

INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO

ENGENHARIA AEROESPACIAL

ELETRÓNICA GERAL

Filtro Adaptativo

Ricardo ALMEIDA 76106

Pedro MARTINS 75565

Pedro CORREIA 75300

Gonçalo AFONSO 75924

Quarta-Feira, 9 de Dezembro de 2015

Conteúdo

Introdução	2
Análise do sistema de teste	3
Gerador de dados	3
Híbrido	4
Cancelador de Eco	5
Bloco Ganho	7
ERLE ("Echo Return Loss Enhancement")	7
Realização do Sistema de Simulação	8
Teste do Baralhador de Dados	8
Teste do Híbrido	13
Teste do Cancelador de Eco	14
Teste do Sistema	16
Sem Ruído	16
Com Ruído	20
Conclusão	23

Introdução

O presente trabalho teve como objetivo a simulação em Matlab/Simulink de um filtro adaptativo FIR transversal com algoritmo LMS. Para tal, implementou-se um sistema de teste simplificado constituído pelos seguintes elementos:

- Gerador de dados
- Híbrido
- Cancelador de Eco
- Bloco Ganho
- ERLE ("Echo Return Loss Enhancement")

O diagrama Simulink produzido encontra-se na figura 1:

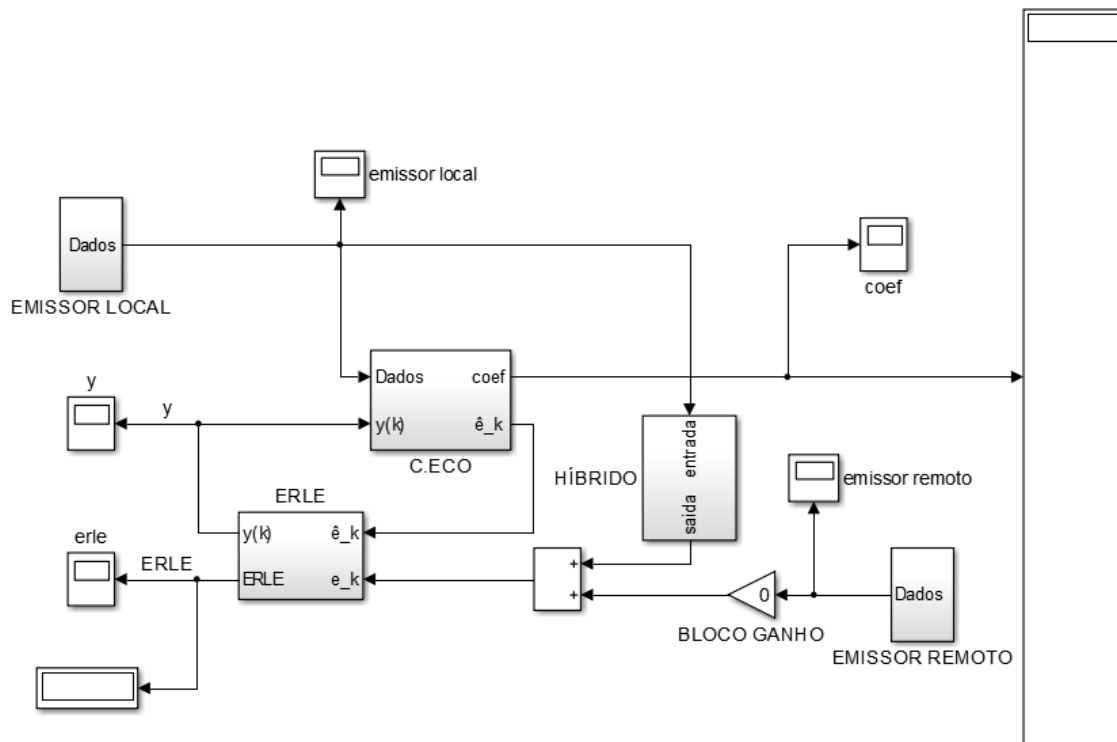


Figura 1: Sistema de teste implementado

Análise do sistema de teste

Nesta secção serão analisados cada um dos blocos em particular, mostrando o que constitui cada um dos mesmos.

