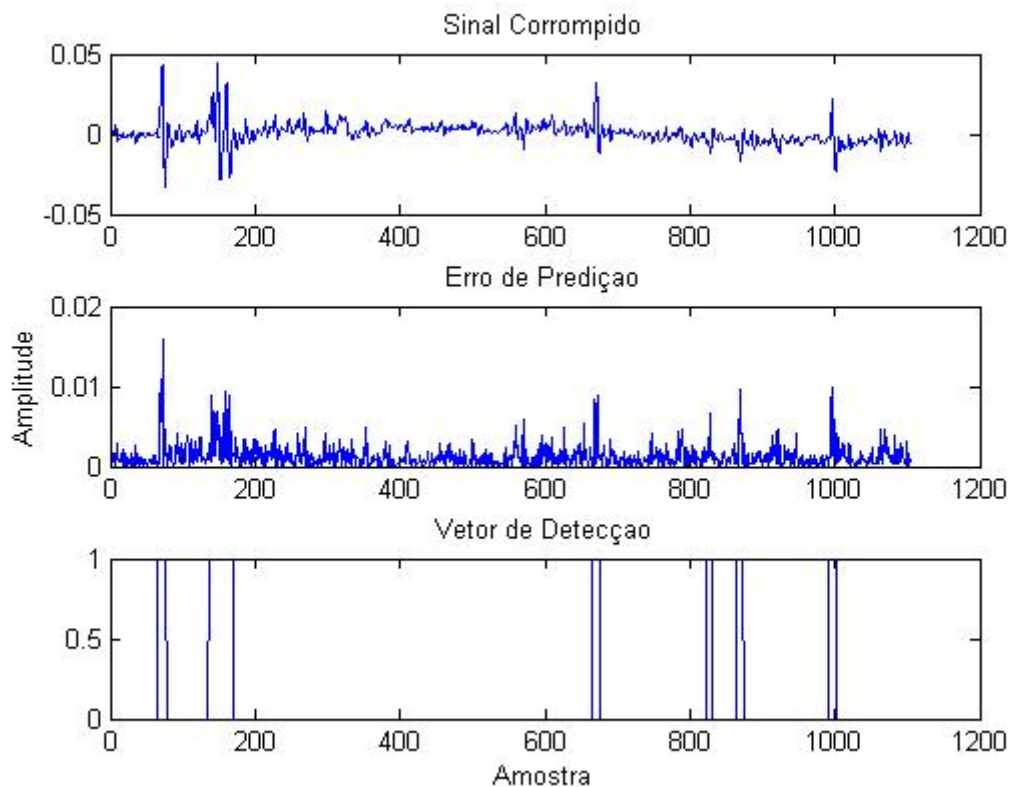


Figura 4.3 – Sinal Corrompido, Erro de Predição e Vetor de Detecção para um bloco de amostras razoavelmente afetado.

O sinal, dessa vez, apresenta um maior índice de imperfeições e para o ouvido humano o ruído impulsivo presente em algumas amostras pode vir a ser um som bastante incômodo. Os vetores do erro de predição e detecção conseguiram obter um bom desempenho, apontando com boa precisão para o local onde cada estalo se encontra e estimando bem a duração de cada um. Novamente, o algoritmo de detecção acusa algumas amostras que não fazem parte de estalos. Após a etapa da correção, o bloco fica de acordo com a Figura 4.4:

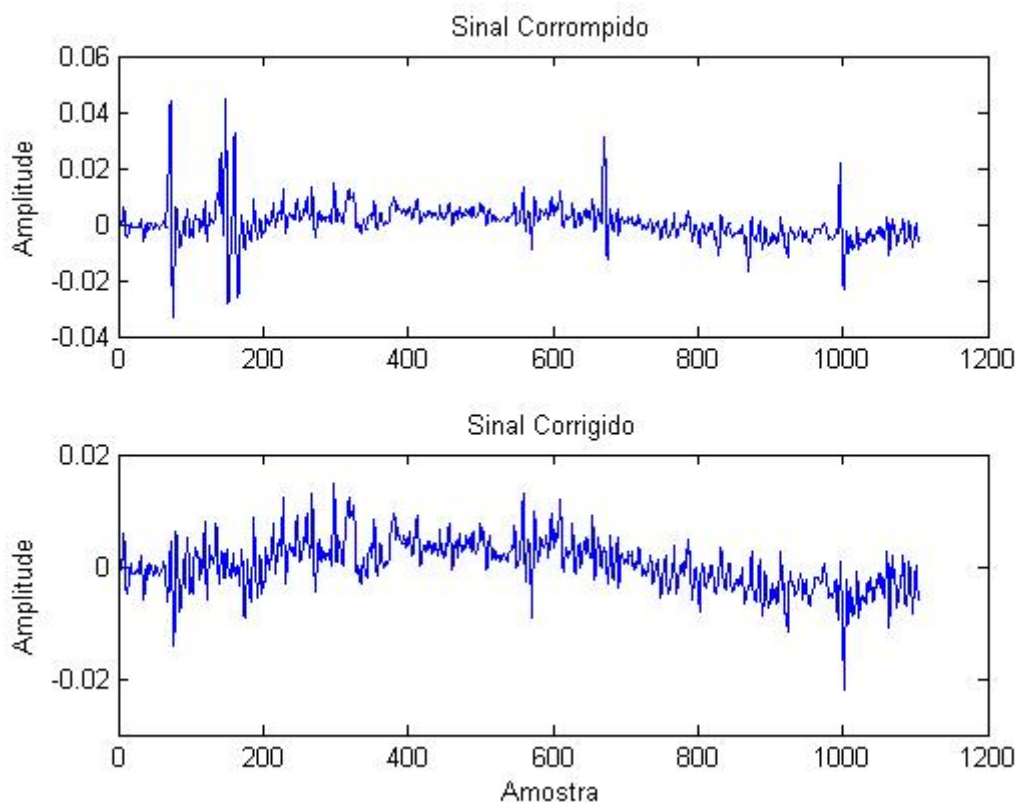


Figura 4.4 – Sinal Corrompido e Sinal Corrigido, bloco mais afetado.

Para esse mesmo bloco conduziu-se uma análise para observar o comportamento do adicional de amostras consideradas corrompidas. Com esse método padroniza-se a detecção pelo uso de amostras extras às que foram detectadas inicialmente. Isto causa um efeito de “engordamento” na detecção da duração do estalo, na esperança de se corrigi-lo por completo, sem deixar resquícios do mesmo após a interpolação. Contudo, corre-se o risco de se interpolar amostras não pertencentes ao estalo, e gerar possíveis distorções audíveis. É possível visualizar o efeito do adicional de amostras consideradas corrompidas na Figura 4.5:

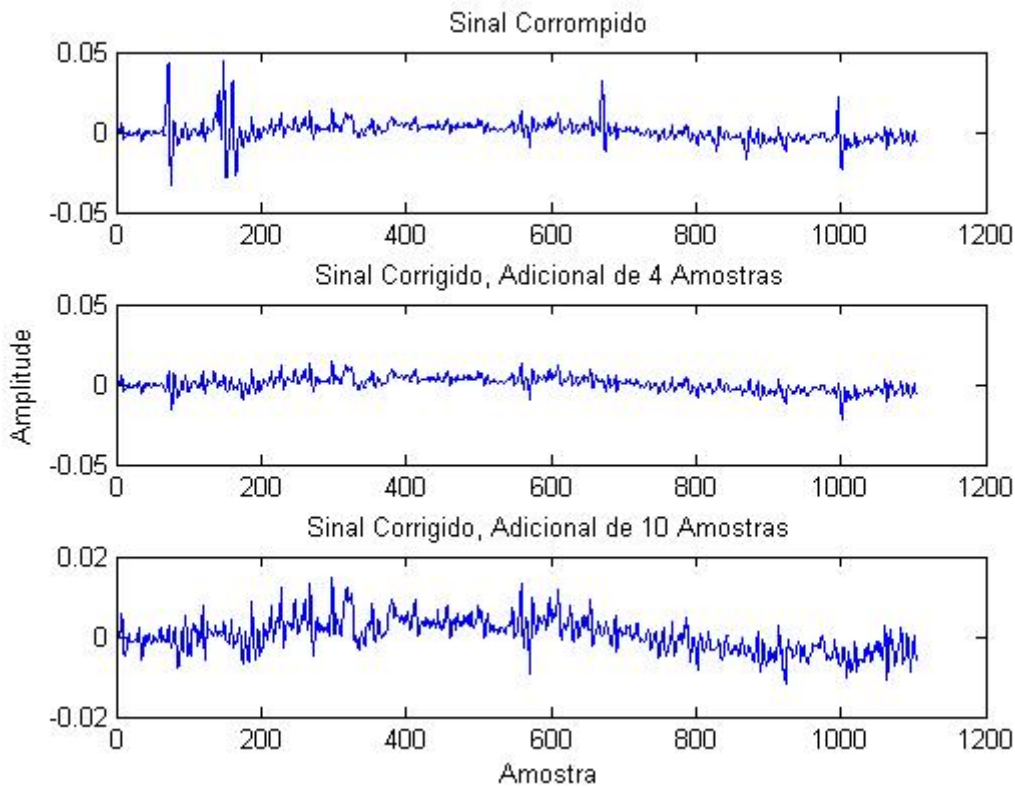


Figura 4.5 – Sinal Corrompido, Corrigido com Adicional de 4 Amostras e 10 Amostras.

Ao comparar-se a segunda e a terceira formas de onda da Figura 4.5 nota-se um pequeno avanço no processo de correção, uma vez que a função de se adicionar amostras no processo de detecção evita que sejam corrigidas amostras detectadas ocasionalmente, que muitas das vezes podem aparecer solitárias no bloco de amostras, descaracterizando o comportamento do estalo em si. Em mídias de LP com nível de corrupção considerado mediano, um estalo possui geralmente entre 20 a 200 amostras de duração. No processo de correção em que se utilizou 4 amostras adicionais a correção se mostrou satisfatória. Porém, no processo de correção utilizando-se 10 amostras nota-se uma maior, mas tímida atenuação do ruído impulsivo presente no sinal corrompido, especialmente perto da milésima amostra, fazendo com que o processo de correção se torne mais eficiente, devido ao fato de se considerar 10 amostras adicionais do que apenas 4.

Terminado o entendimento do funcionamento dos parâmetros, deve-se partir para uma pesquisa empírica baseada em resultados, relacionando cada

valor de cada parâmetro com a música que se quer restaurar, pois cada uma requer uma análise diferenciada.

4.3. MONTAGEM DOS EQUIPAMENTOS

O procedimento a ser feito para a devida gravação do sinal musical de um LP para o computador é bastante simples. Foi-se utilizado um tocador de LP's que, em comparação aos tocadores mais famosos como o MKII da Panasonic, é de desempenho mediano. O toca-discos utilizado foi o DS-30 *Magic Star* da marca Gradiente. Uma foto do mesmo pode ser visualizada na Figura 4.6:



Figura 4.6 – Gradiente DS-30 *Magic Star*.

Fonte: AUDIORAMA, 2003.

Para estabelecer a comunicação entre o som e o computador foi utilizado um cabo RCA padrão macho, com conectores banhados a ouro. O fato de se utilizar apenas um canal (Monoaural) para a gravação se justifica no sentido de que alguns dos LP's utilizados para a gravação das músicas foram gravados originalmente com apenas um canal. Logo, o processamento feito em *Matlab*® será feito utilizando-se apenas um canal.

