

Mestrado Integrado em Engenharia Aeroespacial
Electrónica Geral

3º Trabalho de Laboratório

Filtro Adaptativo

Inês d'Ávila - 73872

Rita Rebelo - 75341

Eduardo Pires - 75929

Rafael Marques - 76076

Hélder Miranda - 77045

Docente: José Gerald
1º Semestre 2015/2016

Conteúdo

1	Introdução	2
1.1	Filtros Adaptativos	2
1.2	Algoritmos de Adaptação	3
1.2.1	Algoritmo LMS	3
2	Sistema de Transmissão de Dados	4
2.1	Gerador de Dados	4
2.2	Híbrido	5
2.3	Cancelador de Eco	7
2.4	ERLE	7
3	Realização do Sistema de Simulação	9
3.1	Teste do Baralhador de Dados	9
3.2	Teste do Híbrido	10
3.3	Teste do Cancelador de Eco	10
3.4	Teste do Sistema	12
3.4.1	Sem Ruído	12
3.4.2	Com Ruído	18
4	Conclusões	21

1 Introdução

Com este trabalho laboratorial pretende-se simular um filtro adaptativo FIR transversal, utilizando um algoritmo LMS. Pretende-se ainda que o filtro desenvolvido desempenhe as funções de um cancelador de eco. Para a realização deste trabalho utilizou-se o Simulink, ferramenta para simulação computacional do Matlab.

Um filtro adaptativo pode ser definido, de forma genérica, como sistemas cujos parâmetros variam no tempo, e que apresentam características como a adaptação automática, possibilidade de treino, auto-reparação e possibilidade de identificação de modelos. Assim, este tipo de filtros tem grande aplicabilidade em diversas áreas, como a identificação de sistemas, deteção de sinais, digitalização e síntese de voz e cancelamento de eco, que é precisamente a aplicação que se pretende explorar com este trabalho.

O objectivo final é a familiarização dos alunos com o peso computacional deste tipo de filtros, com a sua velocidade de adaptação, estabilidade de algoritmo, erro residual entre outras.

1.1 Filtros Adaptativos

Os filtros adaptativos podem ser definidos como sistemas, contínuos ou aleatórios, cujos parâmetros variam no tempo e que apresentam características tais como:

- Adaptação automática;
- Possibilidade de treino, para filtragens específicas;
- Não necessitam de procedimentos relativos à síntese;
- Possibilidade de identificar modelos, após um período de treino;
- Repararam-se a si próprios;
- Podem considerar-se sistemas não lineares de parâmetros variáveis no tempo;
- São mais difíceis de analisar que os filtros não adaptativos, mas possibilitam um melhor desempenho quando o sinal de entrada tem características desconhecidas ou variantes no tempo.

Atualmente, as áreas típicas de aplicação de filtragem adaptativa são:

- Igualização para transmissão de dados;
- Identificação de sistemas;
- Deteção de sinais;
- Digitalização e síntese de voz;
- Cancelamento de eco;

- Cancelamento de ruído acústico;
- Branqueamento espectral.

1.2 Algoritmos de Adaptação

Os algoritmos de adaptação são determinantes na construção e desenvolvimento de um filtro adaptativo, pois dele dependem a velocidade de convergência, o erro residual, a estabilidade do processo e o peso computacional.

A escolha do algoritmo é condicionada pela tecnologia disponível, no sistema em causa.

Existem duas grandes famílias de algoritmos para filtragem adaptativa: os algoritmos de gradiente e os gradientes de mínimos quadrados.

Neste trabalho implementou-se o algoritmo LMS (Least Mean Squares).

1.2.1 Algoritmo LMS

O algoritmo LMS, que pertence à família de algoritmos de gradiente, é dos algoritmos mais utilizados pela sua simplicidade e robustez.

Este algoritmo resulta de uma simplificação de um outro algoritmo (Algoritmo do Gradiente Determinístico): no cálculo do gradiente, toma-se o valor instantâneo do erro quadrático, y_k^2 , como estimativa da sua média estatística.

De acordo com o algoritmo LMS, os coeficientes são actualizados todas as iterações segundo a fórmula:

$$c_{i,k+1} = c_{i,k} + 2\mu y_k x_{k-i}$$

onde $c_{i,k}$ representa o coeficiente a baixada i para a iteração k , μ é o passo de adaptação que regula a rapidez de convergência, y_k é o erro instantâneo e x_{k-i} é a amostra do sinal e entrada do filtro que se encontra na baixada i para a iteração k .

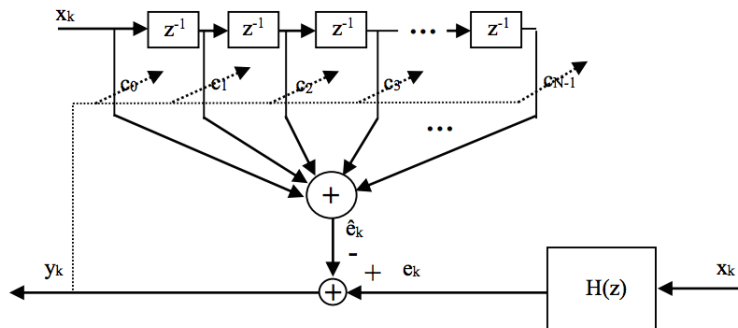


Figura 1: Estrutura do cancelador de eco

2 Sistema de Transmissão de Dados

Um sistema elementar de transmissão de dados em banda de base encontra-se representado na seguinte figura. O sistema é composto por um emissor local, uma linha de transmissão e um receptor local (idêntico ao emissor).

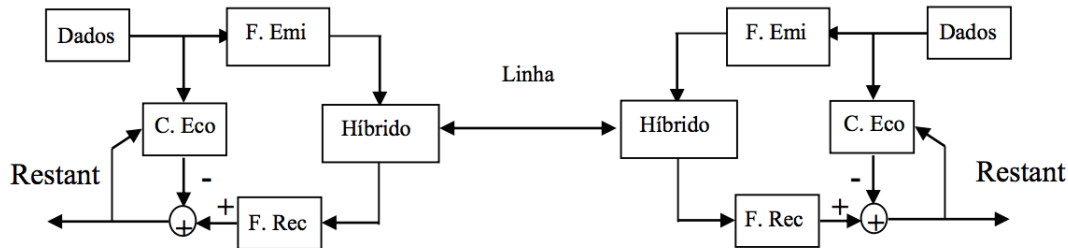


Figura 2: Sistema de Transmissão de Dados

Neste trabalho, pretende-se simular um sistema de transmissão de dados simplificado. Ou seja, não se consideram os filtro de emissão e de recepção, e existe apenas um filtro adaptativo responsável pela implementação do cancelador de eco. O circuito simplificado está esquematizado na figura YYY.

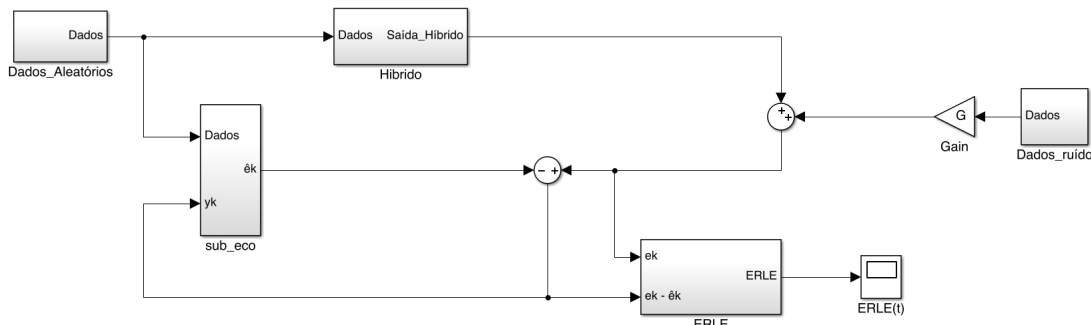


Figura 3: Diagrama de blocos do circuito simplificado

2.1 Gerador de Dados

Um *Linear feedback shift register*, LFSR, é um registrador cuja saída é uma combinação linear dos estados prévios. A utilização dos LFSR implica, geralmente, o uso de portas lógicas *exclusive-or*, XOR. Assim, a saída é uma combinação linear dos bits do registrador e, portanto, tem um número limitado de estados possíveis. Logo, a sequência gerada não é aleatória, mas sim pseudo-aleatória. Isto é, a sequência é aleatória dentro de um certo período mas, a partir daí, repete-se. Porém, utilizando um polinómio de realimentação adequado, é possível maximizar este período, aproximando a sequência de uma sequência aleatória.

