

Compressão de sinais ECG

João André Marques
Departamento de Engenharia
Informática
Universidade de Coimbra
Coimbra, Portugal
uc2017225818@student.uc.pt

José Henrique Pereira
Departamento de Engenharia
Informática
Universidade de Coimbra
Coimbra, Portugal
uc2016228030@student.uc.pt

Ricardo Vilares
Departamento de Engenharia
Informática
Universidade de Coimbra
Coimbra, Portugal
uc2016198351@student.uc.pt

Abstract - This paper proposes lossless methodologies for ECG (electrocardiograms) data compression. An ECG can be seen as almost periodic signal, where it is possible to find many similarities between heart beats. These similarities are explored by the proposal's compressions. The dictionary is able to incorporate new patterns, in order to assure the algorithm adapts to changes in signal morphology.

Keywords—ECG, signal compressing, algorithms

Introdução

Os algoritmos de compressão são necessários para minimizar o número de bits de código armazenados reduzindo a redundância presente no sinal original, sem perder o conteúdo das informações clínicas. Este trabalho irá tratar conjunto de esquemas lossless de compressão de dados e comparar os desempenhos obtidos na compressão do sinal de ECG fornecido.

Para lidar com a grande quantidade de dados do ECG fornecido para análise foram estudadas várias técnicas de compressão de forma reduzir tanto quanto possível o sinal, preservando os dados para diagnóstico cardíaco. Inicialmente é feita a quantização da fonte em formato digital e em seguida a criação de um vetor que contém os dados desse sinal. Para os sinais biomédicos típicos, os métodos de compressão sem perdas só podem alcançar taxas de compressão (CR) na ordem de 2 a 1. Por outro lado, técnicas com perdas podem produzir resultados CR na ordem de 10 a 1, no entanto estas não serão abordadas.

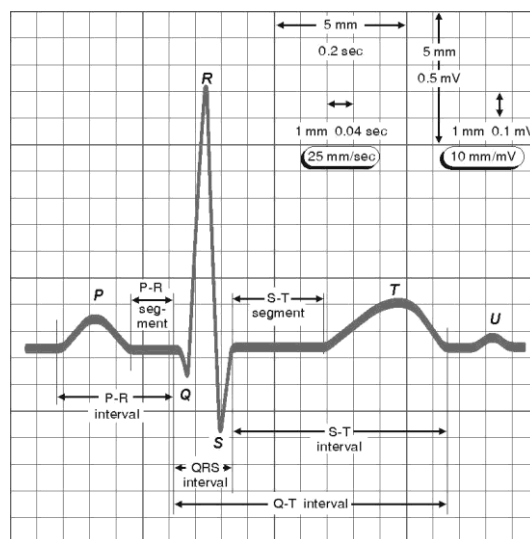
Neste artigo serão usadas diferentes transformações, como DCT, FFT, DST e codificação de huffman, modelo linear e modelação delta. Também são feitas as suas combinações e comparados os resultados de compressão a partir da taxa de compressão (CR) e diferença média quadrática raiz (PRD), no caso das transformadas.

Fez-se um estudo comparativo do desempenho das diferentes transformações e combinações das várias compressões.

I. ECG E VISÃO GERAL

ECG é um exame que registra a atividade elétrica do coração a partir de dois eletrodos, sendo composto por

eventos distintos: o potencial de repouso e o potencial de ação. Um sinal de ECG é composto por ondas elementares (onda P, complexo QRS, onda T e onda U).



As técnicas utilizadas na compressão de sinais ECG podem ser classificadas como: compressão direta de dados (AZTEC, TP, CORTES), métodos de transformação (Walsh, KLT, DCT, FFT, DST) e técnicas de extração de parâmetros.

