

Relatório

## Experiência 4 - Como inserir marca d'água em um sinal de áudio?

PSI3531 - Processamento de Sinais Aplicado (2020)

Matheus Bordin Gomes - 9838028

Essa experiência visa a implementação de um sistema de inserção de uma marca d'água inaudível em um sinal de áudio, de forma a se obter uma taxa de erro baixa. Para isso, em primeiro lugar, foi implementado o sistema para inserir a marca d'água. Em seguida, foi implementado o ajuste de ganho para obter erro nulo. Contudo, o sinal de marca d'água é audível nas duas etapas anteriores. Dessa forma, foi feita uma alteração para tornar a marca d'água inaudível, o que aumentou consideravelmente a taxa de erro. Por fim, é feita uma alteração no sistema de marca d'água inaudível para que a taxa de erro seja razoável.

### 1. Sistema de marca d'água visto como um problema de comunicação digital

Esse exercício foi implementado no *script* "exp4\_1.m", entregue juntamente com este relatório. Nessa etapa, foi utilizado um ruído branco como o sinal de áudio, no qual a marca d'água será transmitida. Além disso, foi utilizada uma imagem em tons de cinza, com 64 X 64 pixels e 8 bits/pixel.

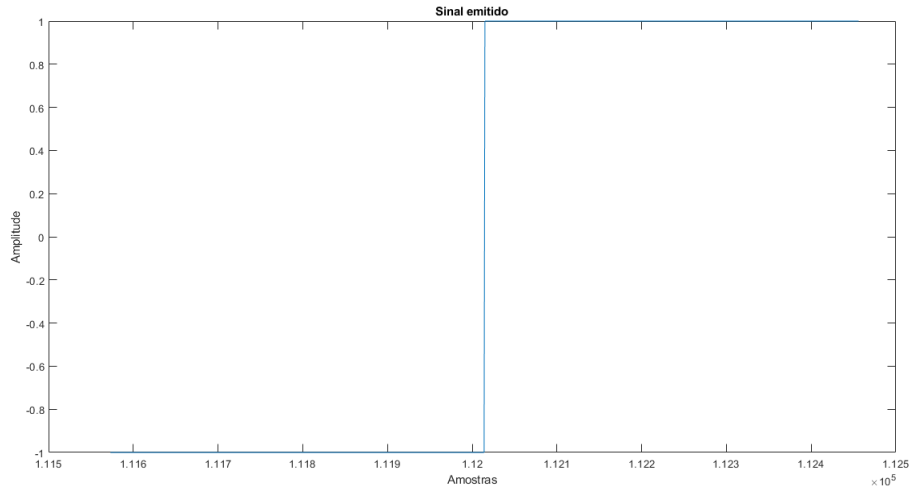
- a A imagem disponibilizada juntamente com o enunciado foi lida, de forma que o valor de cada pixel foi transformado em um número binário de 8 bits e, em sequência, a matriz de números binários foi transformada em um único vetor, equivalente a concatenação das linhas da matriz. Por fim, o vetor que era do tipo *char* foi transformado para *double* e os valores foram mapeados para -1;+1. A imagem lida pode ser vista na figura 1 e também será utilizada como referência de comparação para as imagens recuperadas nesse exercício e nos próximos.



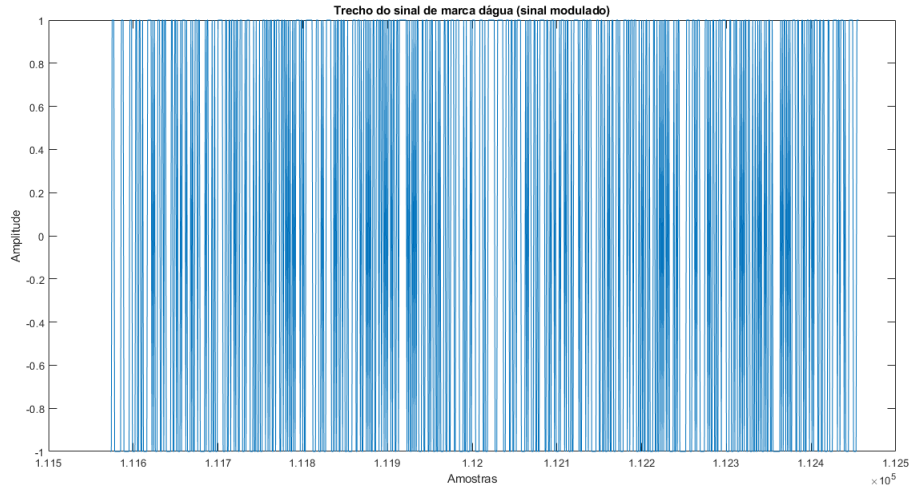
Figura 1. Imagem 64X64 em escala de cinza utilizada como sinal de marca d'água.