Um diagrama esquemático da topologia de conexão dos equipamentos é mostrado na Figura 4.7:

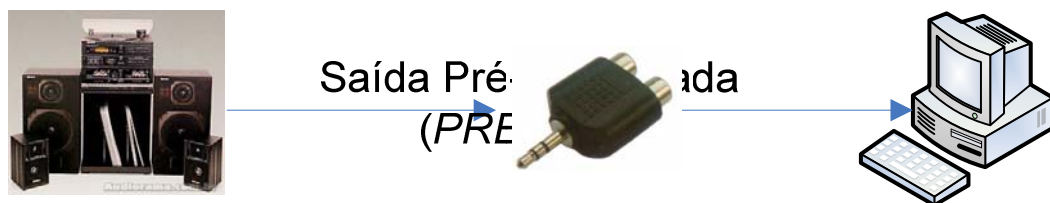


Figura 4.7 – Diagrama esquemático da topologia de conexão dos equipamentos.

O processo de montagem é de simples configuração, bastando que cada componente esteja devidamente conectado. Liga-se uma ponta do cabo RCA à saída *PRE-OUT* do som e liga-se a outra ponta no adaptador P2 Macho – RCA Fêmea, para a devida conversão para o tipo de *plug* que se encontra na placa de som. O adaptador, por sua vez, é conectado à entrada *Line-In* da placa de som, que costumeiramente possui seu encaixe na cor azul claro. A placa de som utilizada neste trabalho foi uma *Creative Audigy 2 ZS*, que permite a gravação e a reprodução de sons utilizando-se uma quantização de 24 bits e amostragem de até 96 kHz, padrões utilizados no formato de DVD.

Ao se encerrar a preparação da parte física do processo parte-se para o processo de gravação das fontes sonoras.

4.4. PROCESSO DE GRAVAÇÃO

O processo de gravação também é algo que não proporciona dificuldades. O *software* selecionado foi o *Sony SoundForge 8.0*, um aplicativo que possui inúmeras funções para uma completa edição de sinais de áudio. Ele é amplamente utilizado em estúdios de gravação. Uma tela da sua interface se encontra na Figura 4.8:

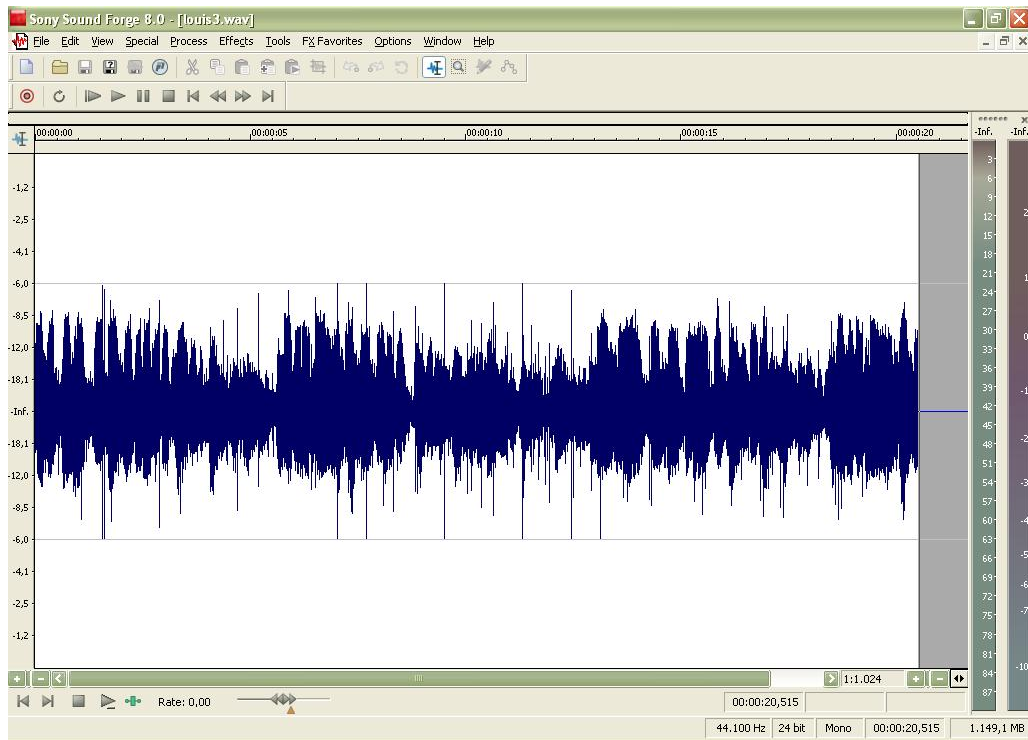


Figura 4.8 – Sony SoundForge.

Para a gravação do sinal do LP seleciona-se a função *Record*. A tela de configuração para gravação oferece vários ajustes, mas apenas algumas mudanças se fazem necessárias. Podem-se modificar opções como: frequência de amostragem, nível de quantização e gravação em Mono ou Estéreo (em 2 canais, esquerdo e direito). Para o processo de gravação deste trabalho a quantização utilizada foi de 16 bits para algumas músicas e 24 bits para outras, ambas utilizando uma frequência de amostragem de 44,1 kHz e a gravação do sinal em Monoaural. A tela de configuração da gravação se encontra na Figura 4.9:

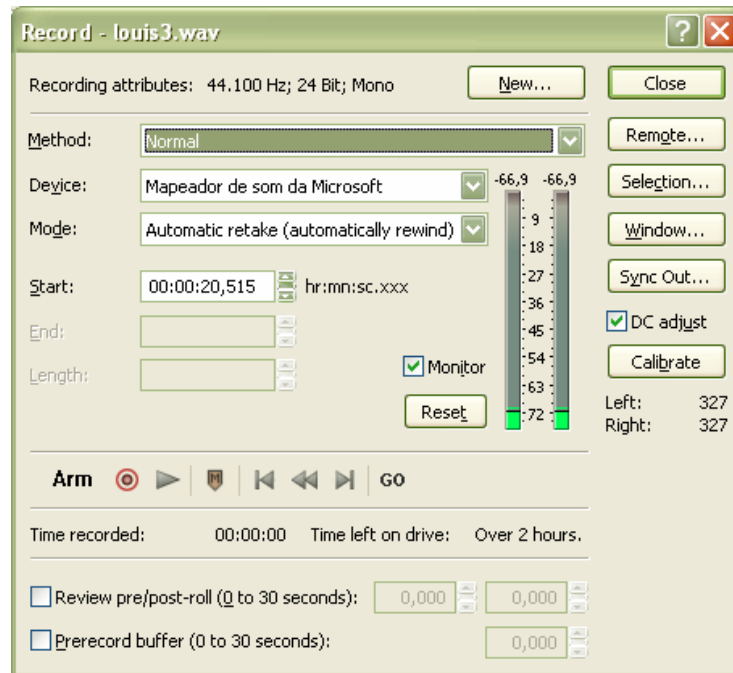


Figura 4.9 – Tela de gravação.

Ao ajustar as opções citadas parte-se para a gravação da fonte, iniciando-se o tocador de LP's do som e a função *Record*, gravando o sinal que se deseja.

Ao término da gravação a forma de onda correspondente ao sinal capturado aparece na tela principal do programa. Ela pode então ser salva em vários formatos. O formato utilizado neste trabalho foi o formato *Wave* utilizando PCM, um formato que não possui compressão.

4.5. MATLAB®

Para a manipulação do sinal musical quantizado foi-se utilizado o *software Matlab®*. Ele é uma ferramenta bastante abrangente, podendo ser utilizado em diversos contextos científicos, como no uso de simulações de engenharia, matemática ou ciências. Seu uso é voltado para a execução de cálculos e métodos numéricos. Na Figura 4.10 pode-se ver a tela principal do *Matlab®*.

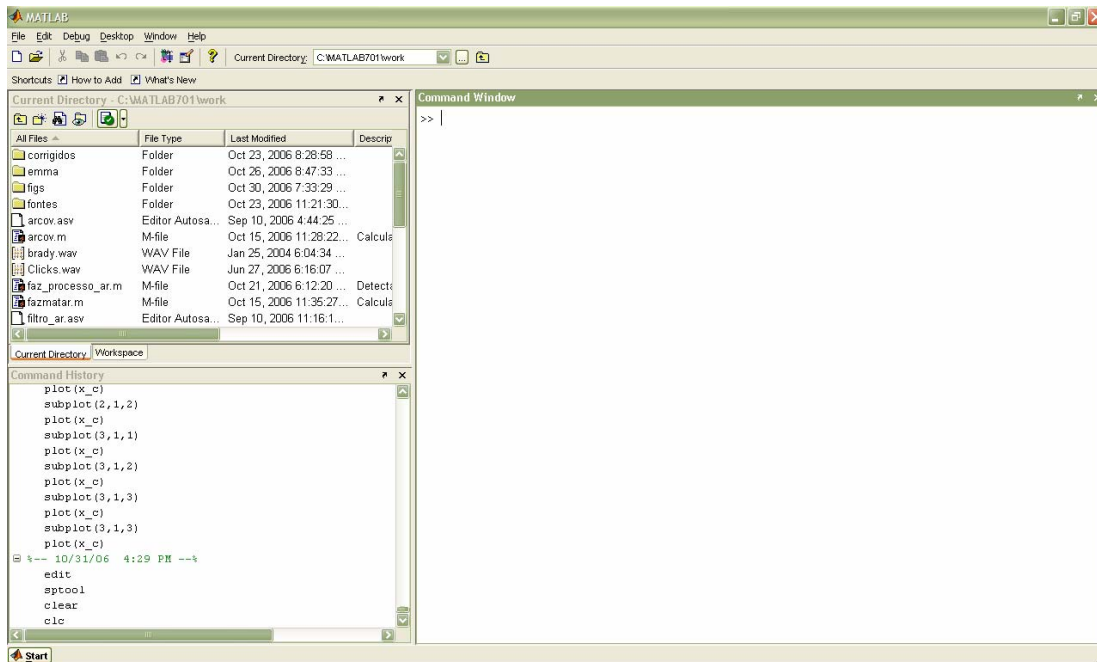


Figura 4.10 – Tela do *Matlab*®.

O funcionamento dessa ferramenta é baseado em uma biblioteca de conjuntos de funções chamadas de *toolboxes* (caixas de ferramentas). Cada *toolbox* está relacionada a um assunto específico, e possui diversas funções voltadas para aquele determinado assunto. Por exemplo, existe uma *toolbox* voltada para a manipulação e tratamento de sinais, chamada de *signal toolbox*.

Qualquer código em *Matlab*® pode ser mais bem desenvolvido/gerenciado com o uso do *Editor*, uma ferramenta interna que possui diversos recursos para o desenvolvimento de rotinas ou funções. Uma tela do *Editor* se encontra na Figura 4.11:

```

1 %Cria modelo AR e efetua calculo do erro de cada amostra (deteccao direta)
2 [som,Fa] = wavread('fontes/bartman.wav');
3 esq = som(:,1);
4 ordem = 61;
5 intervalo = esq(99000:100024);
6 janela = boxcar(length(intervalo));
7 janelado = janela.*intervalo;
8 coeficientes = arule(janelado,60);
9 somatorio = zeros(1,length(intervalo));
10 for (n = 1 : length(intervalo))
11     h = 1;
12     for (i = 1 : length(intervalo))
13         temp = n - i;
14         if (temp > 0)
15             if (h <= ordem)
16                 somatorio(n) = somatorio(n) + (coeficientes(h).*janelado(temp));
17                 h = h + 1;
18             else
19                 end
20             end
21         end
22     end
23 for (t = 1 : length(janelado))
24     erro(t) = janelado(t) - somatorio(t);
25 end
26
27 %Calcula variancia do erro
28 var2 = 1.4826*median(abs(somatorio));
29
30 %Limiar de deteccao
31 k = 7;
32
33 %Cria vetor binário de deteccao direta
34 deteccao = zeros(1,length(somatorio));
35 for(i = 1 : length(somatorio))
36     if(abs(somatorio(i)) > (k * var2))
37         deteccao(i) = 1;

```

Figura 4.11 – Tela do *Editor*.