Os métodos diretos de compressão de dados baseiam-se na utilização de algoritmos de perdição e interpolação. Essas técnicas tentam reduzir as redundâncias presentes nos dados. As técnicas de transformação, de forma geral, envolvem pré-processamento do sinal de entrada por meio de transformações lineares ortogonais e a codificação apropriada do sinal transformado. Para reconstruir o sinal é executado o processo inverso, o que resulta num determinado grau de erro. As técnicas de extração de parâmetros são processos irreversíveis nos quais características particulares do sinal são extraídas para serem utilizadas numa classificação baseada no conhecimento a priori das características do sinal em questão.

As técnicas de compressão direta de dados têm-se mostrado mais eficientes no seu desempenho quando comparadas às de transformação, tanto em relação ao tempo de processamento quanto à taxa de compressão.

Os esquemas de compressão que envolvem perdas normalmente reduzem o volume de dados de forma

significativa, no entanto podem envolver a perda de informações uteis para diagnósticos.

Além da comparação visual, a maioria dos esquemas de compressão utilizada a diferença média quadrática percentual (PRD) como forma de avaliação do sinal reconstruído. O PRD é irrelevante do ponto de vista do diagnóstico, pois não revela se o algoritmo é capaz ou não de preservar as características mais significativas do ECG.

Neste artigo só serão abordados os métodos de compressão sem perdas.

II. CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO

Antes de se estudar os vários algoritmos de compressão, é importante compreender os critérios com base nos quais os resultados são comparados. A avaliação do desempenho para testar os algoritmos de compressão de ECG inclui três componentes: eficiência de compressão, erro de reconstrução e complexidade computacional. A eficiência de compressão é dada pela taxa de compressão (CR).

O componente de complexidade computacional é parte da consideração prática de implementação, mas não será considerado de forma muito relevante. Os dados foram testados com base na taxa de compressão CR e diferença média quadrática de raiz PRD.

Taxa de Compressão

Especifica a quantidade de compressão obtida. A razão de compressão é definida como a razão entre as taxas do sinal comprimido (em termos de bits) e a taxa do sinal original:

$$CR = \frac{\text{Number of samples before compression}}{\text{Number of samples after compression}} \quad (1)$$

Medição de Distorção

O objetivo do sistema de compressão é remover redundância e informações irrelevantes. Consequentemente, o critério do erro deve ser definido de forma a medir capacidade do sinal reconstruído para preservar a informação. A diferença média da raiz percentual (PRD) é utilizada para o cálculo do erro de reconstrução:

$$PRD = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{L_b} [x(n) - x'(n)]^2}{\sum_{n=1}^{L_b} [x(n)]^2}} \quad (2)$$

onde $x(n)$ é o sinal original, $x'(n)$ é o sinal reconstruído e L_b é o comprimento do bloco ou sequência sobre qual o PRD é calculado.

III. TÉCNICAS DE DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA

Na codificação de transformação faz-se uma seleção das informações a serem descartadas, diminuindo assim a largura de banda. A informação restante pode então ser comprimida através de uma variedade de métodos. Quando a saída é decodificada, o resultado pode não ser idêntico à entrada original, mas espera-se que esteja próxima o suficiente.

O Transform Coding (TC) é um dos métodos mais importante de compressão no domínio da frequência. O objetivo é dividir o sinal em componentes e alocar os bits no domínio da frequência. Na maioria dos métodos TC, o sinal de entrada é primeiro dividido em blocos de dados e cada bloco é transformado linearmente no domínio. Os métodos de transformação envolvem o processamento do sinal de entrada por uma transformação ortogonal linear e a codificação da saída usando um critério de erro apropriado. Para a reconstrução do sinal, uma transformação inversa é realizada e o sinal é recuperado com algum erro. Assim, as técnicas de transformação envolvem o pré-processamento do sinal de entrada por meio de uma transformação ortogonal linear e a codificação apropriada da saída transformada (coeficientes de expansão) e a redução da quantidade de dados necessária para representar adequadamente o sinal original.