- b A sequência de bits lida foi transformada no sinal modulado, com o mesmo comprimento do sinal de áudio, por meio de uma sequência pseudoaleatória de -1s e 1s. Além disso, foi gerada uma sequência de mesmo comprimento do sinal modulado que representa o sinal emitido. Foram calculadas as potências da sequência pseudoaleatória gerada, do sinal modulado e do

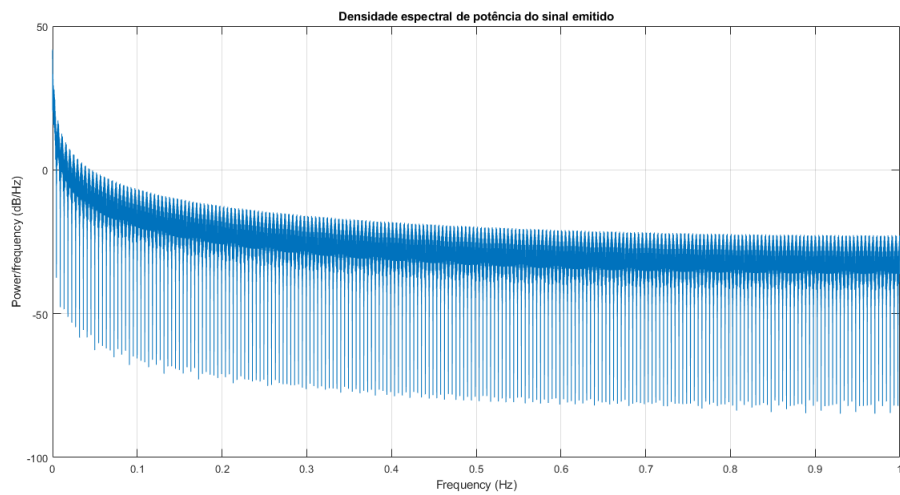
sinal emitido. Os resultados obtidos foram 1.0023, 1.0000 e 0.9949, respectivamente. Além disso, pode-se ver o mesmo trecho no tempo dos sinais modulado, emitido gerada na figura 2, além das densidades espectrais de potência dos sinais modulado e de da sequência gerada nas figuras 3 e 4. Vale notar que é útil utilizar  $f_s = 2$  na função "*pwelch.m*", pois isso é equivalente a normalizar a faixa de frequência que respeita o Critério de Nyquist entre 0 e 1.



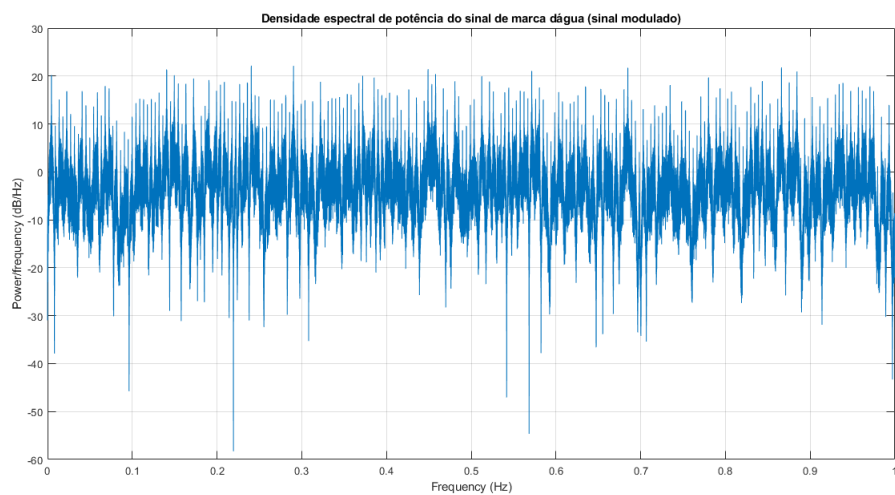
**Figura 2.** Trecho do sinal emitido.