O *Editor* foi constantemente utilizado neste trabalho, para um desenvolvimento mais organizado das rotinas e funções.

4.6. SIMULAÇÃO

O código da simulação no *Matlab*® está apresentado de forma modularizada, ou seja, está dividido em várias funções específicas para cada parte do processo de restauração, visando a legibilidade e facilidade de depuração dos erros. Para iniciá-lo basta abrir o arquivo inicial no *Editor*. Ele é chamado de *Retira_Clicks.m*, e pode ser conferido no Apêndice A.

Esse código possui todos os ajustes que direcionarão o processo de restauração. A primeira variável, chamada de P , referencia o valor da ordem do modelo AR a ser adotado. Este valor, como explicado na Seção 3.1, é arbitrário e bastante sensível a alterações. Não existe um valor ideal e devem-se analisar os resultados a partir de testes com valores diferentes para a obtenção de um valor que seja adequado para a música que se quer restaurar.

A segunda variável é o tamanho do bloco, chamada de *tam_bloco*. Blocos muito pequenos (como um bloco de 50 amostras) requerem menor poder de processamento e quantidade de memória, pois as matrizes envolvidas terão seus

tamanhos reduzidos. Porém, naturalmente, o tempo de execução da simulação aumentará. Blocos grandes (como uma de 10000 amostras), por sua vez, requerem grande poder de processamento e uma alta quantidade de memória, podendo ocasionar erros de estouro de memória ou erros aleatórios, oriundos de processamento impreciso.

A terceira variável a ser configurada é o parâmetro K . Como explicado na Seção 3.2 deve-se estabelecer um valor inicial, e a partir dele analisar o resultado, observando se ele foi satisfatório para a detecção dos estalos ou não. Caso não seja, propõe-se efetuar testes decrescendo seu valor, para que se possa detectar o maior número de estalos em um mesmo bloco.

A quarta variável a ser especificada é o numero adicional de amostras a serem consideradas corrompidas. Como explicado na Seção 3.2, esta abordagem é proposta no sentido de se abranger ao máximo o número de amostras consideradas afetadas, corrigindo os *clicks* por completo. Novamente, deve-se arbitrá-la em função do estado do sinal musical. Um valor inicial de 4 ou 5 amostras corrompidas é aconselhável. Vale a pena ressaltar que quanto maior o valor do adicional de amostras, maior a quantidade de processamento.

A variável seguinte é o número de iterações do processo de interpolação. Quanto maior o número de iterações, mais aprimorada se tornará a interpolação. Entretanto, este valor não necessariamente implica em melhorias notáveis ao sinal, tanto visualmente quanto sonoramente. O uso de um número alto de iterações também sugere maior carga de processamento.

Por fim, determinam-se o caminho do arquivo *Wave* a ser restaurado na função *wavread* e o local de gravação do arquivo restaurado na função *wavwrite*.

Ao término da configuração dos parâmetros aperta-se a tecla F5 no *Editor* para a execução da rotina de restauração.

A etapa da simulação no *Matlab*® englobou os conceitos envolvidos no Capítulo 3. Um diagrama de fluxo da mesma está na Figura 4.12:

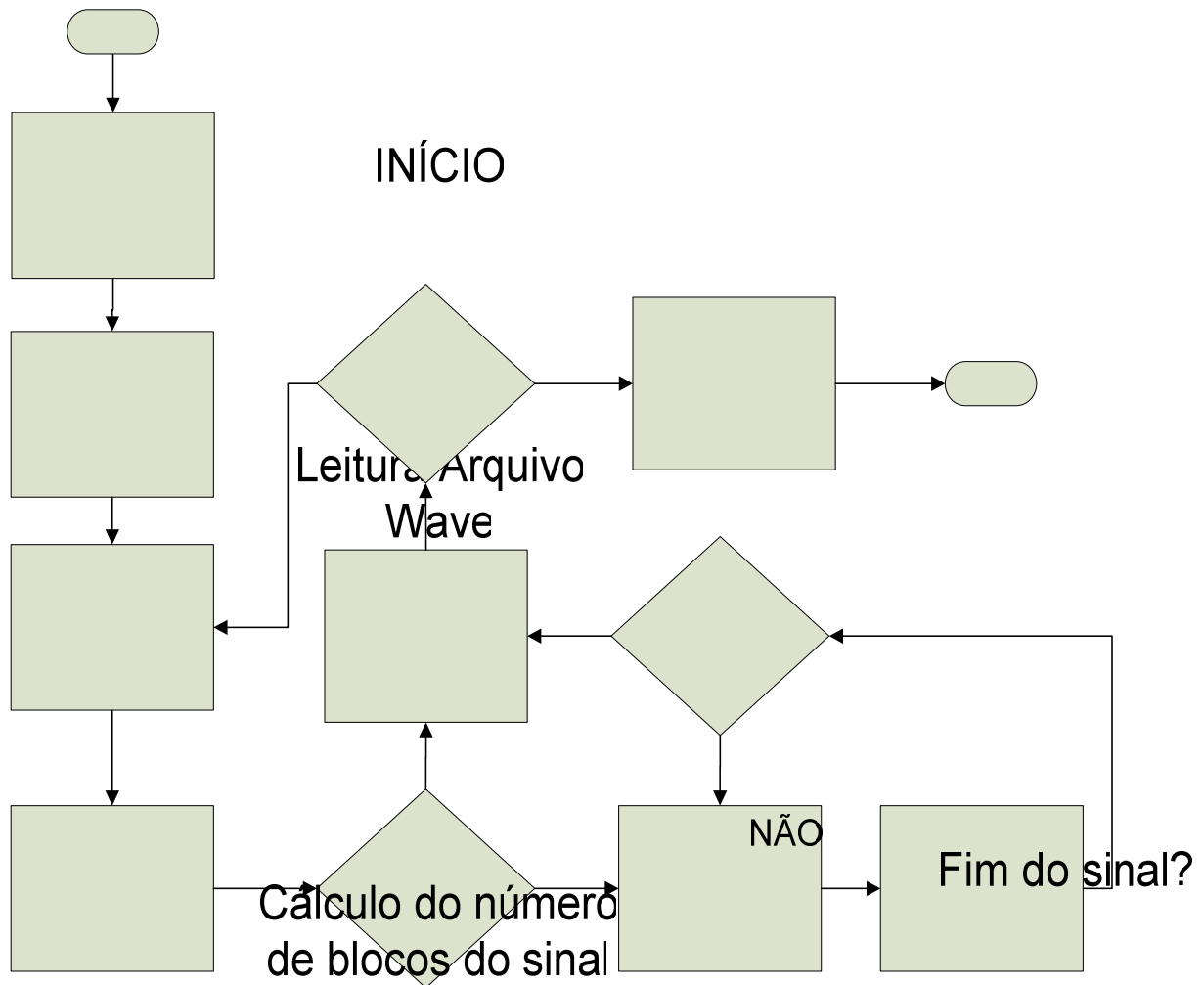


Figura 4.12 – Diagrama de Blocos da Simulação.

O primeiro passo é ler o arquivo *Wave* que se quer restaurar. Para tal propósito é utilizada a função *wavread*. Ela recebe como parâmetro o caminho do arquivo *Wave* a ser lido e retorna um vetor com as amostras do sinal, sua respectiva taxa de amostragem e a frequência de amostragem.

Logo após a chamada da função *wavread* estima-se a quantidade de blocos de amostras a serem utilizados. De acordo com o que foi falado na Seção 4.2, o tamanho do bloco tem de ser fixo. Nesta simulação o valor estabelecido foi de 1024 amostras. O cálculo do número de blocos é dado pelo número de amostras do sinal subtraído pelo dobro do valor de P , e o valor desse resultado de subtração dividido pelo tamanho do bloco. Como visto na Seção 3.2, deve-se

haver amostras anteriores e posteriores a um bloco de amostras, para que a modelagem AR e a interpolação LSAR sejam efetuadas corretamente.

Cálculo do erro de predição para detecção das regiões afetadas

Estalos foram detectados?

Em seguida toma-se o primeiro bloco para análise, sendo modelado de acordo com o modelo AR. São calculados seus parâmetros a_i , vistos na Seção 3.1, e a matriz de auto-regressão G , também vista na Seção 3.1, de acordo com a ordem P que foi escolhida.

Terminada a execução desta rotina passa-se para o início da etapa de detecção de estalos. Ela começa a partir do cálculo do erro de predição e . Este cálculo vislumbra evidenciar a localização e duração de cada estalo. Os valores do vetor de erro e gerado são comparados ao limiar, que determina uma região de detecção. Com base nesta comparação constrói-se um vetor auxiliar (Vetor Binário de Detecção), que indica a localização de cada estalo detectado através de um “chaveamento”: caso a amostra seja acusada como corrompida, o valor do vetor de detecção para aquela amostra recebe 1. Caso contrário, a amostra é considerada limpa e recebe valor 0.

Se o vetor de detecção mostrar sucesso na detecção (qualquer valor 1 que esteja presente) dá-se início à etapa de interpolação. Para tal feito chama-se a função de interpolação, que recebe os seguintes parâmetros: o bloco de amostras a ser interpolado, os parâmetros do modelo, o vetor de detecção e uma quantidade P de amostras imediatamente anteriores ao bloco. O vetor que estima as amostras é então calculado de acordo com a Equação 3.56. Existe a possibilidade de se interpolar novamente o bloco de amostras, re-estimando os parâmetros do modelo, mas dessa vez tendo como base o bloco já corrigido, para uma correção mais eficiente. O número de iterações é pré-determinado, fazendo com que o algoritmo trate de interpolar o sinal novamente e re-estime os parâmetros do modelo.

Ao se encerrar a etapa de correção o algoritmo avança para o próximo bloco. Caso o bloco seja o último do sinal, a simulação se dá por encerrada e a gravação do vetor do sinal corrigido se dá pela função *wavwrite*, que reescreve o arquivo *Wave* com a mesma taxa de amostragem e quantização de quando ele foi lido, mas com o nome especificado.

4.7. TESTES

O contexto da simulação procurou englobar alguns tipos de LP's, variando de trechos com baixo grau de corrupção até trechos que efetivamente impedem uma boa apreciação do conteúdo musical. O computador utilizado para a condução dos testes foi um *Pentium*® M com 1024MB de memória RAM. Essa configuração foi escolhida pensando na expressiva exigência do *Matlab*® em demandar capacidade de processamento e quantidade de memória, para o devido cálculo das operações com matrizes.