As transformações ortogonais a serem abordadas neste artigo são a Transformada de Cosseno Discreta (DCT), Transformada Rápida de Fourier (FFT), Transformada de Seno Discreta (DST).

3.1 Transformada Discreta de Cosseno

A Transformada Discreta de Cosseno (DCT) foi desenvolvida para aproximar a Transformada de Karhunen-Loeve (KLT) quando há alta correlação entre as amostras de entrada, que é o caso de muitas formas de onda digitais.

The DCT $\mathbf{v} = [v_0 \ v_1 \ \dots \ v_{N-1}]^T$ of the vector \mathbf{x} is defined as follows:

$$v_0 = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N-1} x_n \quad (3)$$

$$v_k = \sqrt{\frac{2}{N}} \sum_{n=0}^{N-1} x_n \cos \frac{(2n+1)k\pi}{2N}, \quad k=1, 2, \dots, (N-1) \quad (4)$$

where v_k is the k th DCT coefficient. The inverse discrete cosine transform (IDCT) of \mathbf{v} is given by (5).

$$x_n = \frac{1}{\sqrt{N}} v_0 + \sqrt{\frac{2}{N}} \sum_{k=1}^{N-1} v_k \cos \frac{(2n+1)k\pi}{2N}, \quad n=0, 1, 2, \dots, (N-1) \quad (5)$$

O DCT expressa uma sequência finita de pontos de dados em termos de uma soma de funções cosseno oscilando em frequências diferentes. Para compressão,

verifica-se que as funções cosseno são mais eficientes. Em particular, um DCT é uma transformação relacionada com Fourier semelhante à transformada discreta de Fourier (DFT), mas utilizando apenas números reais. Os DCTs são equivalentes a DFTs de aproximadamente o dobro do comprimento, usando dados reais com simetria uniforme (já que a transformada de Fourier de uma função real e par é real e uniforme).

A Transformada Discreta de Cosseno é a base para muitos algoritmos de compressão de sinal e imagem devido à sua alta capacidade de compressão. A transformada de cosseno de uma amostra N é definida como:

$$F(u) = \sqrt{\frac{2}{N}} C(u) \sum_{x=0}^{N-1} f(x) \cos \left[\frac{\pi(2x+1)u}{2N} \right] \quad (6)$$

$$u=0,1,\dots,N-1,$$

$$\text{where } C(u) = \frac{1}{\sqrt{2}} \quad \text{for } u=0$$

$$=1 \quad \text{otherwise.}$$

A função $f(x)$ representa o valor de x amostras de sinais de entrada. O (u) representa um coeficiente DCT. O DCT inverso é definido de maneira similar:

$$f(x) = \sqrt{\frac{2}{N}} \sum_{u=0}^{N-1} C(u) F(u) \cos \left[\frac{\pi(2x+1)u}{2N} \right] \quad (7)$$

$$x=0, 1, \dots, N-1.$$

3.2 Transformada Rápida de Fourier (FFT)

Uma transformada rápida de Fourier (FFT) decompõe uma sequência de valores em componentes de diferentes frequências. A diferença na velocidade pode ser substancial, especialmente para conjuntos de dados longos em que N pode estar na casa dos milhares ou milhões - na prática, o tempo computacional pode ser reduzido em várias ordens de magnitude em tais casos, e a melhora é aproximadamente proporcional a $N / \log(N)$. Esta melhoria faz com que muitos algoritmos baseados em DFT sejam práticos. As FFTs são relevantes para uma ampla variedade de aplicações, desde processamento digital de sinais e resolução de equações diferenciais parciais até algoritmos para rápida multiplicação de valores grandes. A periodicidade e propriedades de simetria do DFT são úteis para compressão. O coeficiente de FFT de comprimento N sequência $f(x)$ é definido da seguinte forma:

$$F(u) = \sum_{x=0}^{N-1} f(x) e^{-j2\pi ux/N} \quad (8)$$

$$u=0,1,\dots,N-1.$$

E a inversa da transformada é calculada assim:

$$f(x) = \frac{1}{N} \sum_{u=0}^{N-1} F(u) e^{j2\pi ux/N} \quad (9)$$

$$x=0,1,\dots,N-1$$

3.3 Transformação de Seno Discreta (DST)

A Transformação de seno discreta (DST) é uma transformação semelhante à DFT, mas que usa uma matriz real. É equivalente às partes imaginárias de um DFT de aproximadamente duas vezes o comprimento, usando dados reais com simetria ímpar (já que a transformada de Fourier de uma função real é imaginária e ímpar), onde em algumas variantes os dados são deslocados pela metade de uma amostra. Como qualquer transformada relacionada com Fourier, as transformadas discretas de seno (DSTs) expressam uma função ou sinal em termos de uma soma de sinusoides com diferentes frequências e amplitudes. Como a transformada de Fourier discreta (DFT), um DST usa funções com número finito de pontos de dados discretos. A distinção óbvia entre um DST e um DFT é que o primeiro usa apenas funções senoidais, enquanto o segundo usa cossenos e senos (na forma de exponenciais complexos). Um DST implica diferentes condições de contorno que o DFT ou outras transformações relacionadas.

Formalmente, a transformada de seno discreta é uma função linear, invertível $F: \mathbb{R}^N \rightarrow \mathbb{R}^N$ (onde \mathbb{R} denota o conjunto de números reais), ou equivalentemente uma matriz quadrada $N \times N$. Existem várias variantes do DST com definições ligeiramente modificadas. Os N números reais $0, \dots, N-1$ são transformados da seguinte maneira:

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n \sin \left[\frac{\pi}{N+1} (n+1)(k+1) \right] \quad (10)$$

$$k=0, \dots, N-1$$

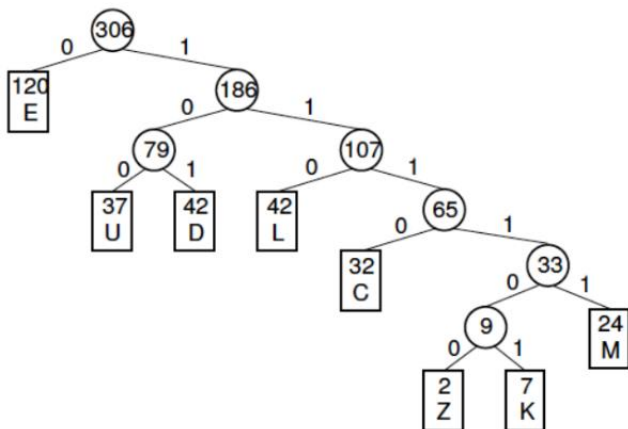
IV. HUFFMAN

A codificação de Huffman explora a redundância, isto é, a repetição desnecessária de símbolos e caracteres permitindo uma compressão sem perdas ideal na compressão de um sinal ECG.

O primeiro passa por criar um dicionário (estático) com a frequência de cada símbolo do alfabeto.

Letter	Z	K	M	C	U	D	L	E
Frequency	2	7	24	32	37	42	42	120

Posto isto, de modo a facilitar a criação da árvore, ordenam-se os valores dos símbolos por ordem decrescente. Os nós com as menores probabilidades são agrupados e vão resultar num nó pai com a probabilidade corresponde à soma dos seus filhos. Quando a probabilidade de um nó for igual a 1 significa que a árvore está completa. Segue-se agora a codificação dos símbolos onde se percorre a árvore até ao nó (folha) desejado, tabelando de seguida os bits correspondentes a cada símbolo.



V. MODELO LINEAR

No modelo linear cria-se uma matriz de 3 colunas, onde os 3 primeiros elementos são sinal original e os restantes são gerados por previsão. Os 3 primeiros não são gerados por previsão por não terem 3 elementos que os antecipem. De seguida cria-se uma matriz y de uma coluna que contém os valores de previsão e outra que contém o cálculo do erro obtido.