No presente trabalho é necessário gerar duas seqüências de dados aleatórios. Assim, foram implementados dois LSFR, um para o emissor local, e outro para o remoto. Os polinômios de realimentação são dados, respetivamente, por, $1 + x^3 + x^5$ e $1 + x^5 + x^7$. O LSFR é alimentado por uma onda quadrada, com amplitude unitária.

Pretende-se que os dados gerados tenham o valor de ± 1 . Porém, os dados obtidos assumem o valor 0 e 1, pelo que é necessário um conversor de nível. Assim, aplica-se um ganho $K = 2$ aos dados obtidos e somando uma constante de -1 os dados gerados ficam com os valores pretendidos.

Na figura X e X+1 mostra-se o circuito do gerador de dados para o emissor local e remoto, respetivamente.

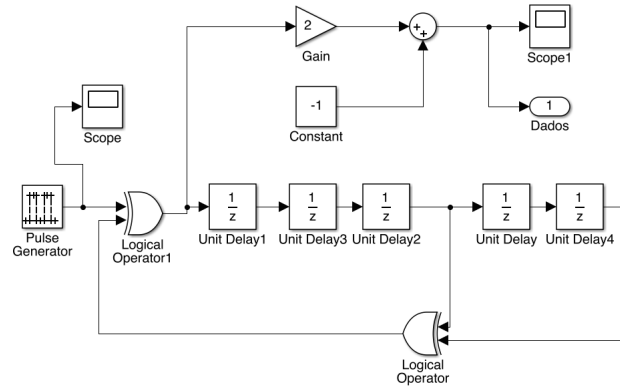


Figura 4: Gerador de dados do recetor local

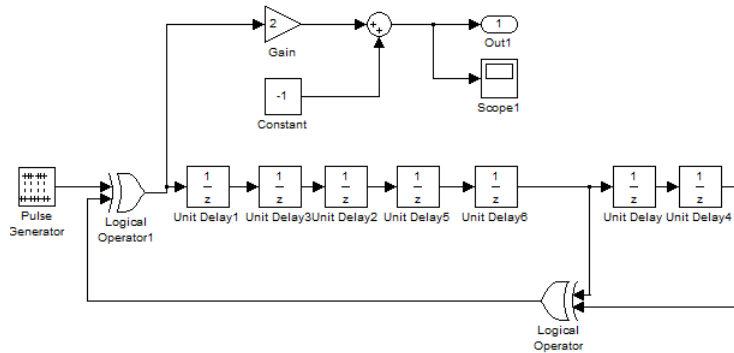


Figura 5: Gerador de dados do recetor remoto

2.2 Híbrido

Como se pode observar na figura 2, o sistema de transmissão de dados funciona a 4 fios para os emissores/receptores e a 2 fios na linha de transmissão. É então necessária uma adaptação de 4 para 2 fios e vice-versa para que o sistema possa funcionar correctamente. Para isso, utiliza-se um tipo de circuito que, pela sua tecnologia mista de implementação, é denominado circuito híbrido. Para a dimensionalização destes circuitos, utilizam-se critérios de compromisso, para que estes obedeçam às características médias dos sistemas onde são inseridos. Este tipo de dimensionalização vai ter

Tabela 1: Coeficientes do Híbrido

Baixada	Coeficiente
0	0
1	0.2
2	1
3	0.3
4	-0.4
5	-0.1
6	0.1
7	-0.05
8	-0.02
9	-0.01

como consequência uma adaptação imperfeita, da qual resulta eco, isto é, parte do sinal enviado é reflectido de volta para o emissor.

Para a implementação deste circuito híbrido, utiliza-se um filtro de estrutura idêntica à do filtro adaptativo, para que seja mais directa a análise dos resultados. Assim, foi criado um filtro FIR transversal de 9ª ordem cujos coeficientes se encontram representados na seguinte tabela:

Através do Simulink implementou-se então o seguinte circuito híbrido:

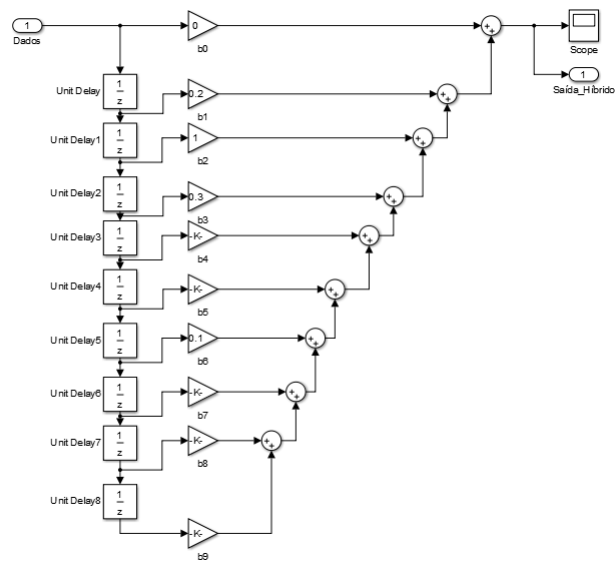


Figura 6: Diagrama de blocos do circuito híbrido implementado

Como se pode observar na figura anterior, a entrada do circuito são os dados aleatórios que se pretende transmitir e os valores das baixadas são os dados pela tabela XXX. De notar que, entre cada baixada, existe um atraso unitário.

2.3 Cancelador de Eco

Para a construção do filtro cancelador de eco, foi utilizado um filtro FIR transversal de 25ª ordem, adaptado pelo algoritmo LMS.

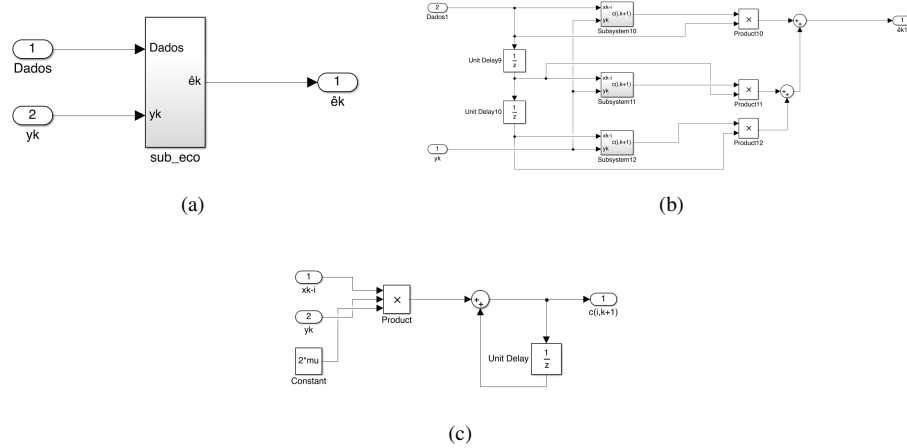


Figura 7: Implementação do cancelador de eco em Simulink

Assim, em primeiro lugar, foi possível executar o algoritmo LMS através do diagrama de blocos esquematizado na figura XXXc).

Em segundo lugar, o filtro adaptativo foi implementado através do circuito representado na figura XXX b), onde o sub-sistema amostrado corresponde ao circuito da figura XXX c). De notar que o esquema representa apenas uma simplificação do filtro a desenvolver, uma vez que este é de 25ª ordem.