Para a primeira análise foi escolhido um trecho de uma música de *rap* do LP *The Simpsons: Sing the Blues*, chamada de *Do the Bartman*. Este trecho contém estalos de localização e duração quase periódicos, pois o arranhão causador dos estalos se encontra perpendicular às ranhuras do disco. Sua composição musical envolve apenas alguns instrumentos, como uma bateria eletrônica, um baixo e um toca-discos para o uso em *scratch*. Tal trecho pode ser visto na Figura 4.13:

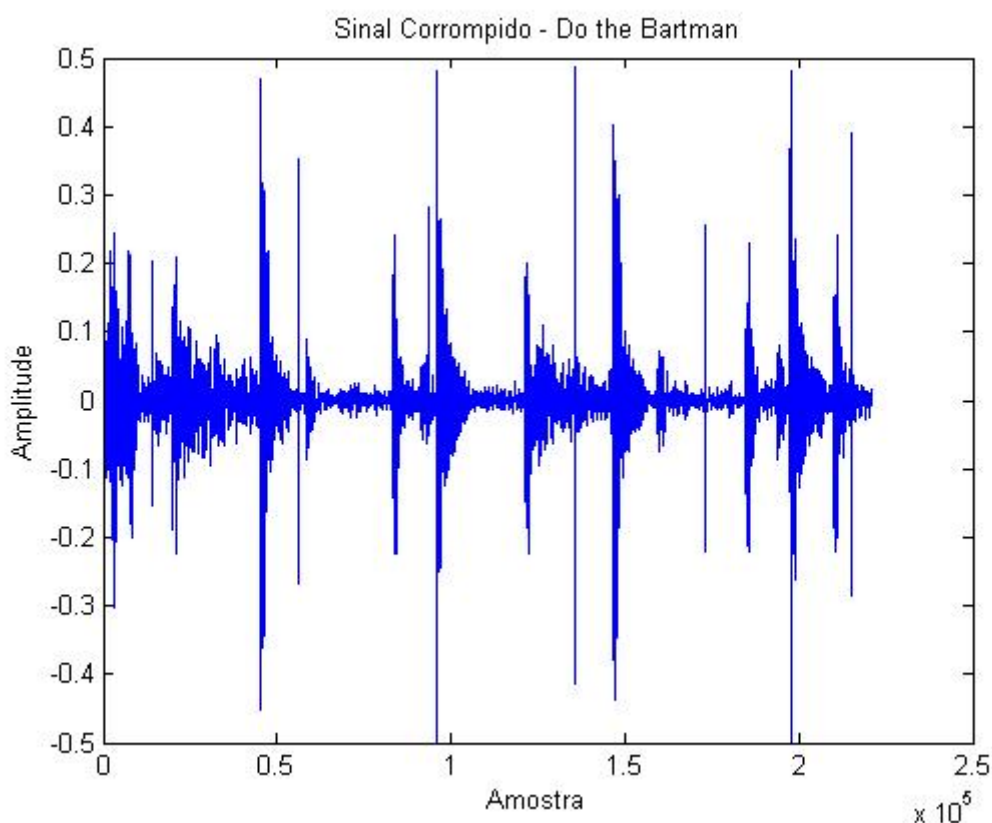


Figura 4.13 – Sinal Corrompido, *Do the Bartman*.

O sinal da Figura 4.13 se encontra visual e sonoramente corrompido. O nível de corrupção do sinal é considerado baixo, ou seja, os estalos não afetam o sinal de forma a comprometer seriamente sua qualidade. A gravação foi feita em 24 bits, com duração de 5 segundos. Foram-se utilizados os seguintes parâmetros: ordem do modelo igual a 60, K igual a 5, 4 amostras adicionais e 3 iterações de interpolação. O tempo de execução da rotina de restauração foi de aproximadamente 3 minutos. O resultado gráfico está na Figura 4.14:

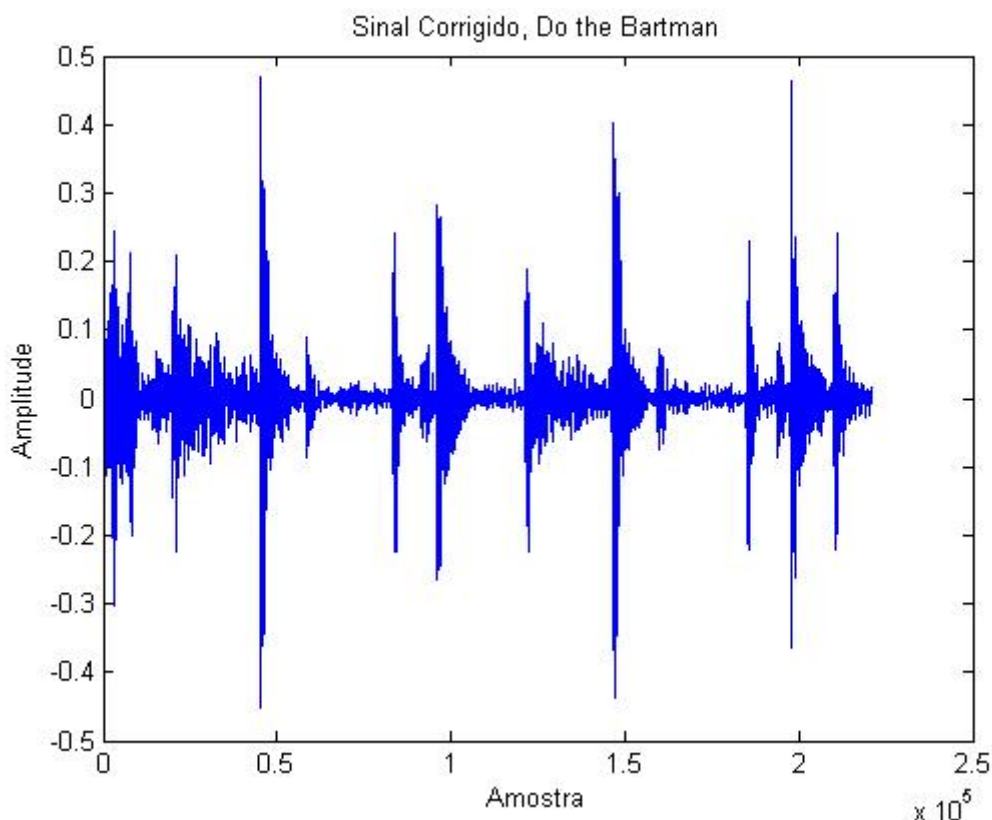


Figura 4.14 – Sinal Corrigido, *Do the Bartman*.

O sinal corrigido apresentou um resultado satisfatório, com boa parte dos estalos sendo suprimidos já na primeira tentativa. Entretanto, alguns estalos permaneceram. Para se tentar suprimi-los, reconfigurou-se o algoritmo com os seguintes parâmetros: ordem igual a 80, K igual a 3, 6 amostras adicionais e 3 iterações. O resultado pode ser visto na Figura 4.15:

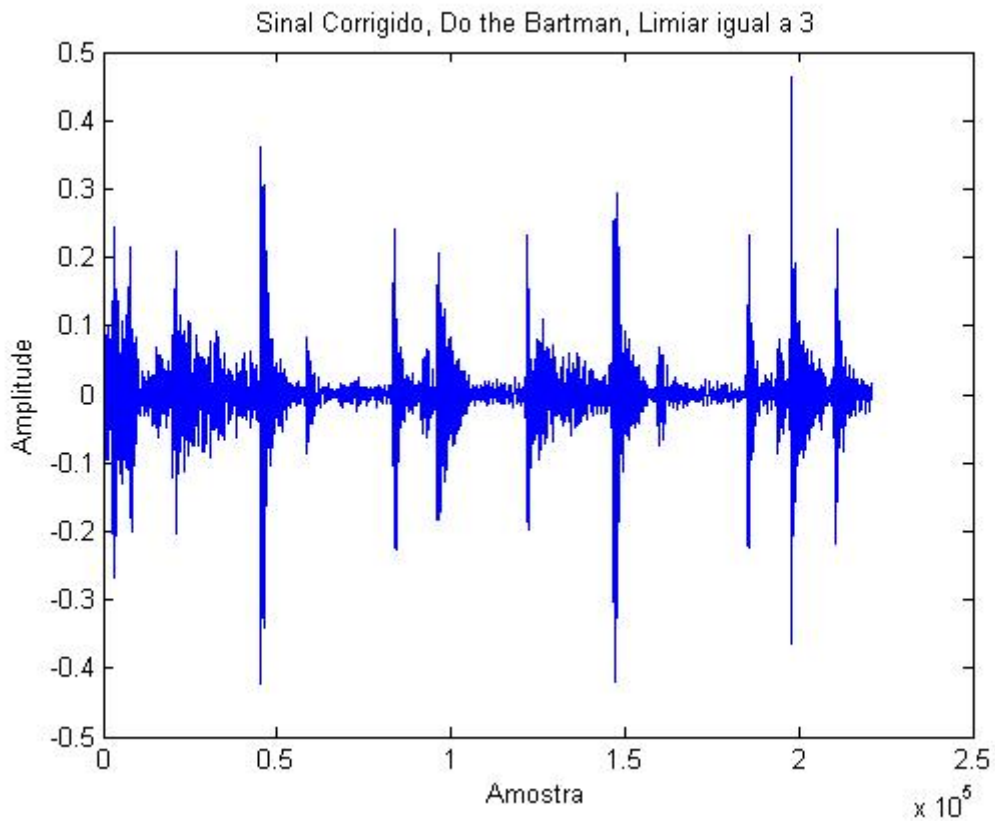


Figura 4.15 – Sinal Corrigido, *Do the Bartman*, K igual a 3.

Nota-se uma tímida melhoria visual. Sonoramente, o ganho notado foi mais expressivo. O tempo de execução da simulação foi de aproximadamente 17 minutos. Na Figura 4.16 pode-se conferir um histograma dos valores de amplitude do sinal antes e após o processo de restauração, evidenciando a queda de amplitude devido à supressão dos estalos:

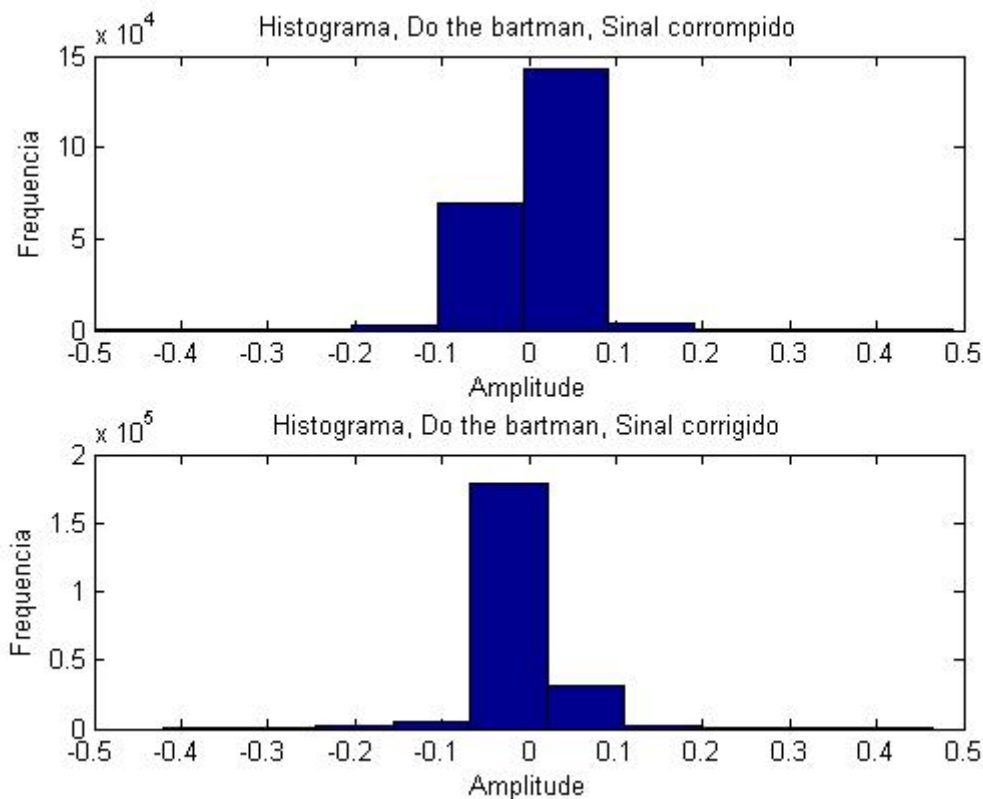


Figura 4.16 – Histograma dos valores de amplitude da música *Do the Bartman*, antes e após a restauração.