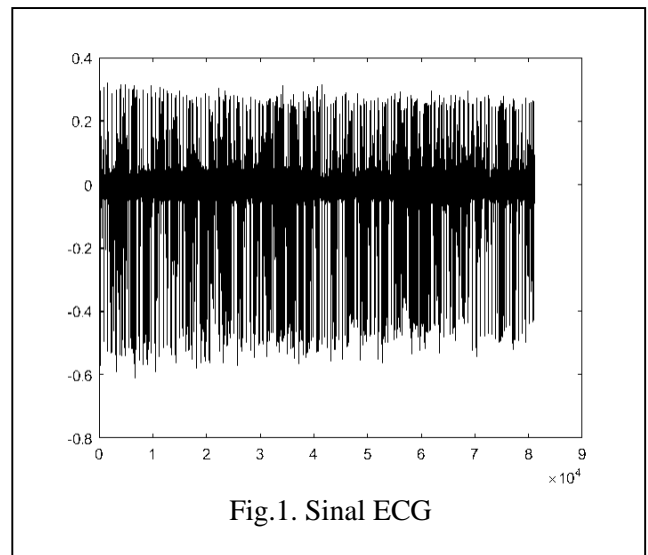
VI. MODELAÇÃO DELTA

Para obter melhor compactação, a codificação delta é executada subtraindo duas amostras consecutivas. A motivação por trás da codificação delta é obtenção de um número menor de dados, o que irá levar a uma maior taxa de compressão.

VII. ALGORITMOS DE CODIFICAÇÃO

As várias técnicas de compressão são comparadas a partir dos valores de PRD e taxa de compressão CR.

O sinal ECG original tem o seguinte formato:



Bits do sinal = 1.1256e+06
Bits de codificação do = 13.8536

7.1 Modelação delta

7.1.1 Sinal de modelação delta

CR = 1.1700
Bits do sinal = 9.6207e+05

7.1.2 Sinal de modelação delta2

CR = 1.1768
Bits do sinal = 9.5654e+05

7.2 Modelo linear

7.2.1 Sinal original

CR = 1.1783
Bits do sinal = 9.5533e+05

7.3 Huffman

7.3.1 Sinal original

Bits do sinal = 1128348
Bits de codificação = 13.8872
CR = 0.9976

7.3.2 Sinal de modelação delta

CR = 1.1668
Bits do sinal = 964668
Bits de codificação = 11.8727

7.3.3 Sinal de modelação delta2

CR = 1.1738
Bits do sinal = 958975
Bits de codificação = 11.8026

7.4 Codificação DCT

Primeiro fez-se a separação dos componentes do ECG em componentes x e y. De seguida fez-se o cálculo da frequência e o tempo entre duas amostras.

Se os coeficientes DCT (antes da compressão), se estiver entre +0,22 a -0,22 e atribui-se ao Index o valor 0.

7.4.1 Sinal original

O gráfico para ECG comprimido por DCT do sinal original é apresentado na Fig. 2.

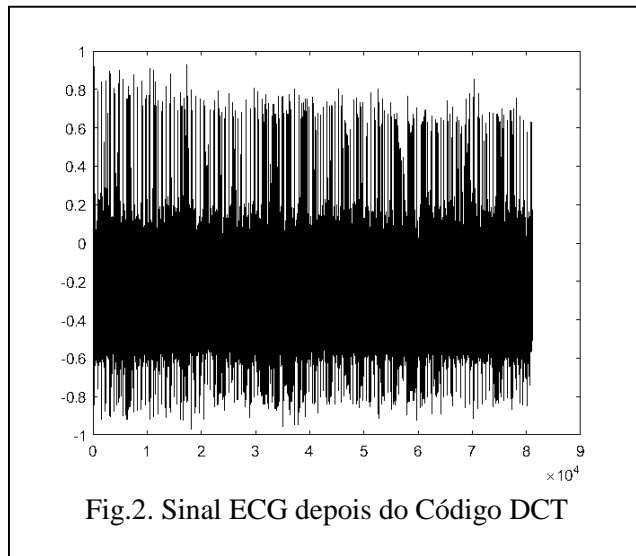


Fig.2. Sinal ECG depois do Código DCT

O sinal de erro após a codificação DCT é mostrado na Fig. 3.