Finalmente, e por motivos de simplificação e ordenamento gráfico, foi construído um sub-sistema, ver figura XXX a), que representa o circuito cancelador de eco.

2.4 ERLE

A performance de um cancelador de eco é medida através do parâmetro ERLE - "Echo Return Loss Enhancement" que é a quantidade de perda de sinal adicional aplicado pelo cancelador de eco, medida em décibéis (dB). No fundo, é definido pela razão entre os valores quadráticos médios do eco antes e depois do cancelamento, como se pode ver em seguida.

$$ERLE = \frac{E[e_k^2]}{E[(e_k - \hat{e}_k)^2]} \Big|_{dB} \quad (1)$$

Assim sendo, implementou-se o sistema da figura XXX para verificar a performance do cancelador de eco anteriormente implementado.

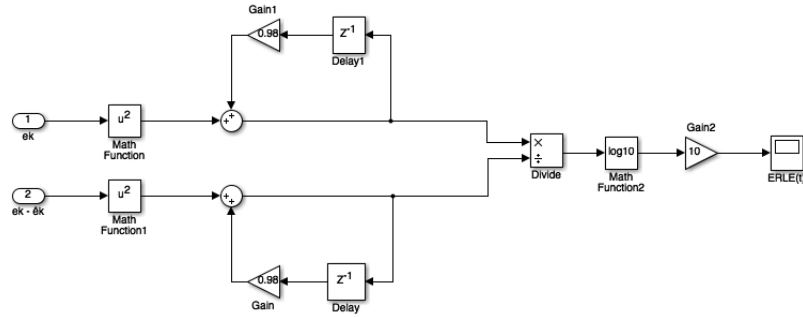


Figura 8: Diagrama de blocos do ERLE implementado

Ao analisar a figura anterior é possível verificar que o primeiro passo é colocar as entradas ao quadrado.

De seguida, é necessário fazer a média de ambas as entradas em separado, com um atraso unitário e um ganho, de forma a respeitar a equação (1). Para os sinais usados nestes sistemas de transmissão, é possível obter o valor da média recorrendo à realimentação implementada, uma vez que esta estima o ERLE, em cada momento. De notar que o ganho presente na realimentação, deve ser tão próximo quanto possível da unidade, para evitar grandes oscilações no valor instantâneo do ERLE.

Posteriormente, procedeu-se à divisão de ambas as médias e converteu-se o resultado para dB.

3 Realização do Sistema de Simulação

3.1 Teste do Baralhador de Dados

Para testar o funcionamento do gerador de dados, aplicou-se à entrada deste uma onda quadrada, cujo período é igual a 10 segundos. O sinal visualizado para o gerador de dados local encontra-se na figura ??, enquanto que o sinal visualizado no gerador de dados remoto se encontra na figura 10.

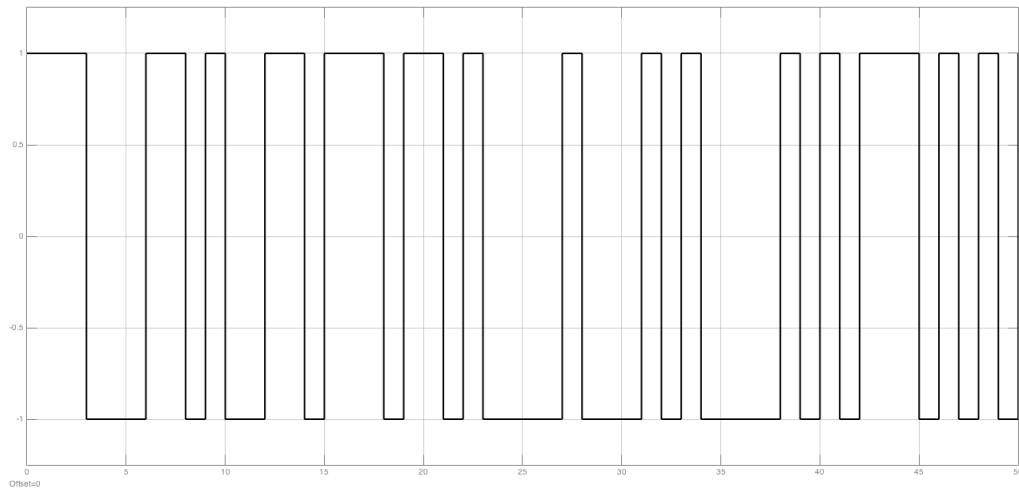


Figura 9: Sinal visualizado à saída do gerador de dados local

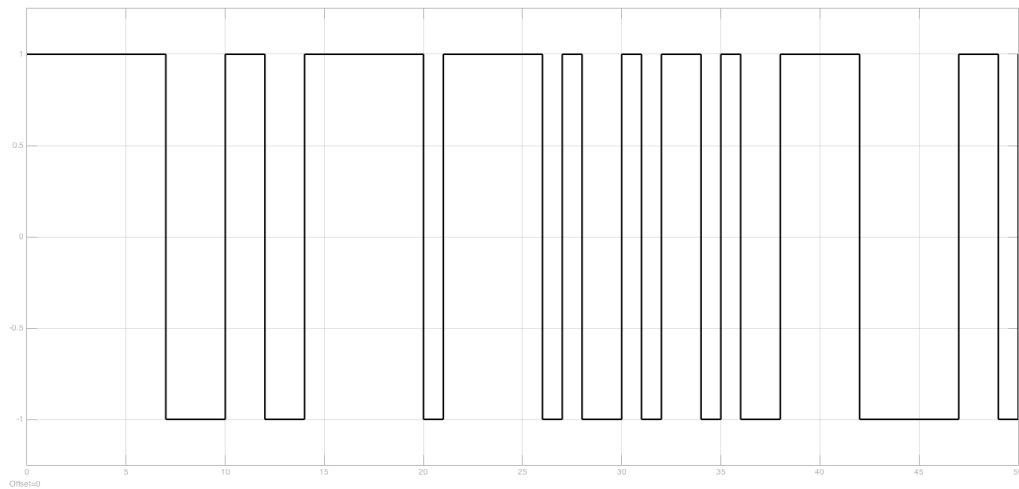


Figura 10: Sinal visualizado à saída do gerador de dados remoto

Verifica-se então que, em ambos os casos, é gerado um sinal pseudo-aleatório, tal como foi previsto teoricamente.

Por sua vez, a aplicação de um sinal permanente a zero, leva a que a saída seja constante, tomando neste caso o valor de -1, devido ao bloco conversor de nível (quando a onda à entrada não é nula). Sem este bloco, a saída seria naturalmente zero.

3.2 Teste do Híbrido

Para realizar o teste ao híbrido, foi aplicado um sinal constante à entrada do filtro que o implementa, obtendo-se o seguinte resultado:

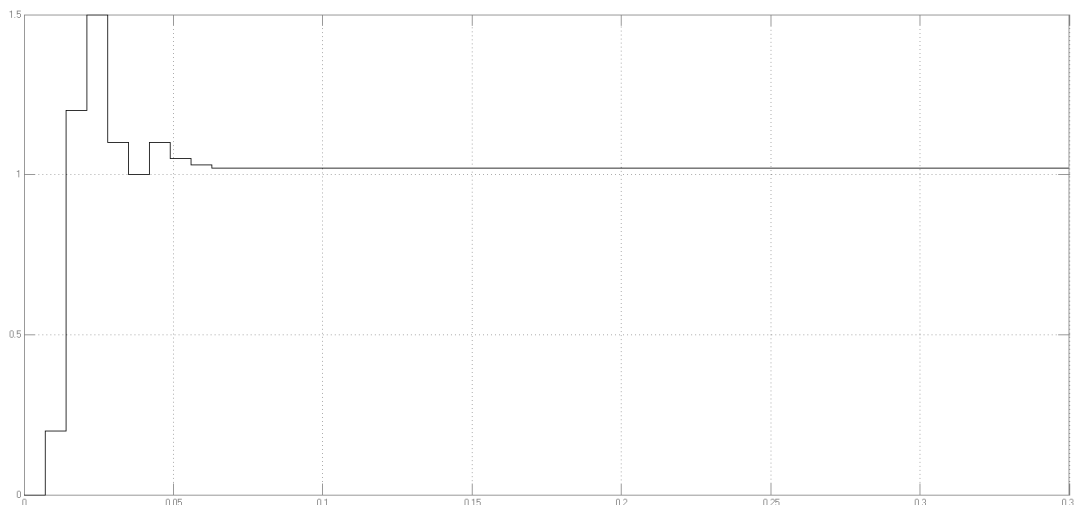


Figura 11: Resultado obtido para o teste do híbrido

Analisando a figura anterior, recorrendo às funcionalidades do osciloscópio virtual, verifica-se que a saída rapidamente tende para o valor de 1.02. Ora, este é precisamente o resultado da soma dos coeficientes do híbrido, que era o valor que se esperava obter na realização deste teste.