Para a segunda análise foi escolhido um trecho de uma música de *rock* da banda K.I.S.S., uma das mais conhecidas do gênero. O trecho gravado tem duração de 10 segundos e foi obtido a partir do início da mídia do LP, a partir do começo da primeira faixa, onde são apresentadas seqüências pausadas de guitarra distorcida, baixo e bateria juntos. A quantização utilizada foi de 16 bits. Ele apresenta um nível moderado de corrupção, a partir de uma análise preliminar pelo ouvido. O trecho da música está representado na Figura 4.17:

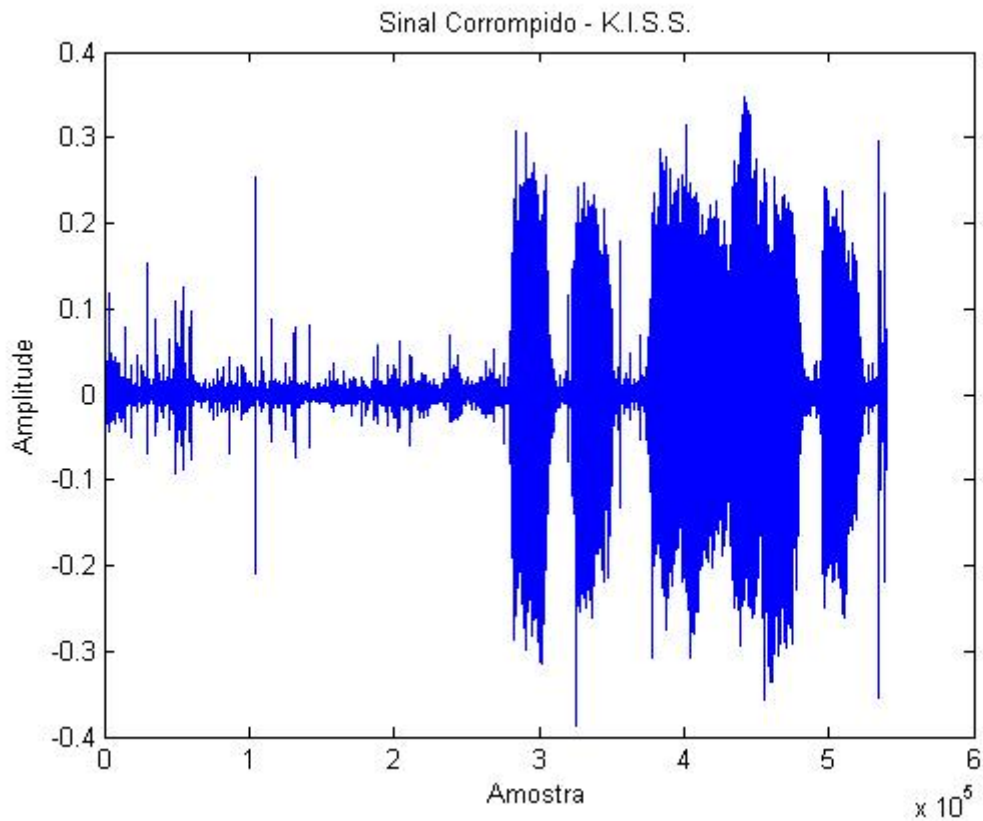


Figura 4.17 – Sinal corrompido, K.I.S.S.

O sinal claramente possui uma ampla variedade de estalos, das mais diversas amplitudes e durações. Quando a música realmente começa (perto da amostra de número 300.000), alguns deles se confundem com o próprio acorde da guitarra, estabelecendo diversos padrões de comportamento. Para este tipo de música foi selecionado o modelo AR com ordem valendo 60, parâmetro K do limiar igual a 5, com um adicional de 4 amostras e 3 iterações de interpolação. O algoritmo levou cerca de 6 minutos para sua correção. O sinal corrigido se encontra na Figura 4.18:

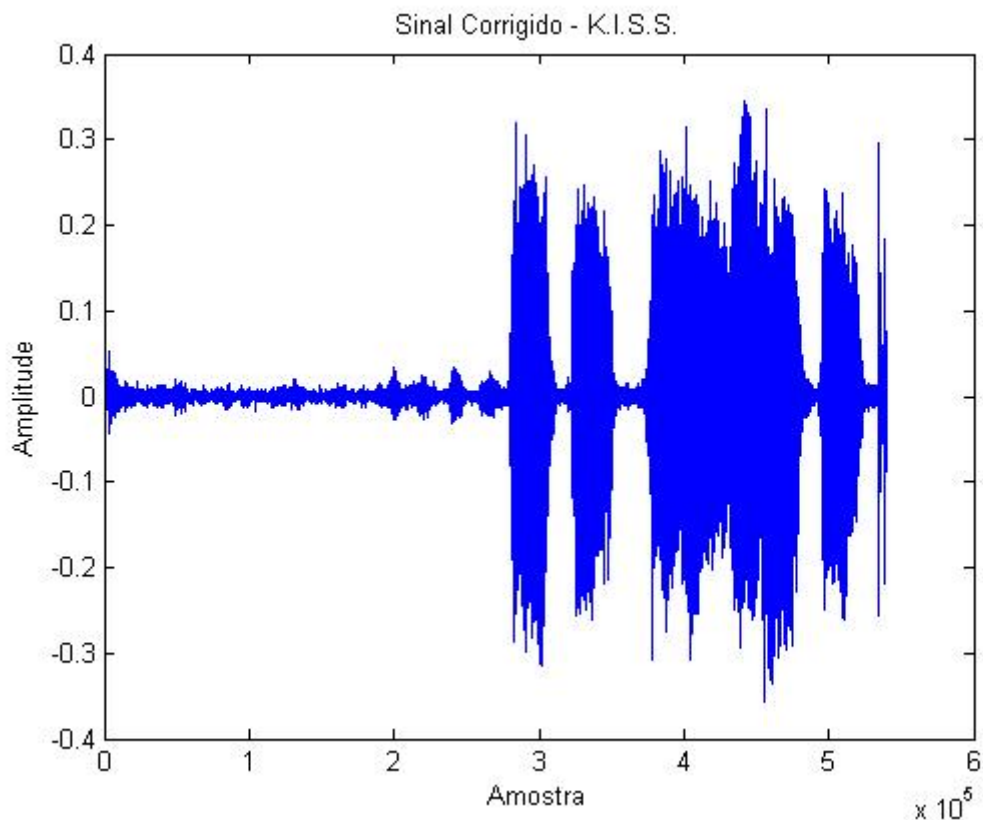


Figura 4.18 – Sinal Corrigido, K.I.S.S.

O resultado obtido é bastante satisfatório, com o algoritmo tendo suprimido grande parte dos estalos em sua configuração inicial. Ao se escutar o som obtido tem-se da mesma forma um resultado de bom nível. Obtém-se uma ótima impressão sobre o desempenho da técnica de restauração utilizando o modelo AR.

Ao observar a primeira tentativa de restauração vê-se que alguns poucos defeitos permanecem. Para tentar suprimi-los diminuiu-se o valor de K para 3, para que alguns estalos de menor amplitude não corrigidos ou corrigidos em parte possam ser satisfatoriamente atenuados. O processamento durou cerca de 12 minutos, pois possivelmente existiram mais amostras detectadas a serem interpoladas. Em se tratando de velocidade de processamento a rotina que consome maior tempo para sua execução é a de detecção. O resultado se encontra na Figura 4.19:

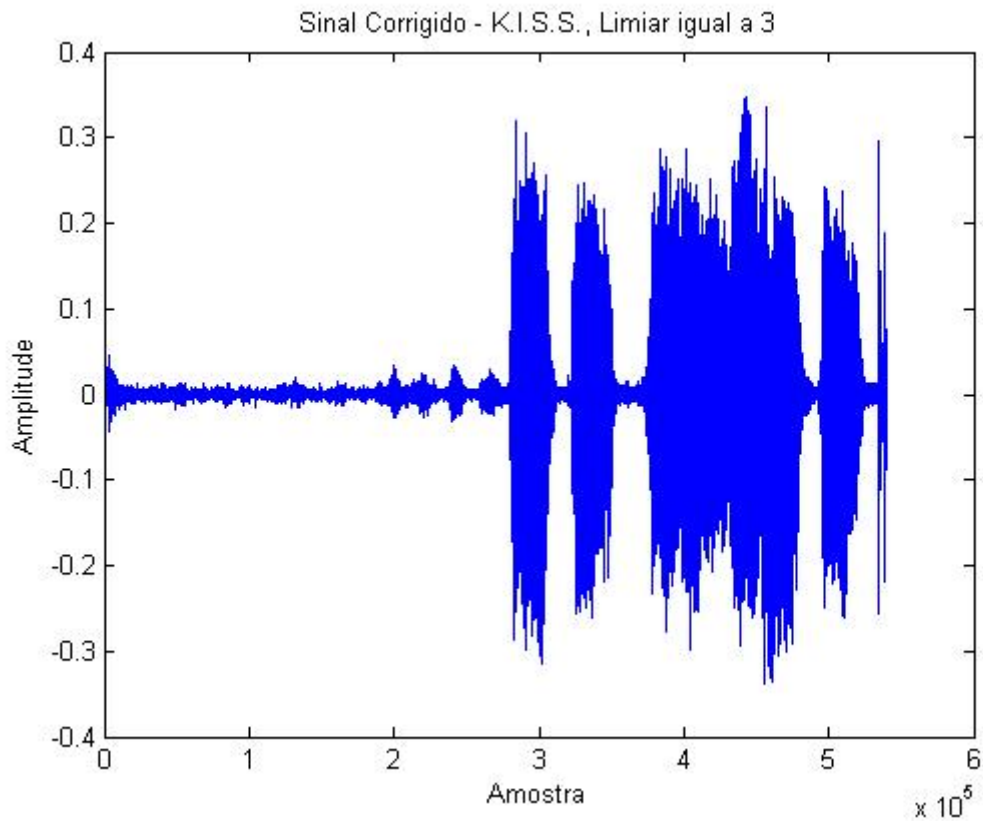


Figura 4.19 – Sinal Corrigido, banda K.I.S.S., K igual a 3.