**Figura 3.** Trecho do sinal de marca d'água (sinal modulado) no tempo.

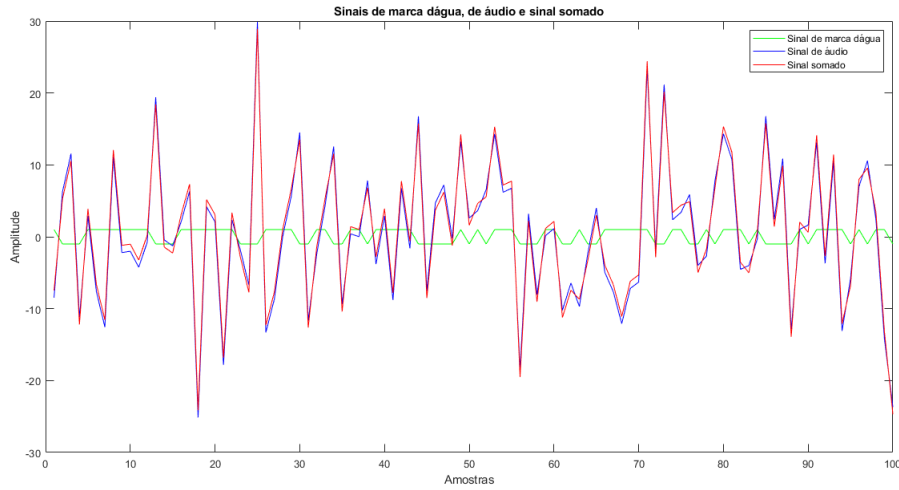


**Figura 4.** Densidade espectral de potência do sinal emitido.



**Figura 5.** Densidade espectral de potência do sinal modulado.

- c Neste item, foi gerado um ruído branco gaussiano, com média zero e com uma potência tal que  $SNR = -20$  dB.
- d Foram somados o sinal de áudio (ruído branco gaussiano, utilizado como canal de transmissão) e o sinal de marca d'água, de forma a se obter o sinal final com a marca d'água. Pode observar o gráfico das 100 primeiras amostras dos três sinais na figura 6.

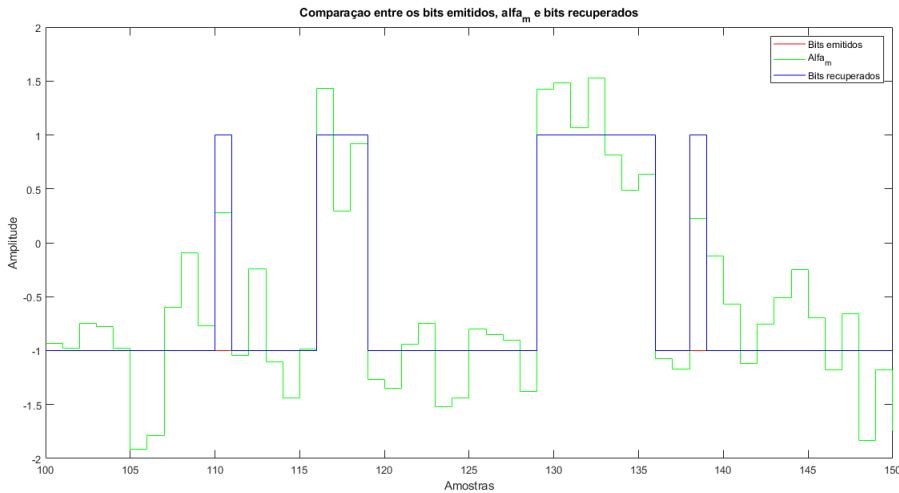


**Figura 6.** Comparação das cem primeiras amostras do sinal de áudio, do sinal de marca d'água e do sinal final.

Nota-se que houve um pequeno desvio de amplitude entre o sinal final e o sinal de áudio original, dado que a amplitude do sinal de marca d'água é limitado entre -1;+1. Contudo, ao se ouvir o sinal final, a presença do ruído, gerado pela interferência do sinal modulado, é muito notável.