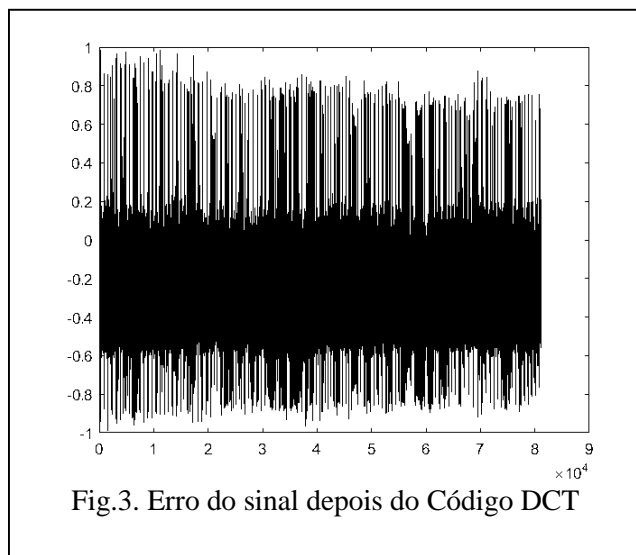


Fig.3. Erro do sinal depois do Código DCT

Valores obtidos:
PRD = 0.1022
CR = 0.9910
Bits do sinal = 1.1359e+06

Os gráficos obtidos de compressão e erro são semelhantes, portanto vão ser apenas apresentados os valores de PRD e CR nos próximos sinais usados no DCT.

7.4.2 Sinal de modelação delta

Valores obtidos:

PRD = 0.7616

CR = 1.1295

Bits do sinal = 9.9659e+05

7.4.3 Sinal de modelação delta2

Valores obtidos:

PRD = 0.9918

CR = 1.4439

Bits do sinal = 7.7955e+05

7.5 Codificação FFT

Se os coeficientes de FFT (antes da compressão) estiverem entre +25 a -25 e atribui-se ao Index o valor 0.

7.4.1 Sinal original

O gráfico para ECG comprimido por FFT do sinal original é apresentado na Fig. 4.