Nota-se que a alteração deste parâmetro não teve grande influência na segunda tentativa de restauração. Algumas amostras como as encontradas perto da amostra de número 400.000 foram atenuadas, mas nada que justifique a alteração do parâmetro. Isto atesta o limite deste tipo de restauração, que traz bons resultados, mas não é completamente eficaz. Na Figura 4.20 atesta-se, mais uma vez, a queda de amplitude do sinal corrompido:

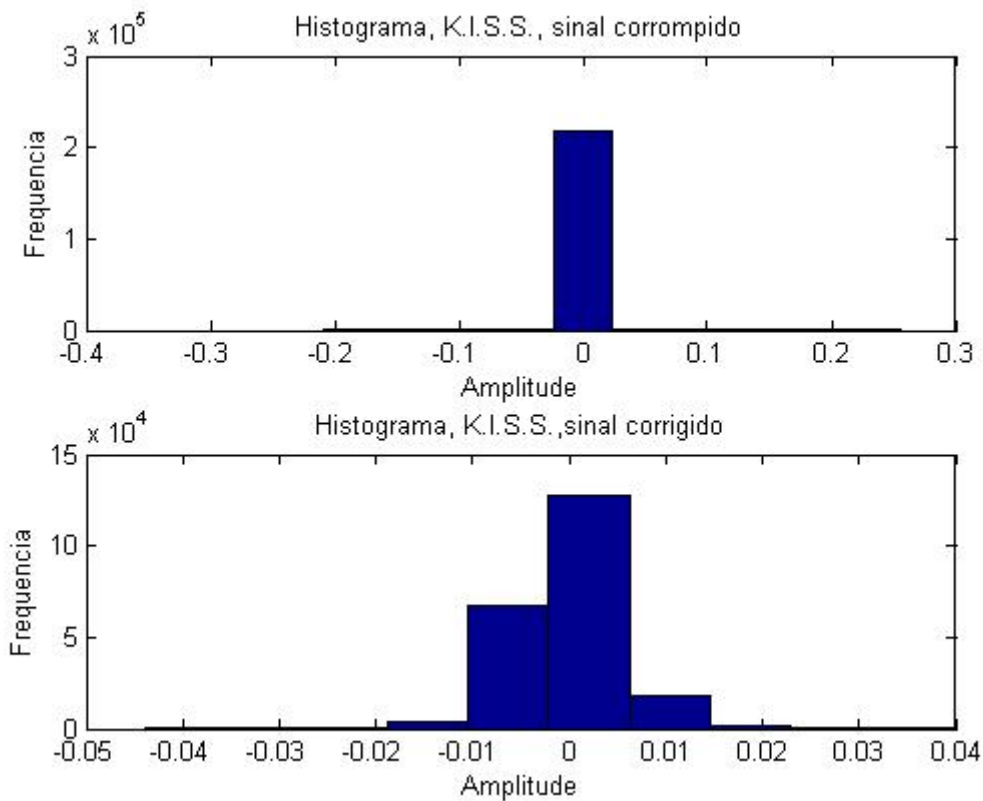


Figura 4.20 – Histograma dos valores de amplitude da música da banda K.I.S.S. antes e após a restauração.

Na segunda análise conduzida retirou-se um trecho de uma música de *jazz* do músico *Louis Armstrong*, um dos maiores instrumentistas de sopro que já existiu. A mídia do LP neste teste se encontra bastante deteriorada, com múltiplos arranhões e imperfeições. O trecho extraído possui um nível mediano de corrupção, mas com uma grande variedade de estalos tanto em amplitude quanto em duração, afetando algumas partes do trecho. A quantização utilizada dessa vez foi de 24 bits e a duração do trecho foi de 0,15 segundos. O sinal se encontra na Figura 4.21:

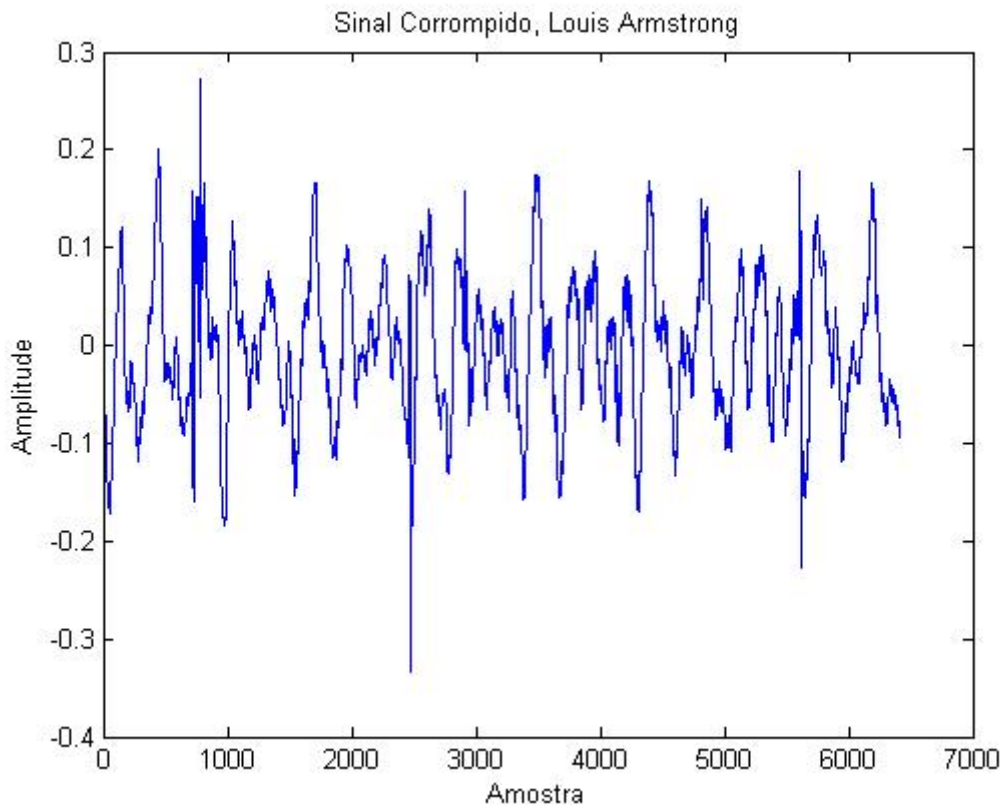


Figura 4.21 – Sinal Corrompido, Louis Armstrong.

Para o teste inicial foram-se mantidas as configurações iniciais, com exceção da ordem P que foi de 80, para se manter uma boa relação da variedade de timbres do sinal (saxofones, trompetes altos e baixos, piano, baixo e bateria) com o modelo.

O processo de restauração durou cerca de 10 segundos. O resultado é conferido na Figura 4.22:

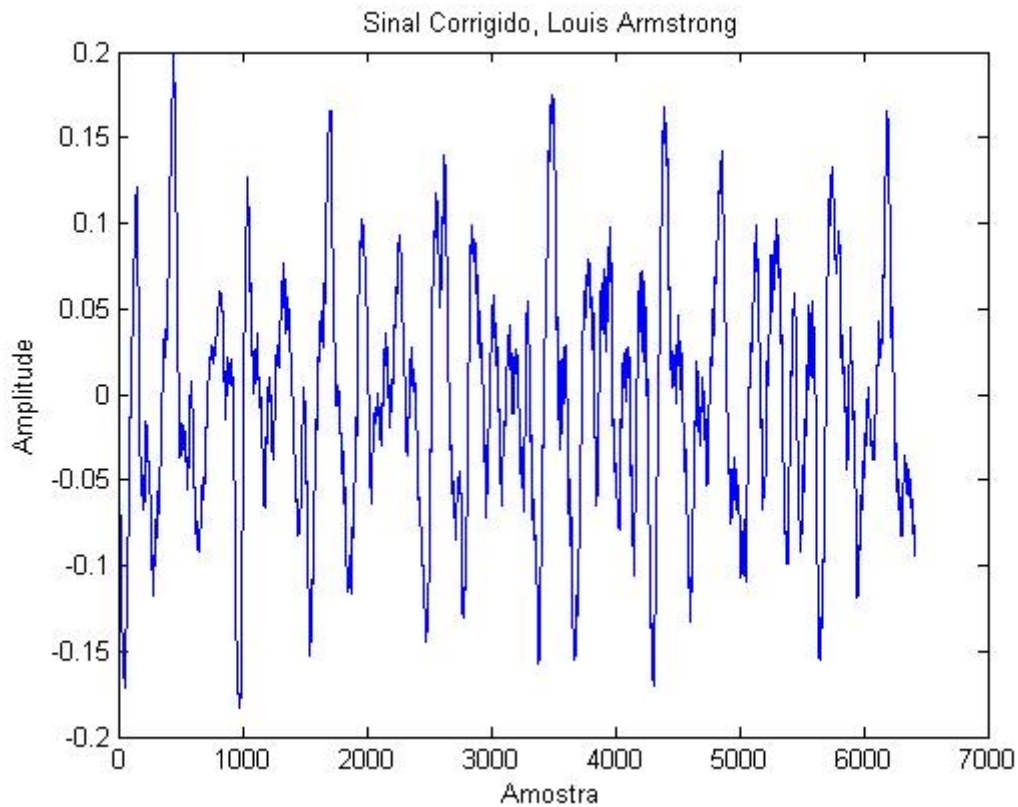


Figura 4.22 – Sinal Corrigido, Louis Armstrong.

Como a música possui uma grande quantidade de instrumentos sendo tocados ao mesmo tempo torna-se um pouco crítica a visualização gráfica do processo de restauração. O resultado novamente é satisfatório, restando somente a devida comprovação da eficácia do processo ouvindo-se o sinal restaurado. Observa-se, na Figura 4.23, os histogramas antes e depois da restauração da música de *Louis Armstrong*:

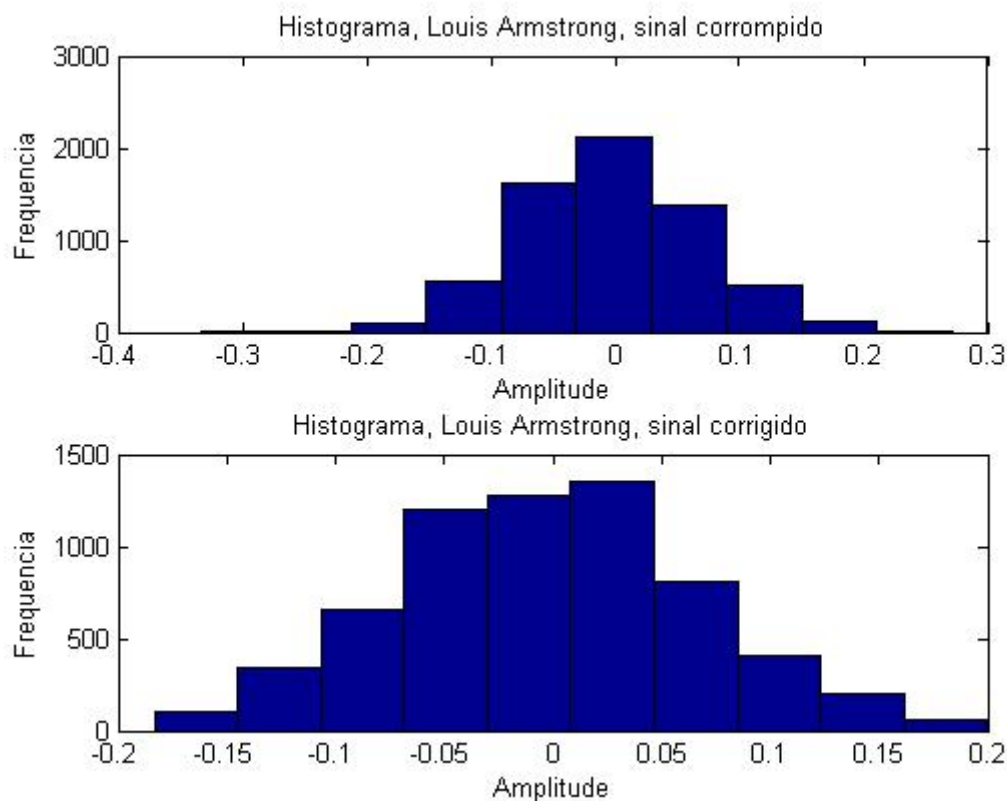


Figura 4.23 – Histograma dos valores de amplitude da música de *Louis Armstrong*, antes e após a restauração.