e Os itens anteriores foram referentes ao desenvolvimento do transmissor, isto é, o módulo que gera o sinal modulado e o insere no sinal de áudio de interesse. Nesse item, foi implementado o receptor do sistema, o qual demodula o sinal recebido para obter o sinal enviado e, por fim, recuperar os bits transmitidos.

Para cada bloco de  $N_b$  amostras do sinal recebido, foi calculado o produto escalar normalizado  $\alpha_m$  do trecho do sinal com a sequência de bits pseudoaleatória gerada no emissor. Se  $\alpha_m \leq 0$ , o bit foi considerado 0, e se  $\alpha_m > 0$ , o bit foi considerado 1. Pode-se observar um trecho da comparação entre os valores de  $\alpha_m$ , dos bits emitidos e dos bits recuperados na figura 7. Nesse trecho, ocorreram dois erros, em que o produto escalar foi maior do que 0, quando o bit emitido foi 0.



**Figura 7.** Comparação do produto escalar normalizada, com os bits emitidos e os bits recuperados.

f A imagem recuperada pode ser vista na figura 8, na qual é possível notar o ruído adicionado devido aos erros na detecção dos bits. Obteve-se uma taxa de erro de  $BER = 0.0178$  e índice de similaridade estrutural média de  $MSSIM = 0.7821$ . O valor da BER é relativamente alto, visto que ocorrem quase 2 erros a cada 100 bits transmitidos, suficiente para gerar um ruído perceptível na imagem, como foi notado.



Figura 8. Imagem recuperada do sinal de marca d'água.

## 2. Ajuste do ganho para detecção sem erro

Esse exercício foi implementado no script "exp4\_2.m", entregue juntamente com este relatório. Nessa etapa, o sinal de áudio foi substituído pelo áudio "BeethovenExp4.wav" e foi feito o ajuste de ganho, para que houvesse detecção sem erro.

a Nesse item, foi utilizado o áudio "BeethovenExp4.wav" como meio de transmissão do sinal de marca d'água. Esse sinal pode ser visto na figura 9;

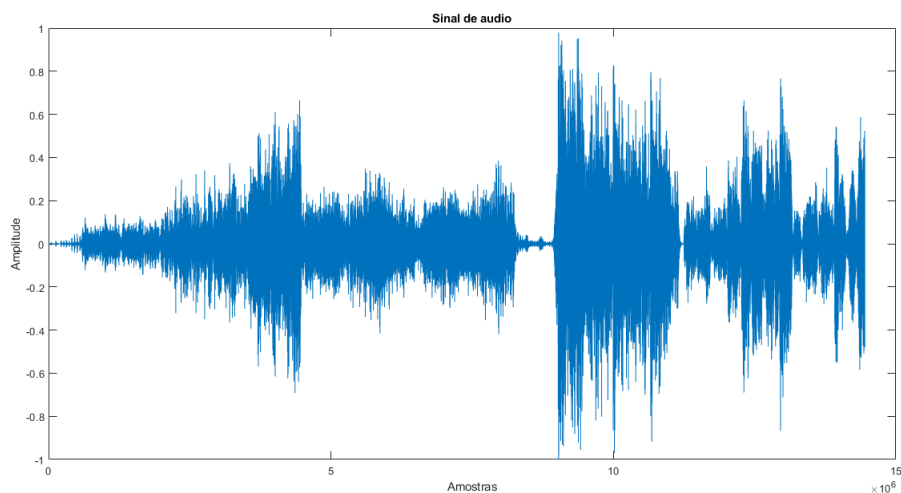
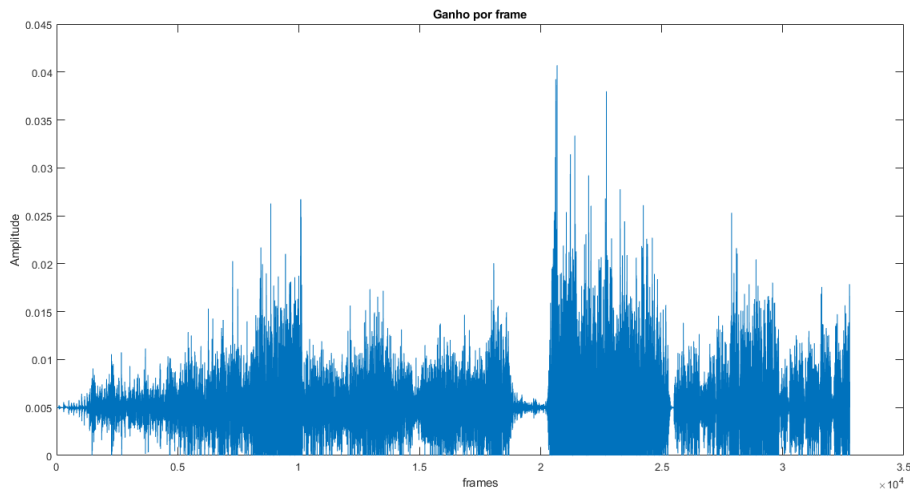