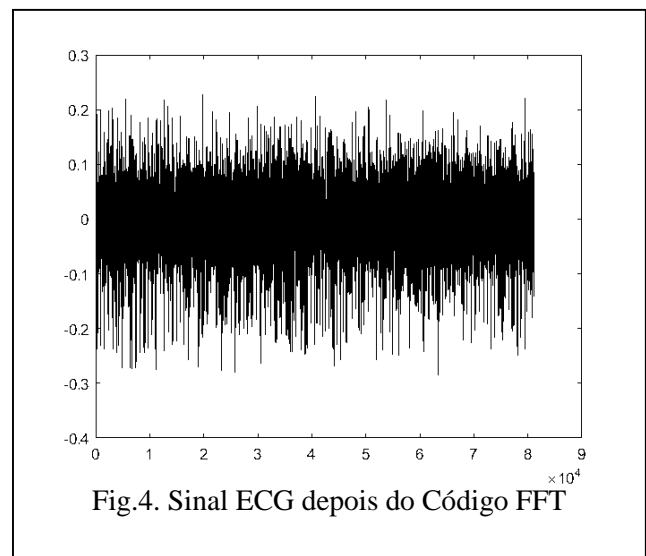
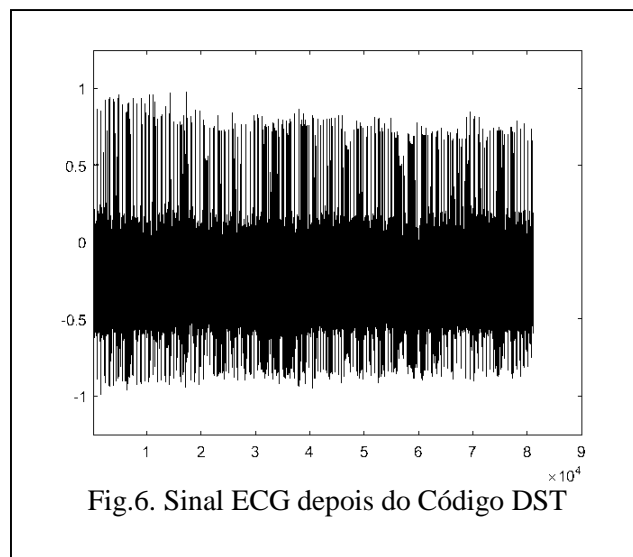
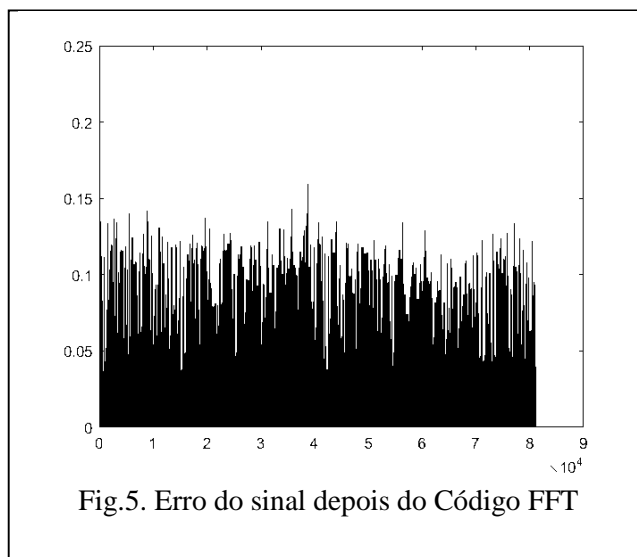


Fig.4. Sinal ECG depois do Código FFT

O sinal de erro após a codificação da FFT é mostrado na Fig. 5.



Valores obtidos:
 PRD = 0.0482
 CR = 0.9992
 Bits do sinal = 1.1265e+06

7.5.2 Sinal de modelação delta

Valores obtidos:
 PRD = 0.4383
 CR = 1.1564
 Bits do sinal = 9.7342e+05

7.5.3 Sinal de modelação delta2

Valores obtidos:
 PRD = 0.7997
 CR = 1.1882
 Bits do sinal = 9.4731e+05

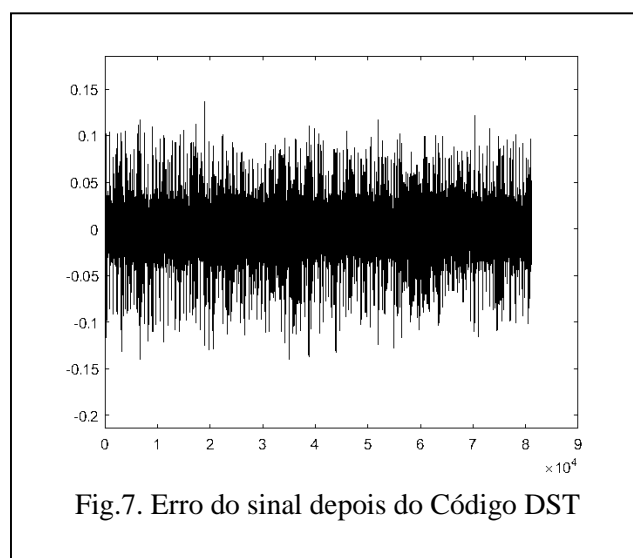
7.6 Codificação DST

Se os coeficientes de FFT (antes da compressão) estiverem entre +15 a -15 e atribua ao índice o valor 0.