Para um outro trecho de música, do cantor e compositor *Cat Stevens*, tem-se um trecho de música com nível de corrupção mediano, com uma boa quantidade de instrumentos de corda e percussão. A gravação foi feita em 24 bits e 44,1 kHz, com duração de 0,5 segundos. Os parâmetros utilizados para a restauração foram: P igual a 80, K igual a 5, 4 amostras adicionais e 3 iterações de interpolação. O trecho encontra-se na Figura 4.24:

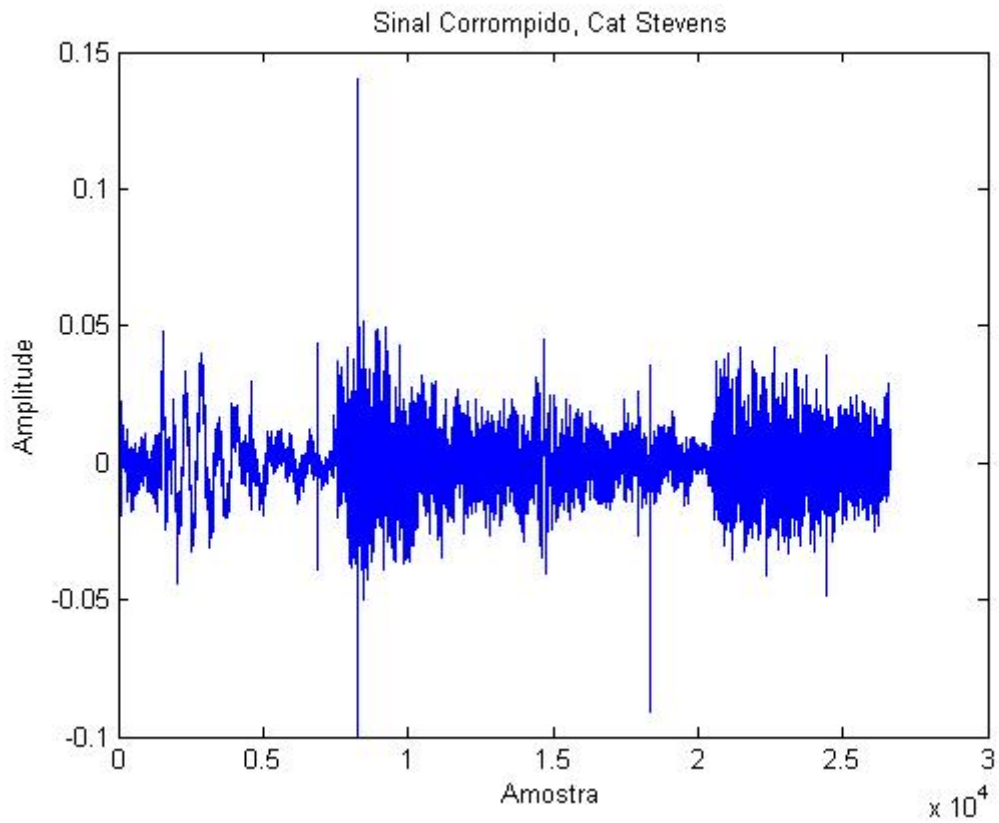


Figura 4.24 – Sinal Corrompido, *Cat Stevens*.

O sinal da Figura 4.24 encontra-se com alguns estalos visivelmente destacados. O tempo de processamento foi de 1 minuto e meio. O resultado pode ser conferido na Figura 4.25:

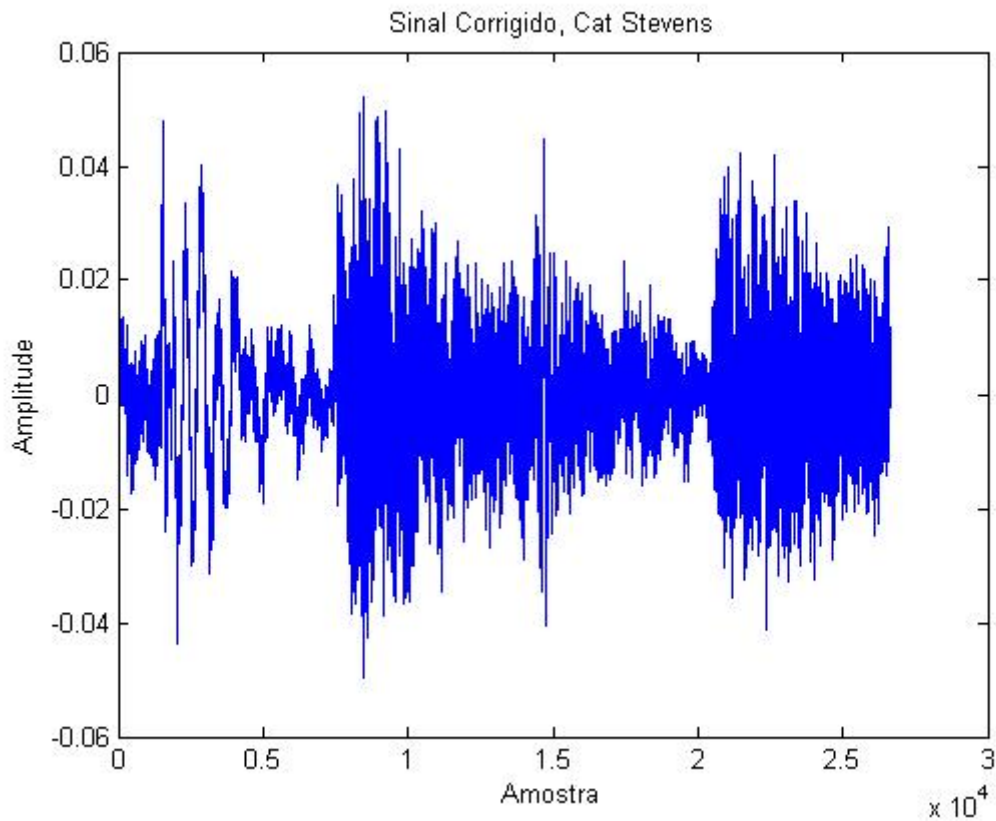


Figura 4.25 – Sinal Corrigido, *Cat Stevens*.

Percebe-se na Figura 4.25 uma nítida redução dos valores de amplitude do sinal, evidenciando que os estalos que estavam visíveis foram devidamente suprimidos. Sonoramente o resultado ficou bastante satisfatório. Durante esse último teste não foi necessária a execução de outras tentativas de restauração, devido à boa qualidade obtida na primeira tentativa. Para confirmar a queda de amplitude do sinal dessa música pode-se observar a Figura 4.26:

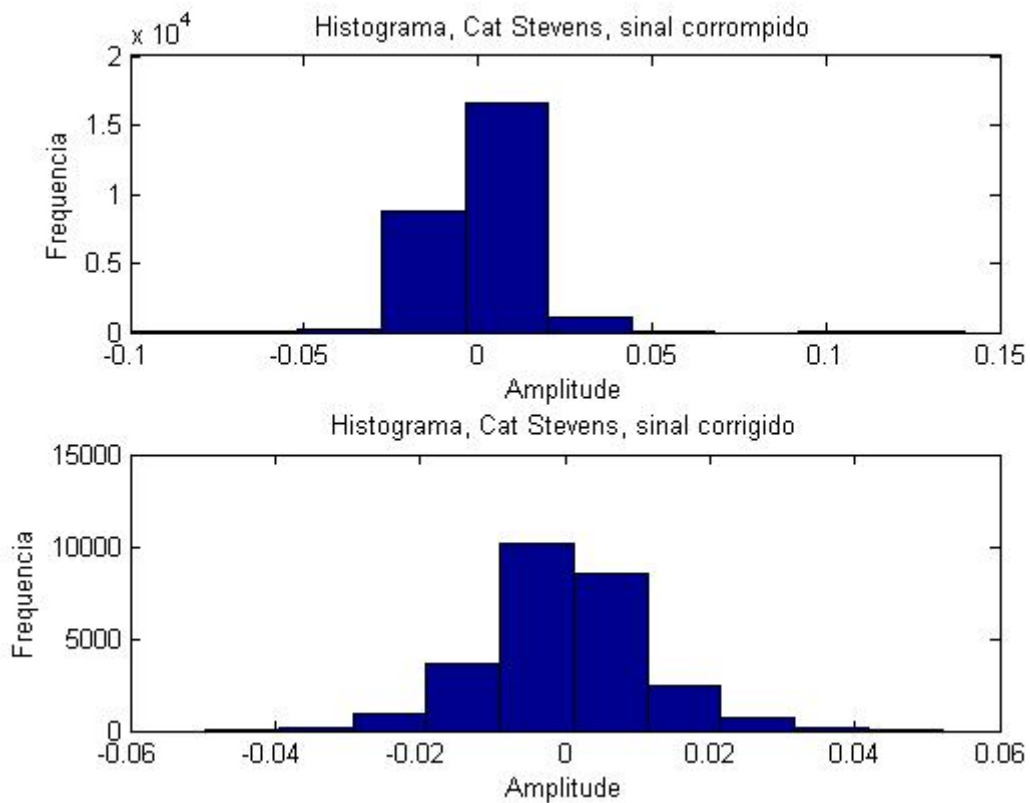


Figura 4.26 – Histograma dos valores de amplitude da música de *Cat Stevens*, antes e após a restauração.

Mais uma vez o processo de restauração alcança bons resultados, determinando um bom padrão de funcionamento em todos os passos envolvidos na sua execução.

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÃO

Apresentou-se neste trabalho uma visão a respeito da restauração digital de áudio de LP's. Abordou-se como técnica de restauração o modelo auto-regressivo, que é uma ferramenta altamente flexível e que se mostrou muito eficiente no processo de restauração.

Ao analisar-se cada uma das etapas do processo de restauração (modelagem, detecção e correção) percebeu-se que a etapa mais delicada é a de detecção. Requer-se uma boa quantidade de testes para efetivamente chegar ao seu ponto ótimo de funcionamento. Quanto mais se testa o algoritmo, melhor ele fica.

Constatou-se também nesse estudo a sensibilidade do algoritmo de restauração em relação a seus parâmetros de configuração. Cada tipo de música precisa de uma análise preliminar, estabelecendo-se valores iniciais e executando-se o processo. Uma simples redução unitária do valor do parâmetro de detecção K , por exemplo, acrescenta vários minutos ao tempo de processamento. Os parâmetros de configuração que mais influenciam no processamento do algoritmo é a ordem do modelo e o tamanho do bloco de amostras, pois ambos geram matrizes de tamanho bastante elevado, necessitando-se de computadores com melhor desempenho. Partindo-se dessa premissa sugere-se a utilização do algoritmo de restauração em processadores dedicados ao processamento de sinais, que são comumente chamados de DSPs.

Existe uma grande probabilidade de sucesso seguindo-se as recomendações de configuração feitas por autores do assunto. Entretanto, o resultado pode se tornar bastante relativo, devido à capacidade auditiva de cada pessoa. Cabe então tentar realizarem-se diversas execuções do algoritmo de restauração para a música que se quer restaurar, sempre efetuando ajustes nos parâmetros de configuração, para que a música fique cada vez mais livre do problema dos estalos.