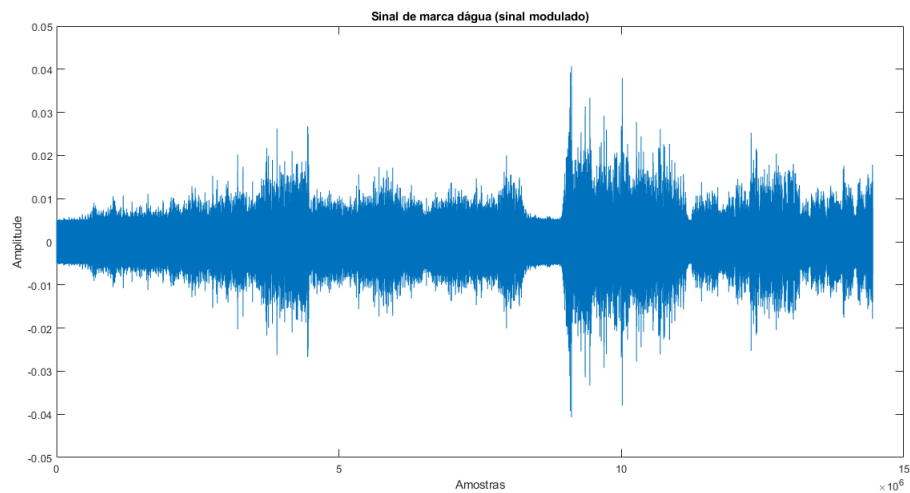
Figura 9. Sinal de áudio "BeethovenExp4.wav" no tempo.

b Nesse item, implementou-se o algoritmo para o ajuste de ganho passado no enunciado. O ganho é ajustado para cada *frame* correspondente a um bit, de forma que o ganho é calculado de acordo com o valor de beta e da margem de segurança. Assim, cada *frame* do sinal de marca d'água é multiplicado pelo ganho correspondente.

Pode-se observar os gráficos dos valores de ganho e o do sinal de marca d'água após o ajuste de ganho nas figuras 10 e 11.