7.6.1 Sinal original

O gráfico para ECG comprimido por DST do sinal original é apresentado na Fig. 6.

Erro do sinal depois do DST mostrado na Fig.7



Valores obtidos:
 PRD = 0.0427
 CR = 0.9984
 Bits do sinal = 1.1274e+06

7.6.2 Sinal de modelação delta

Valores obtidos:
 PRD = 0.3619
 CR = 1.1580
 Bits do sinal: 9.7206e+05

7.6.3 Sinal de modelação delta2

Valores obtidos:
 PRD = 0.6338
 CR = 1.1682
 Bits do sinal = 9.6353e+05

I. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os métodos de codificação no domínio da frequência produzem resultados de codificação mais elevados em geral. Os dados do ECG foram amostrados em 250Hz e a resolução de cada amostra é de 16 bits, com uma taxa de bits total de 1.1256e+06bps. A quantidade de compressão foi medida pelo CR e a distorção entre o sinal original e o reconstruído medida pelo PRD. A tabela de comparação abaixo detalha as técnicas de compressão e os todos resultados obtidos. A análise desses dados permite distinguir o melhor método de compressão. O PRD indica a fidelidade de reconstrução, daí convém que o seu valor seja baixo. Ter um alto CR significa, porém, ter uma maior distorção, logo existe sempre um compromisso para se obter valores maiores de CR, tendo como consequência um maior PRD.

TABLE 1
Comparação de técnicas de compressão

Método	CR	PRD
Delta	1.1700	/
Delta2	1.1768	/
Modelo Linear	1.1783	/
Huffman	0.9976	/
Delta + Huffman	1.1668	/
Delta2 + Huffman	1.1738	/
DCT	0.9910	0.1022
FFT	0.9992	0.0482
DST	0.9984	0.0427
Delta + DCT	1.1295	0.7616
Delta + FFT	1.1564	0.4383
Delta + DST	1.1580	0.3619
Delta2 + DCT	1.4439	0.9918
Delta2 + FFT	1.1882	0.7997
Delta2 + DST	1.1682	0.6338

Comparando os vários esquemas de compressão e analisando os resultados obtidos, pode-se concluir que o melhor esquema de compressão deste estudo é a modelação delta2 seguida da compressão DCT.

II. CONCLUSÕES

Todos os algoritmos propostos neste artigo foram testados no matlab e os resultados obtidos foram os estudados. O sinal fonte usado foi o ECG_norm, fornecido para o estudo.

As técnicas compressão usadas baseadas em transformação destacaram-se com maiores valores de CR, quando aplicado previamente a modelação delta. O sinal pré-processado é transformado para obter os coeficientes de cada transformada. A quantização dos coeficientes transformados dá a compressão real. Entre as técnicas apresentadas, a modelação delta2 seguida do DCT é que dá o valor de CR mais alto, no valor de 1.4439, com PRD de 0.9918. Verifica-se também que caso seja enviado o sinal sem qualquer tipo de compressão prévia para os compressores de huffman e transformadas. os resultados obtidos ainda são piores, daí ser preciso ser feita previamente a modelação delta ou modelo linear.

O uso apropriado destes modelos de compressão permitem um armazenamento dos dados de forma menos reduzida e otimizada.

REFERENCIAS

- [1]<https://pt.wikipedia.org/wiki/Eletrocardiograma>
- [2]<http://www.hcs.harvard.edu/~weber/HomePage/Papers/ECGCompression/>
- [3]https://www.researchgate.net/publication/304069701_Avaliacao_da_Amostragem_Compressiva_em_Sinais_de_ECG_e_Imagens_Digitais
- [4]<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/11077735>
- [5]http://repositorio.unb.br/bitstream/10482/19564/1/2015_MarceloAdrianCampitelli.pdf