3.3 Teste do Cancelador de Eco

De forma a perceber o comportamento do cancelador de eco, foi realizado um teste. Este teste consistia em colocar, em paralelo com o cancelador, um filtro FIR transversal de 4ª ordem, com todas as baixadas nulas, à exceção da última, com coeficiente unitário. O esquema do circuito para realizar o teste encontra-se representado na imagem seguinte:

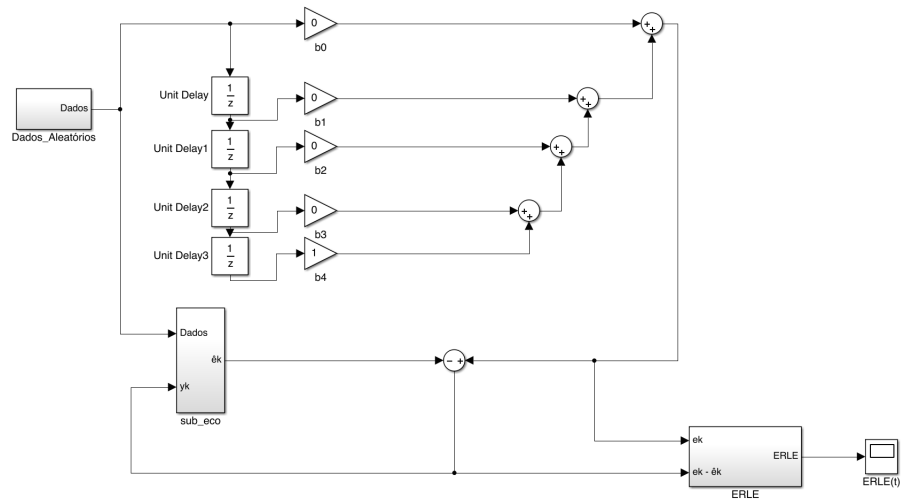


Figura 12: Circuito de Teste do Cancelador de Eco

Ao realizar a simulação do esquema de montagem acima amostrado, obtém-se os seguintes resultados:

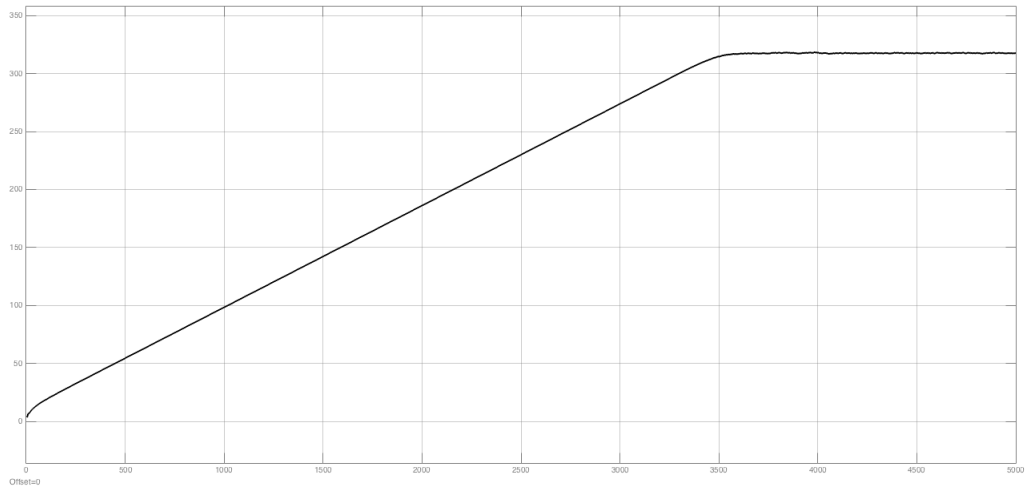


Figura 13: Evolução temporal do ERLE no teste do CE

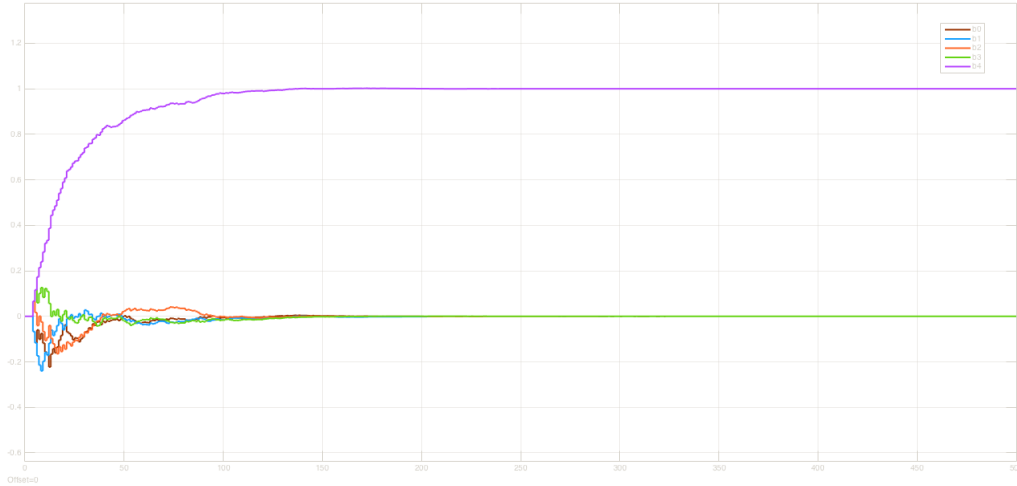


Figura 14: Evolução temporal dos coeficientes do filtro adaptativo no teste do CE

Por um lado, observa-se que o ERLE do cancelador de eco se desenvolve a uma taxa de crescimento constante, estabilizando em ≈ 320 dB, num período de ≈ 3500 s.

Por outro lado, verifica-se que, ao longo do tempo, o cancelador de eco vai ser capaz de identificar os coeficientes do filtro adaptativo de 4ª ordem, adoptando também ele, esses mesmos coeficientes para as suas baixadas. Através do gráfico representado na figura ZZZ, é possível corroborar que os quatro primeiros coeficientes do filtro cancelador de eco tendem para zero, enquanto o quinto coeficiente tende para um, como seria de esperar.

Conclui-se assim que o circuito cancelador de eco se encontra bem dimensionado e funcional.