Em alguns casos, o processo de supressão dos estalos não é suficiente para se alcançar um resultado satisfatório, significando que possivelmente existam outros problemas além do ruído impulsivo. Deve-se então partir para um

outro processo de restauração, que busque corrigir problemas como ruídos de fundo (“*Hiss*”) ou variações de *pitch*. Para o problema de *Hiss* sugere-se uma aplicação do filtro *Wiener*, que trabalha no domínio da frequência, equalizando todo o espectro.

Os resultados obtidos foram de acordo com as expectativas. Em alguns casos obtiveram-se sinais quase perfeitos, com nenhum estalo sendo detectado sonoramente. Em outros, ocorreu o aparecimento de distorções, algumas perceptíveis ao ouvido e outras não.

Pode-se optar por soluções envolvendo o uso de outras técnicas de supressão, que por sua vez carregam conteúdo técnico matemático bastante aprofundado e grau de dificuldade crescente. Cita-se o uso de probabilidade *Bayesiana* ou Cadeias de *Markov* utilizando-se *Monte Carlo*.

Uma das idéias por trás da restauração está em propiciar armazenamento e cuidado adequado às músicas restauradas. Recomenda-se o armazenamento digital dos arquivos restaurados, uma vez que a restauração tenha obtido um bom nível de qualidade. Este arquivamento pode ser feito em mídias ópticas, como em CDs ou DVDs, para uma melhor adequação ao padrão tecnológico atual.

Por fim sugere-se uma equalização do sinal musical restaurado, para que seu conteúdo se revigore por completo, minimizando as deteriorações e obtendo-se, talvez, uma qualidade igual a aquela existente na sua gravação original.

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, M. P.; ALBUQUERQUE, M. P. *Processamento Digital de Sinais*. Disponível em: <http://mesonpi.cat.cbpf.br/e2002/cursos/NotasAula/Apostila_Sinais_V1.pdf>. Acesso em 23 de Setembro de 2006.

ALVAREZ, E.; MENDEZ, R.; LANGWAGEN, G.. *Detection of Clicks Using Sinusoidal Modeling for the Confirmation of the Clicks*. In: 7th Int. Conference on Digital Audio Effects (DAFX'04), 2004, Nápoles.

AUDIORAMA - Equipamentos de Audio & Vídeo. *Gradiente Systems*. Disponível em <<http://www.audiorama.com.br/gradiente/systems.htm#DS-30>>. Acesso em 10 de Outubro de 2006.

BISCAINHO, L. W. P. *Restauração Digital de Sinais de Áudio provenientes de gravações musicais degradadas*. Disponível em: <<http://www.pee.ufrj.br/teses/?Resumo=2000127001>>. Acesso em 25 de Julho de 2006.

CDM Trading Pty Ltd. *Investing in Options with an Alternative Investment Manager: Glossary*. Disponível em <http://www.investinginoptions.com/glossary_A.html>. Acesso em 17 de Setembro de 2006.

COLEGIO San Agustin – El Paraíso. *Cardiograma*. Disponível em <<http://www.colegiosanagustin.edu.ve/small/cardiograma.jpg>>. Acesso em 12 de Setembro de 2006.

DISCO de vinil – Wikipédia. Disponível em <http://pt.wikipedia.org/wiki/Disco_de_vinil>. Acesso em 16 de Setembro de 2006.

ESQUEF, P. A. A. *Restauração de Sinais de Áudio Degradados por Ruído Impulsivo*. Disponível em: <http://www.acoustics.hut.fi/%7Eesquef/mypapers/esquef_tese.pdf>. Acesso em 01 de Julho de 2006.

GIDON, E. *The Yule Walker Equations for the AR Coefficients*. Disponível em <geosci.uchicago.edu/~gidon/geos31415/YW.pdf>. Acesso em 18 de Novembro de 2006.

GODSILL, S. J.; RAYNER, P. J. W. *Digital Audio Restoration: A Statistical Model Based Approach*. Disponível em: <<http://www-sigproc.eng.cam.ac.uk/~sjg/springer/index.html>>. Acesso em 15 de Março de 2006.

GRAMOPHONE record – Wikipedia. Disponível em <http://en.wikipedia.org/wiki/Gramophone_record>. Acesso em 10 de Setembro de 2006.

HANSELMAN, D.; LITTLEFIELD, B. *MATLAB® 6: Curso Completo*. 1.ed. São Paulo: Prentice Hall, 2003. 676p.

INGLE, V. K.; PROAKIS, J. G. *Digital Signal Processing using MATLAB®*. 1.ed. Pacific Grove: BookWare Companion Series, 2000. 418p.

LARGO, R. *Apontamentos de Sinais e Sistemas*. Disponível em <<http://ltodi.est.ips.pt/rlargo/SS/SS-cap1+2.pdf#search=%22processamento%20digital%20anal%C3%B3gico%22>>. Acesso em 23 de Setembro de 2006.

MATSUMOTO, Élia. Y. *MATLAB® 7: Fundamentos*. 1.ed. São Paulo: Érica, 2004. 376p.

MEYER, P. L. Estimação de Parâmetros: O método dos Mínimos Quadrados. In: MEYER, Paul. *Probabilidade: Aplicações à Estatística*. Massachusetts, 1965. p.321-325.

ROLAND – *Digitalização de um Sinal Analógico*. Disponível em <<http://paginas.terra.com.br/lazer/py4zbz/teoria/digitaliz.htm>>. Acesso em 15 de Outubro de 2006.

TAKALO, R. *Tutorial on Univariate Autoregressive Spectral Analysis*. In: Journal of Clinical Monitoring and Computing, Vol 19, No 6. 2005. p 401-410.

TOCA-DISCOS – Wikipédia. *Toca-discos*. Disponível em <<http://pt.wikipedia.org/wiki/Toca-discos>>. Acesso em 17 de Outubro de 2006.

VASEGHI, S. V. *Advanced Digital Signal Processing and Noise Reduction*. 2. ed. Brunel: John Wiley and Sons, 2000. 473p.

WEISSTEIN, E. W. *Maximum Entropy Method*. Disponível em <<http://mathworld.wolfram.com/MaximumEntropyMethod.html>>. Acesso em 01 de Novembro de 2006.

APÊNDICE A – Arquivo de configuração dos parâmetros de restauração

Retira_Clicks.m

```
%=====
%Ordem do modelo AR
%=====

p = 60;

%=====
%Tamanho do bloco de amostras
%=====

tam_bloco = 1024;

%=====
%Parâmetro de detecção
%=====

k = 5;

%=====
%Número adicional de amostras
%=====

amostras_est = 4;

%=====
%Número de iterações de interpolação
%=====

iteracoes = 3;

%=====
%Leitura do arquivo Wave
%=====

[click,fs,bits] = wavread('arquivofonte.wav');

%=====
%Chamada do processo de restauração
%=====

x = faz_processo_ar(click, p, tam_bloco, k, amostras_est, iteracoes);

%=====
%Gravação do arquivo Wave
%=====

wavwrite(x,fs,bits,'arquivodestino.wav');
```


APÊNDICE B – Arquivo de mudança e encaixe dos blocos de amostras

Faz_processo_ar.m

```
function [x] = faz_processo_ar(x, p, tam_bloco, k, amostras_est,
iteracoes)

%=====
%Calcula número de blocos do sinal
%=====

no_blocos = floor((length(x)-(p*2))/tam_bloco);

%=====
%Define o inicio e o fim de cada bloco
%=====

inicio = p+1;
fim = inicio+tam_bloco-1;

id = zeros(0, 1);

%=====
%Percorre o sinal bloco a bloco
%=====

for k=1:no_blocos
    [x_1, wid] = processo_ar(x(inicio:fim+p), p, x(inicio-p:inicio-1),
x(fim+1+p:fim+p+p), k, amostras_est, iteracoes);

    if (length(wid) > 0)
        wid = wid(wid <= tam_bloco);

        wid = wid + (inicio-1);
        id = [id; wid];

        x(inicio:fim) = x_1(1:tam_bloco);
        end

        inicio = inicio + tam_bloco;
        fim = fim + tam_bloco;
    end
end
```

APÊNDICE C – Arquivo de chamada das etapas de restauração

Processo_ar.m

```
function [x_c, id] = processo_ar(x_c, p, x_a, x_d, k, amostras_est,
iteracoes)

%=====
%Pega tamanho do bloco de amostras
%=====

w = length(x_c);

%=====
%Constrói sequência de amostras levando em conta o bloco, uma parte
%anterior e outra posterior
%=====

seq = [x_a; x_c; x_d];

%=====
%Calcula os parâmetros do modelo AR
%=====

[a, Gar] = modelo_ar(seq, p);

%=====
%Constrói o erro de predição
%=====

ep = filtro_ar(seq, a, Gar);

%=====
%Calcula o valor da variância do erro de predição
%=====

var = 1.4826*median(abs(ep));

%=====
%Constrói o vetor de detecção
%=====

id = identifica_clicks(ep, var, k, amostras_est);

%=====
%Verifica se existem amostras corrompidas no bloco
%=====

if (length(id) > 0)
    for i=1:iteracoes

%=====
%Interpola usando o algoritmo LSAR
%=====

        seq_id = interpolador_ar(seq(p+1:p+w), a, id, seq(1:p));
        x_c(id) = seq_id;
    end
end
```

```
%=====
%Reestima os parâmetros do modelo AR
%=====

    seq = [x_a; x_c; x_d];
    [a, Gar] = modelo_ar(seq, p);
end
end
```

APÊNDICE D – Arquivo de construção do modelo AR

Modelo_ar.m

```
function [a, G] = modelo_ar(x, p)

%=====
%Gera matriz de auto-regressão
%=====

n = length(x);
G = zeros(n - p, p);
for k = 1:p
    G(:,k) = x((p+1-k):(n-k));
end

%=====
%Calcula coeficientes do modelo AR
%=====

r = G' * x(p+1:length(x));
a = inv(G'*G) * r;
```

APÊNDICE E – Arquivo de construção do erro de predição

Filtro_ar.m

```
function [ep] = filtro_ar(x, a, G)

p = size(a,1);
n = length(x);
w = n - 2*p;
ep = x(p+1:p+w) - G(1:w,:)*a;
```

APÊNDICE F – Arquivo de construção do vetor de detecção

Identifica_Clicks.m

```
function [id] = identifica_clicks(ep, var, k, amostras_est)

%=====
%Constrói vetor de detecção
%=====

idv = (abs(ep) > (var * k));
largura = amostras_est;
idv = [zeros(largura,1); idv; zeros(largura,1)];

%=====
%Calcula vetor de detecção com adicional de amostras
%=====

for i=1:length(ep)
    adidv(i) = any(idv(i:i+2*largura));
end

id = find(adidv);
id = id';
```

APÊNDICE G – Arquivo de construção do interpolador LSAR

Interpolador_ar.m

```
function [x_id] = interpolador_ar(x_d, a, id, x_a)

x_id = zeros(size(id,1),1);

if (length(id) > 0)

    x = [x_a; x_d];

    n = length(x);
    p = length(a);

    A = zeros(n-p,n);

    linha = [-fliplr(a') 1];

    for k = 1:n-p
        A(k,k:k+p) = linha;
    end

    idv = zeros(length(x_d),1);
    idv(id) = ones(length(id),1);
    nid = find(idv == 0);

    id = id + p;
    nid = [(1:p)'; nid + p];

    A_id = A(:,id);
    A_nid = A(:,nid);

    x_id = -inv(A_id'*A_id) * A_id' * A_nid * x(nid);

end
```