**Figura 10.** Ganho calculado por *frame*.



**Figura 11.** Sinal de marca d'água após ajuste de ganho.

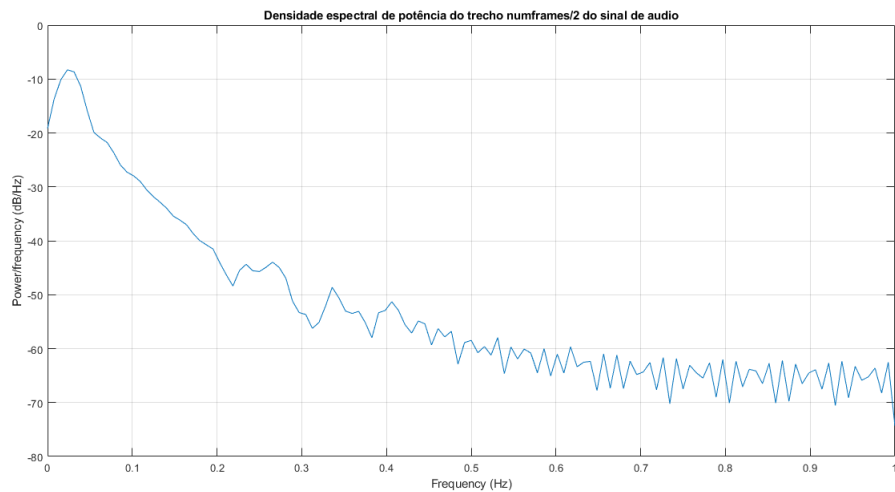
c Como não houve mudança na lógica de modulação do sinal, apenas o ajuste de ganho, foi possível utilizar o mesmo demodulador implementado no item anterior. Como esperado, nesse caso não houveram erros, o que acarretou em  $BER = 0$  e  $MSSIM = 1$ . Vale notar que, caso tivessem ocorridos erros na recuperação dos bits, seria possível ajustar o valor da margem de segurança até que não ocorressem erros. Além disso, no caso de aplicação com sinais de áudio é muito importante que a interferência gerada devido ao sinal de marca d'água não seja audível. Desse modo, apesar de que o erro obtido foi nulo, gerou-se um sinal de marca d'água audível, ou seja, esse sistema não seria realmente utilizado na prática, seriam necessárias mudanças para que o sinal de marca d'água se tornasse inaudível.

### 3. Tornando a marca d'água inaudível

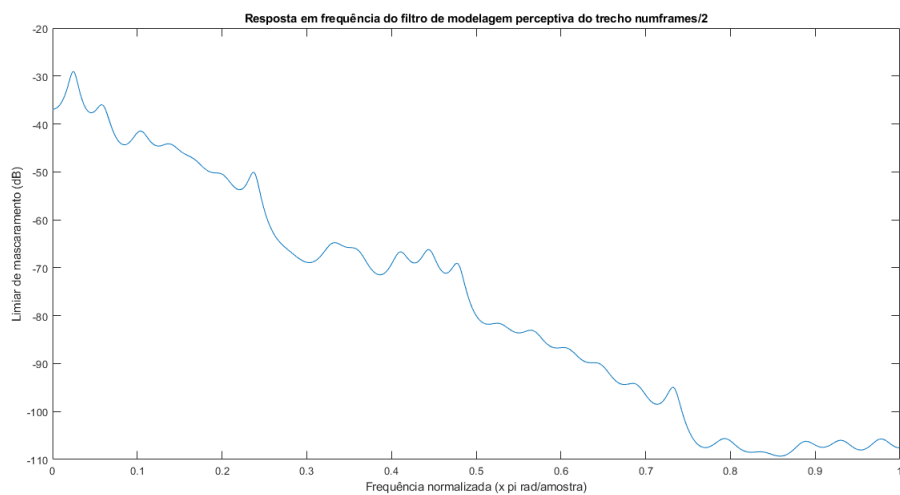
Esse exercício foi implementado no *script* "exp4\_3.m", entregue juntamente com este relatório. Nessa etapa, os *frames* do sinal de marca d'água foram passados por filtros auto-regressivos para que estivessem dentro do limite de percepção psicoacústica.

a Neste item foi implementado o emissor com a modelagem perceptiva. Para isso, foi substituído o trecho que calculava o ganho e o aplicava ao sinal de marca d'água por um *loop* que obtém o limiar de mascaramento para cada *frame*, gera o filtro de modelagem perceptiva e, por fim, filtra o *frame* da marca d'água.