3.4 Teste do Sistema

3.4.1 Sem Ruído

De forma a testar todo o sistema, foi inicialmente colocado a zero o ganho do amplificador do sinal remoto, para que não fosse introduzido ruído no sistema. Foram ainda definidos os seguintes parâmetros:

Start time: 0.0s

Stop time: 5000s

Passo de adaptação: $\mu = 0.03$

De seguida, realizou-se a simulação, obtendo-se a seguinte evolução do ERLE:

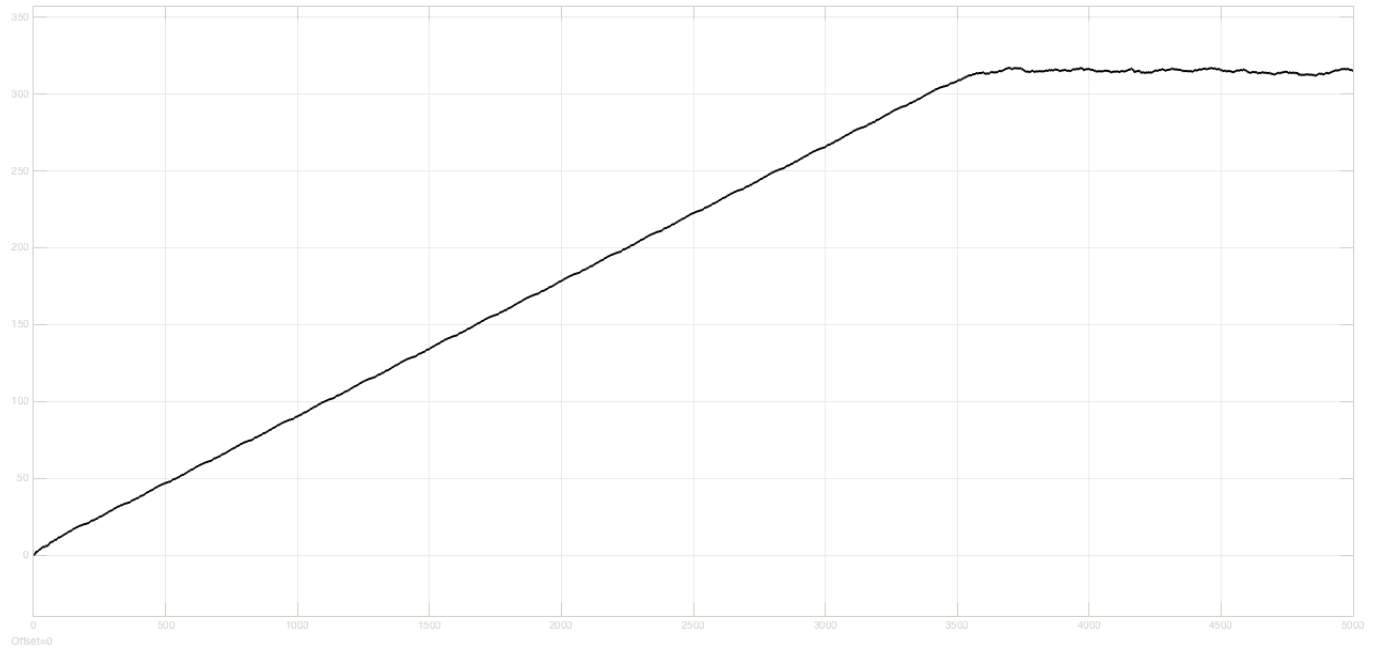


Figura 15: Evolução temporal do ERLE

Analisando o gráfico observa-se que este estabiliza num valor próximo de 320dB. Para que pudessem ser observados os coeficientes do filtro adaptativo, colocou-se um multiplexador, seguido de um osciloscópio virtual, para que se pudesse visualizar a evolução temporal das nove primeiras saídas do algoritmo LMS. Obteve-se assim a figura XXXX.

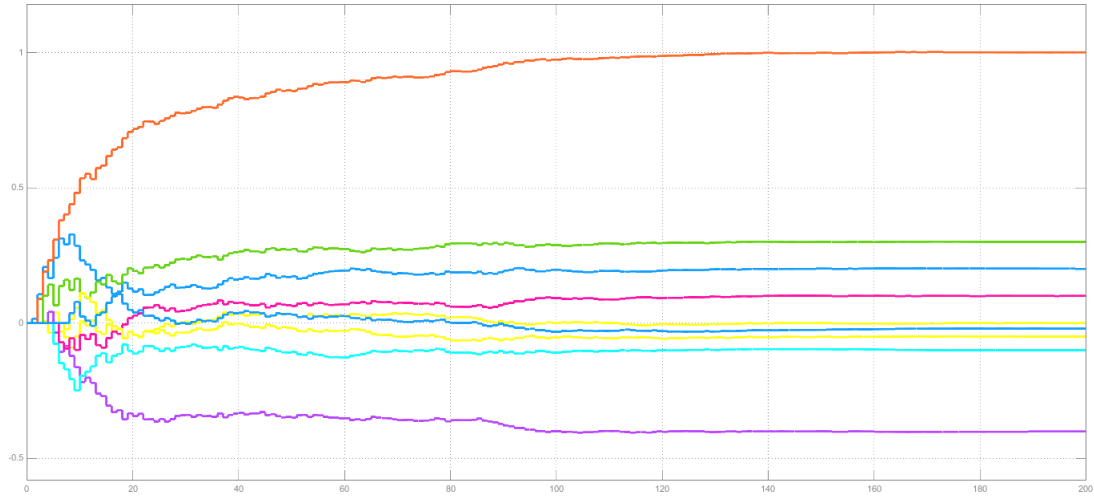


Figura 16: Evolução temporal dos coeficientes do filtro adaptativo

Observando a figura, conclui-se que os nove primeiros coeficientes do filtro adaptativo tendem para os valores dos coeficientes do híbrido, tal como era pretendido. Deduz-se então que o sistema está a funcionar em modo de identificação.

De seguida, foi alterado o valor do passo de adaptação, para um valor dez vezes menor que o interior, ou seja, $\mu = 0.003$. Obteve-se então uma nova evolução do ERLE e dos coeficientes do filtro adaptativo.

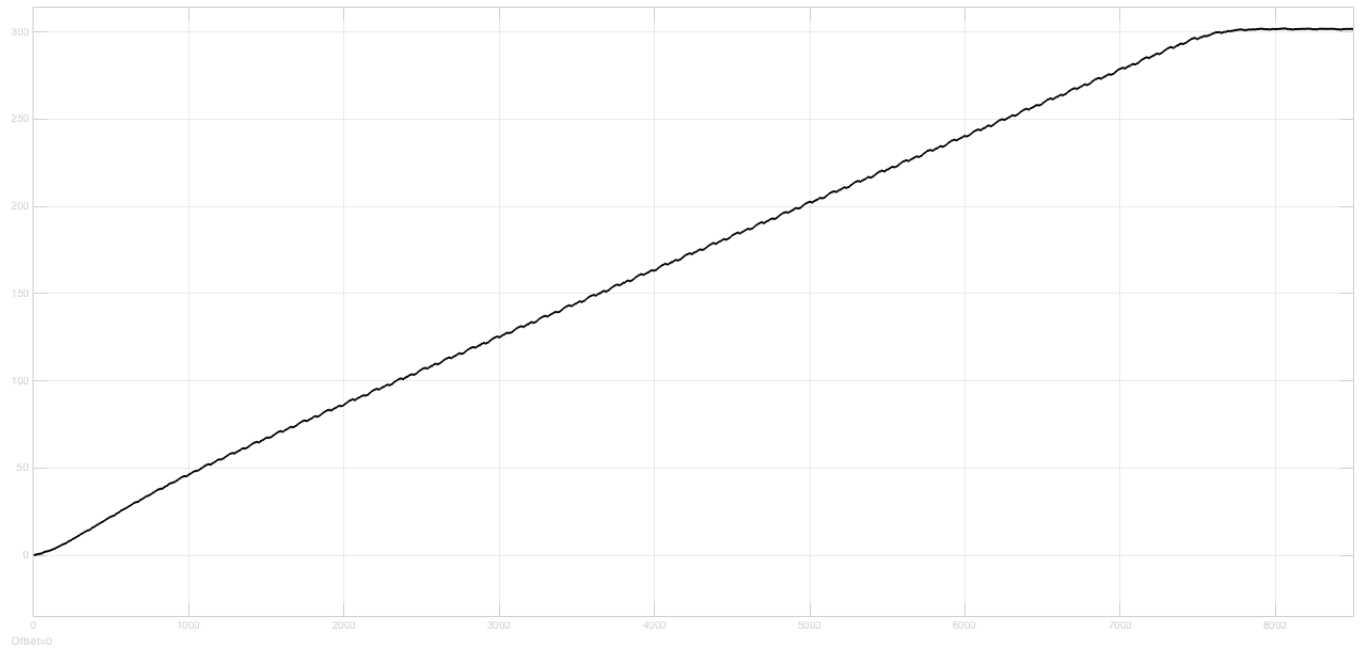


Figura 17: Evolução temporal do ERLE com $\mu=0.003$

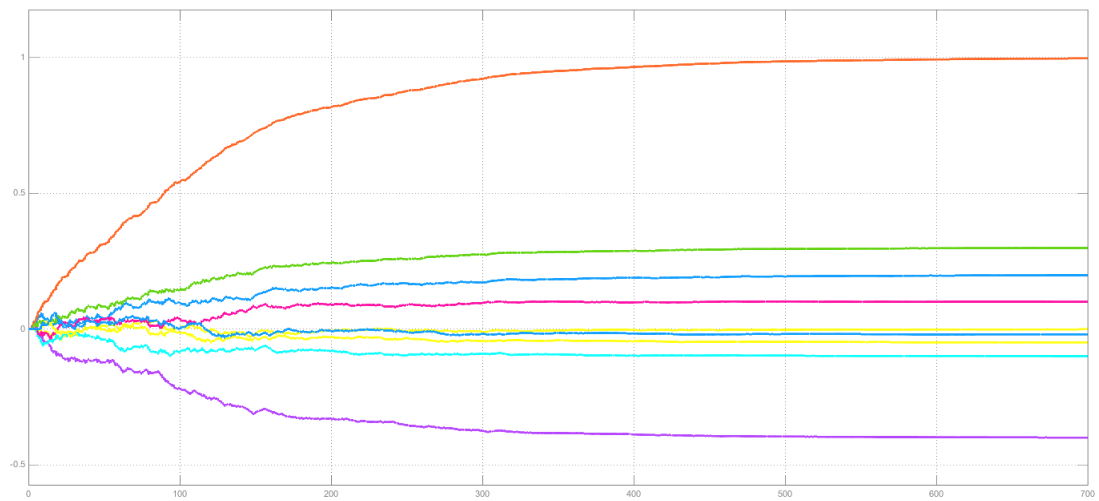


Figura 18: Evolução temporal dos coeficientes do filtro adaptativo com $\mu=0.003$

Facilmente se depreende que, utilizando um passo de adaptação menor, o tempo de estabilização, tanto do ERLE como dos coeficientes do filtro, aumenta.

No caso do ERLE, com $\mu=0.03$ o tempo de estabilização era de aproximadamente 3500s e com $\mu=0.003$ passa para 7500s. Além disso, o valor no qual este estabiliza também é alterado e decresce para aproximadamente 300dB. Este facto ocorre pois, ao diminuir μ , também se diminui a rapidez de convergência, ou seja, o sistema torna-se incapaz de reagir a tempo, originando uma estabilização num valor inferior.

Por outro lado, no caso dos coeficientes do filtro adaptativo, o tempo de estabelecimento é aproximadamente 120s no primeiro caso e passa para 500s com μ dez vezes menor. No entanto, os valores no qual estabilizam não se alteram e continuam a ser os valores dos coeficientes do híbrido.

De forma a determinar o valor máximo do passo de adaptação que ainda conduz a um processo estável, variou-se o valor deste, começando em 0.03. Obtiveram-se as seguintes figuras:

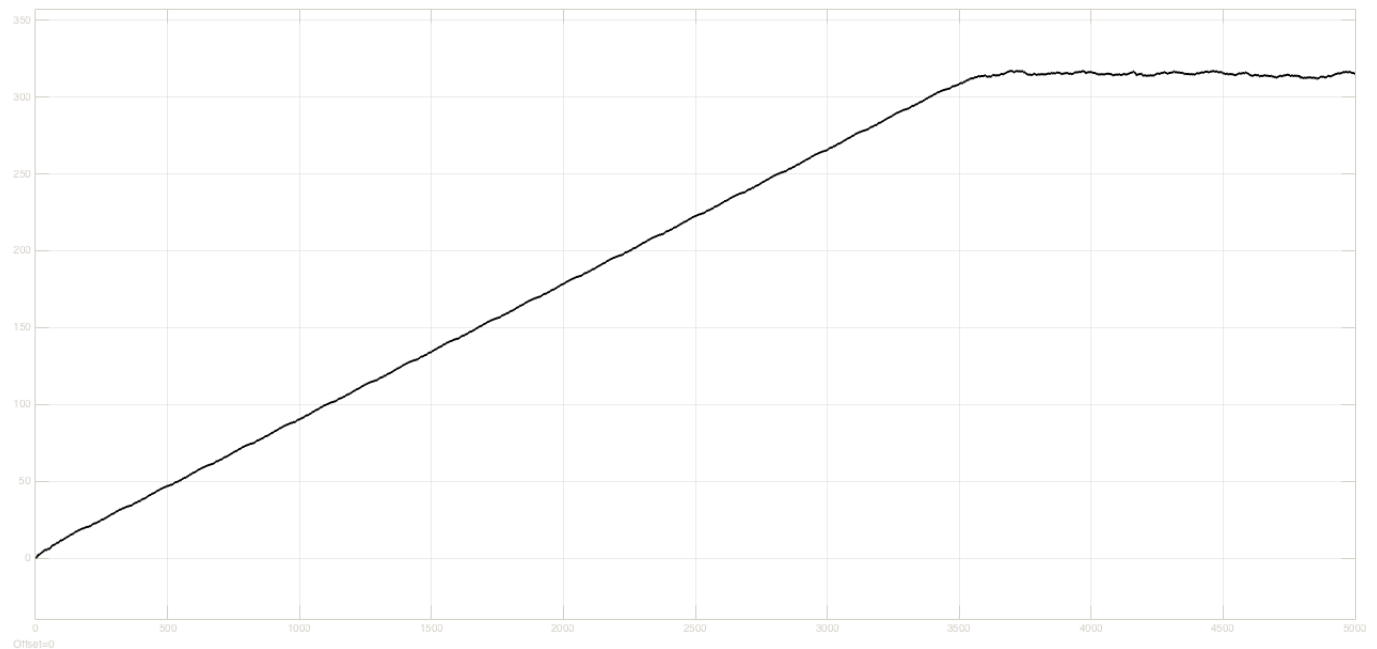


Figura 19: Evolução temporal do ERLE com $\mu=0.03$

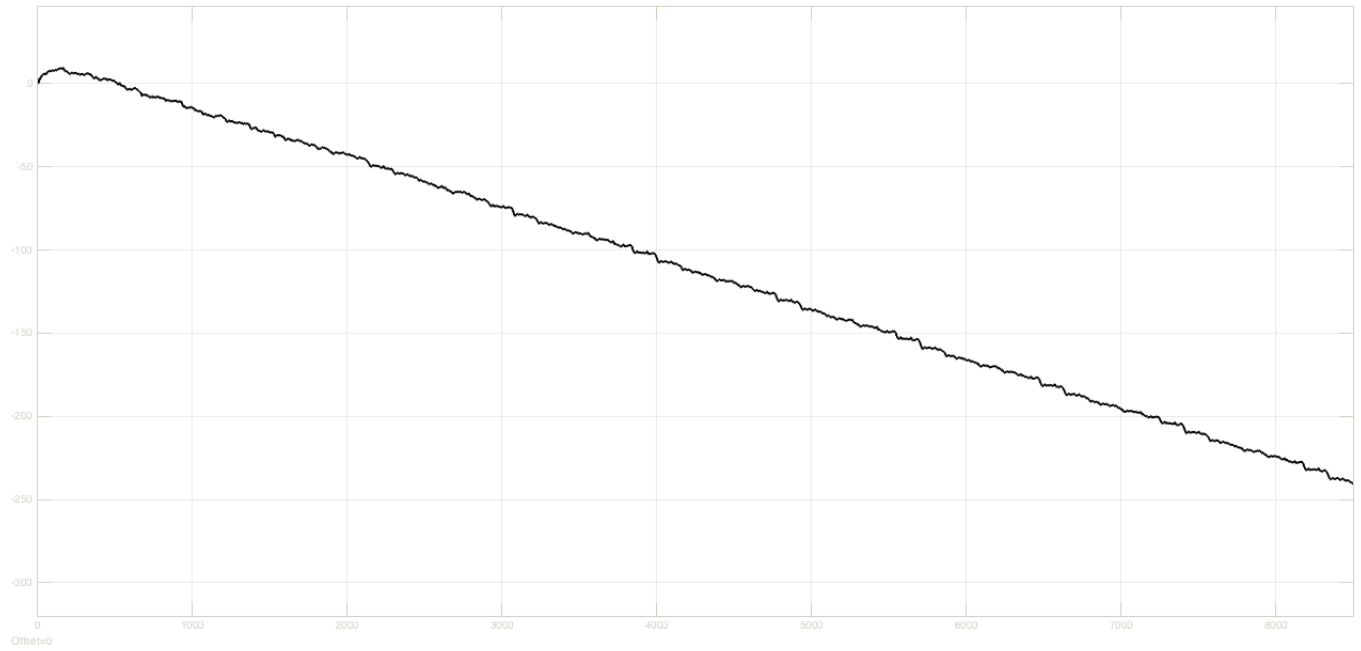


Figura 20: Evolução temporal do ERLE com $\mu=0.04$

Como se pode verificar pelo gráfico da figura ZZZ, o valor $\mu = 0.04$ conduz a um processo instável.

Conclui-se então, que $\mu_{max} = 0.036$ é o maior valor de μ que ainda conduz a um processo estável.

No caso do μ_{max} obtém-se:

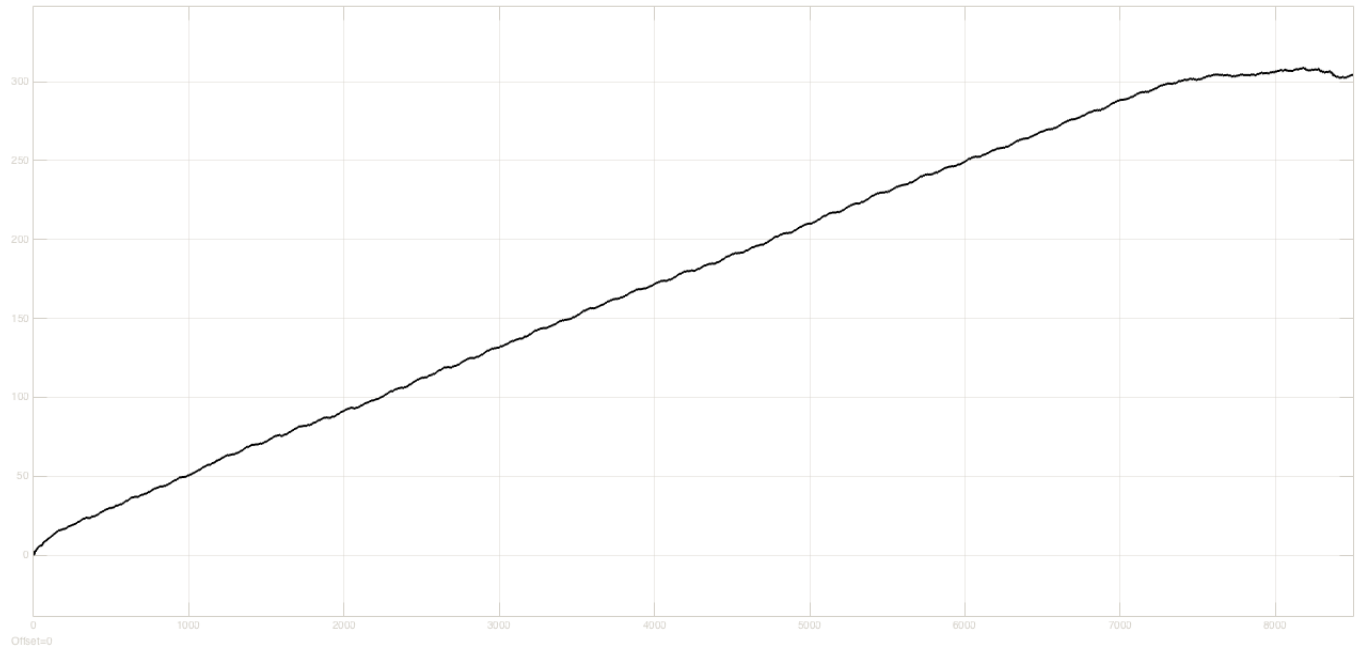


Figura 21: Evolução temporal do ERLE com $\mu=0.036$

3.4.2 Com Ruído

Pretende-se agora simular o sistema de cancelamento de eco na presença de ruído, uma vez que não existem sistemas perfeitos. Para tal, foram utilizados os mesmos parâmetros descritos no teste sem ruído, à exceção do valor de ganho G , e foram efectuados os mesmos testes descritos anteriormente. Neste trabalho laboratorial, o ruído será simulado através do gerador de dados remotos, e, como tal, devemos introduzir um ganho G ao sistema, ver figura XXX CIRCUITO SIMPLIFICADO.

Com $G=0.1$, obtém-se os seguintes resultados:

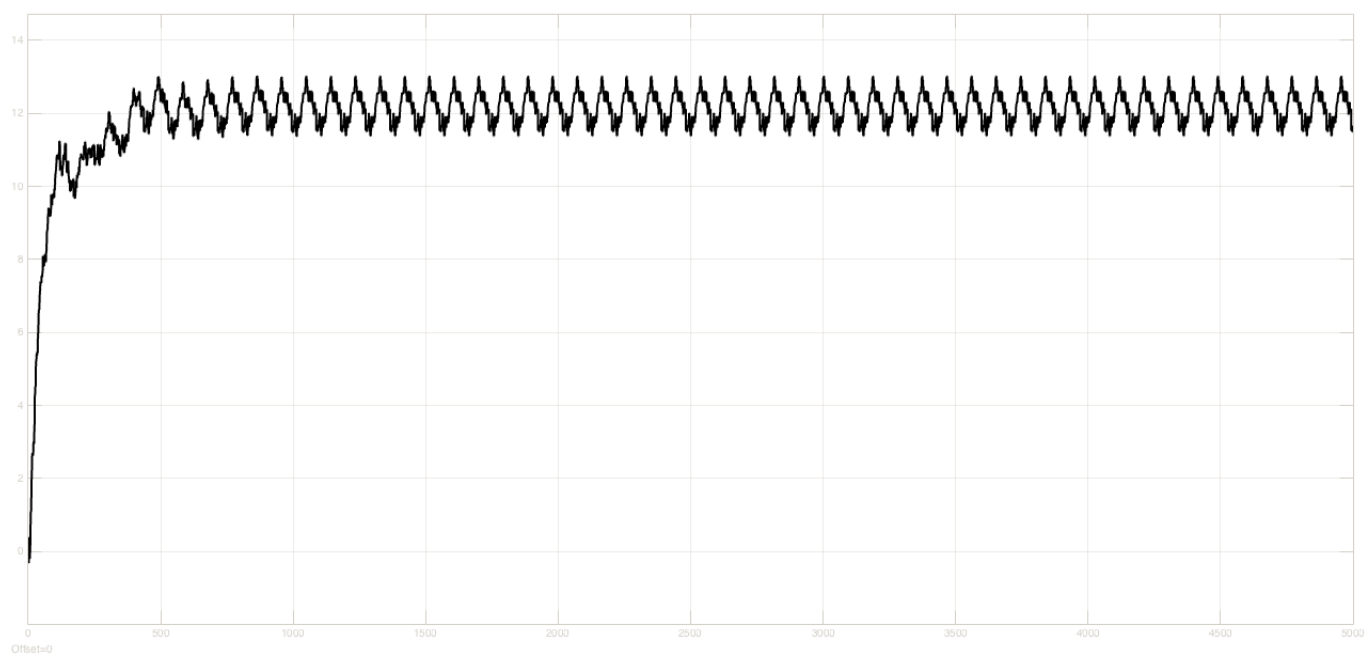


Figura 22: Evolução temporal do ERLE com $G=0.1$

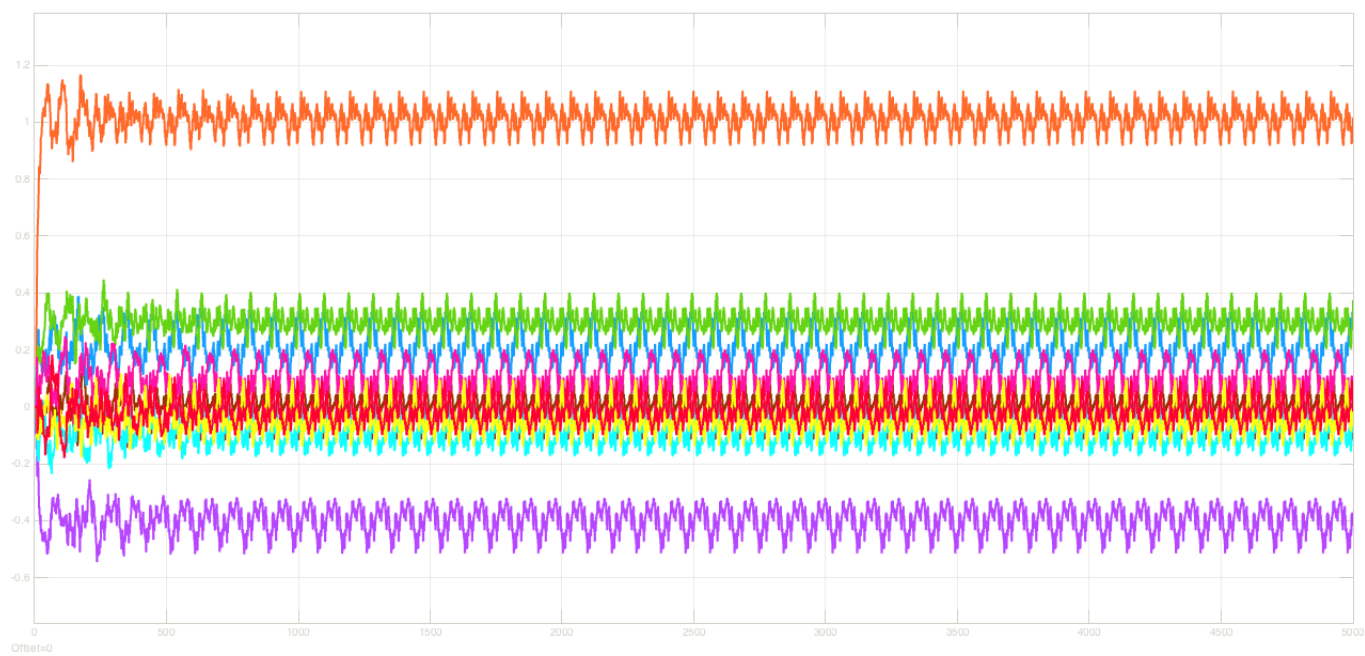


Figura 23: Evolução temporal dos coeficientes do filtro adaptativo no Teste do CE

Verifica-se que a presença de ruído é bastante notória.

Assim, em primeiro lugar, observa-se um decréscimo no valor do ERLE. Com a introdução de ruído, este estabiliza a 12dB, enquanto antes estabilizava a 300dB. Esta redução pode dever-se ao facto do cancelador de eco não estar preparado para receber ruído, sabendo apenas processar o eco originado pelo híbrido.

Em segundo lugar, observa-se que os coeficientes do filtro adaptativo tendem para os valores esperados, sofrendo porém oscilações periódicas, causadas pela introdução do gerador de dados remotos.

Com $G=0.4$ e $\mu_{max} = 0.036$, obtém-se o seguinte resultado:

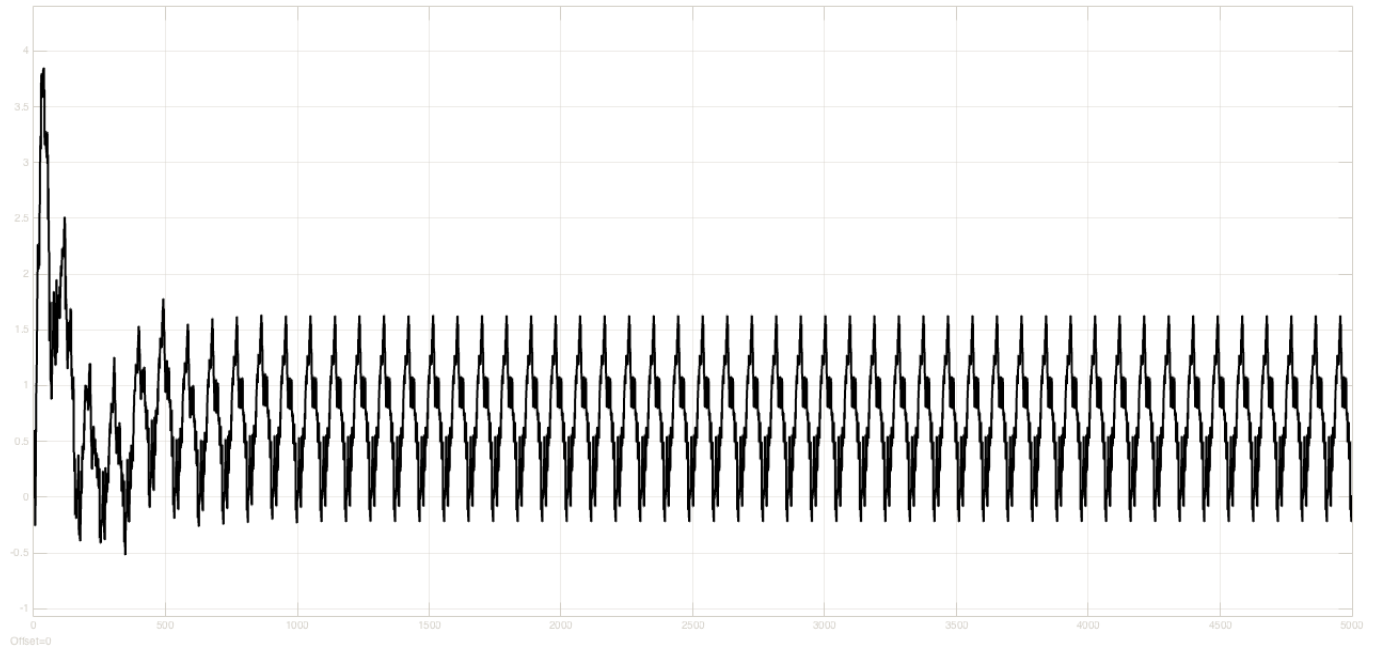


Figura 24: Evolução temporal do ERLE com $G=0.4$

Este resultado demonstra a total incapacidade do filtro para processar sinais muito ruidosos. Ou seja, quando o ruído se torna mais elevado, o filtro não consegue cancelar o eco, falhando assim na sua função de identificação.

Para um melhor processamento de sinal, deve-se, se possível, aumentar a ordem do filtro, tanto como possível. No entanto, visto que não existem filtros de ordem infinita, estamos sempre limitados pela quantidade de ruído presente no sistema.

4 Conclusões