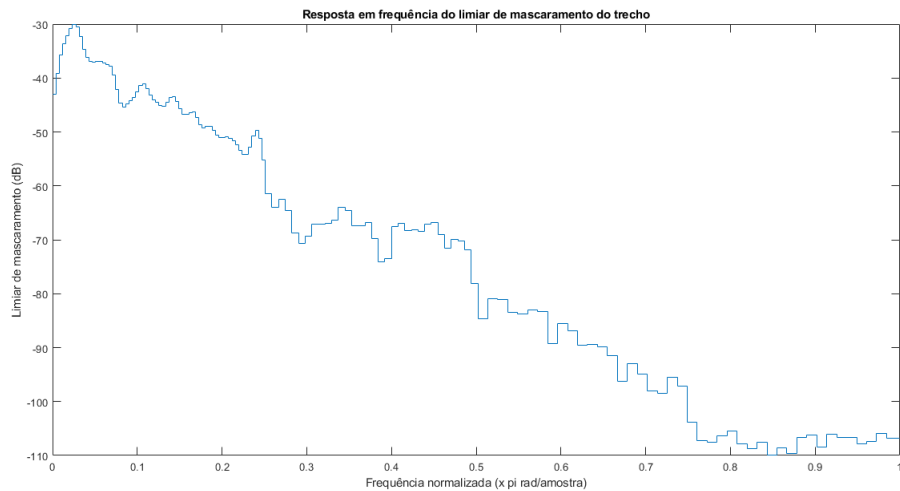
Com esse processo, o sinal resultante da soma do sinal de áudio com a marca d'água não teve interferência audível. A seguir, são apresentados a densidade espectral de potência de um trecho do sinal de áudio, a resposta em frequência do filtro de modelagem perceptiva e o limiar de mascaramento em função da frequência normalizada para esse trecho nas figuras 12, 13 e 14, respectivamente.



**Figura 12.** Densidade espectral de potência de um trecho do sinal de áudio.



**Figura 13.** Resposta em frequência de modelagem perceptiva para o trecho em questão.



**Figura 14.** Limiar de mascaramento do trecho em questão.

- b Neste item, foi adicionado um passo a mais no receptor, visto que é necessário passar cada trecho do sinal pelo inverso do filtro de modelagem perceptiva correspondente, antes de realizar a demodulação de fato. Contudo, como no caso prático, o sinal de áudio original não é conhecido, foi utilizado o sinal recebido para se obter os filtros de modelagem perceptiva. A taxa de erro obtida com esse novo sistema foi de  $BER = 0.2339$  e um índice de similaridade estrutural média de  $MSSIM = 0.3538$ . Esses resultados são muito ruins, há uma grande distorção na imagem recebida, como pode ser visto na figura 15.



**Figura 15.** Imagem recuperada do sinal de marca d'água com modelagem perceptiva.

#### 4. Marca d'água inaudível com BER baixa

Esse exercício foi implementado no *script* "exp4\_4.m", entregue juntamente com este relatório. Nessa etapa, foi utilizada a filtragem de Wiener para realçar os componentes espectrais de  $v(n)$  presentes em  $z(n)$ .

Em primeiro lugar, foi calculada a autocorrelação do sinal  $v(n)$ , por comodidade. Como em um caso real esse sinal não seria conhecido, deveria ser utilizado um sinal modulado arbitrário. Em seguida, foi calculada a matriz de autocorrelação de cada *frame* de 512 amostras e, com essa matriz, foram calculados os coeficientes do filtro de Wiener. Por fim, o *frame* foi filtrado e, caso a potência do sinal de saída fosse não nula, o trecho foi normalizado pela raiz da potência.

O sinal obtido após esse processo foi utilizado como entrada do demodulador projetado no item anterior. Dessa forma, ao se realçar as componentes espectrais de  $v(n)$  com a filtragem de Wiener, obteve-se  $BER = 0.0014$  e  $MSSIM = 0.9650$ . Pode-se observar a imagem recuperada na figura 16.





**Figura 16.** Imagem recuperada do sinal de marca d'água como- modelagem perceptiva e filtragem de Wiener.

Pode-se concluir que a taxa de erro e o índice de similaridade estrutural média são aceitáveis. Isso pode ser notado na imagem recuperada, que apresenta poucos erros.