Gerador de dados

O gerador de dados aleatórios é composto por um gerador de onda quadrada seguido de um baralhador de dados. De modo a que a saída seja ± 1 , introduziu-se um conversor de nível, como aquele que se encontra na figura 2. Assim, garante-se que se a entrada for 0, a saída será -1 e se a entrada for 1 a saída será 1:

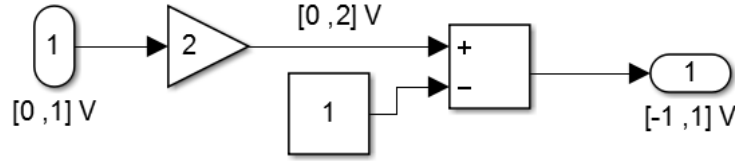


Figura 2: Conversor de nível

O sistema possui dois geradores de dados semelhantes: um que corresponde ao emissor local, outro que corresponde ao emissor remoto. A única diferença entre um e outro reside na operação que cada um realiza:

$$\begin{cases} \text{emissor local: } y(t) = x(t) \oplus y(t - 3T) \oplus y(t - 5T) \\ \text{emissor remoto: } y(t) = x(t) \oplus y(t - 5T) \oplus y(t - 7T) \end{cases} \quad (1)$$

Onde T representa o período dos dados (considerou-se $T = 1$) e \oplus a operação lógica "ou exclusivo". Os blocos dos emissores de dados local e remoto encontram-se esquematizados nas figuras 3 e 4 respetivamente:

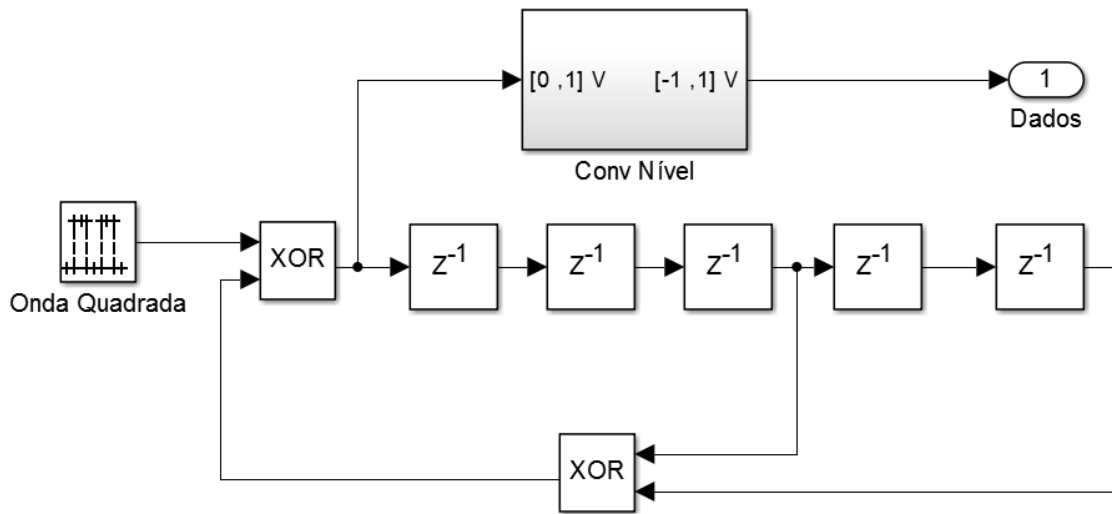


Figura 3: Emissor local

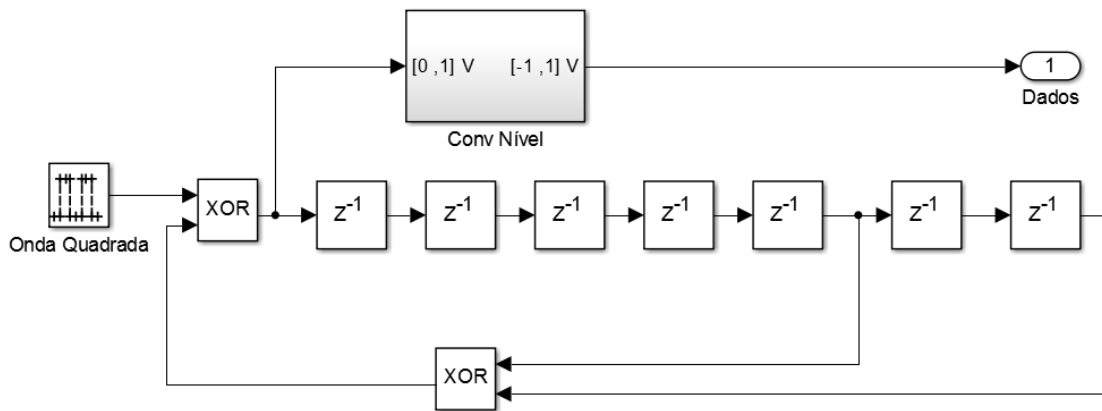


Figura 4: Emissor remoto

Híbrido

O circuito do híbrido é realizado por um filtro FIR transversal de 9ª ordem.

Os coeficientes do híbrido foram retirados da Tabela 2 do guia de laboratório. Com estes dados fez-se o circuito visível na figura 5:

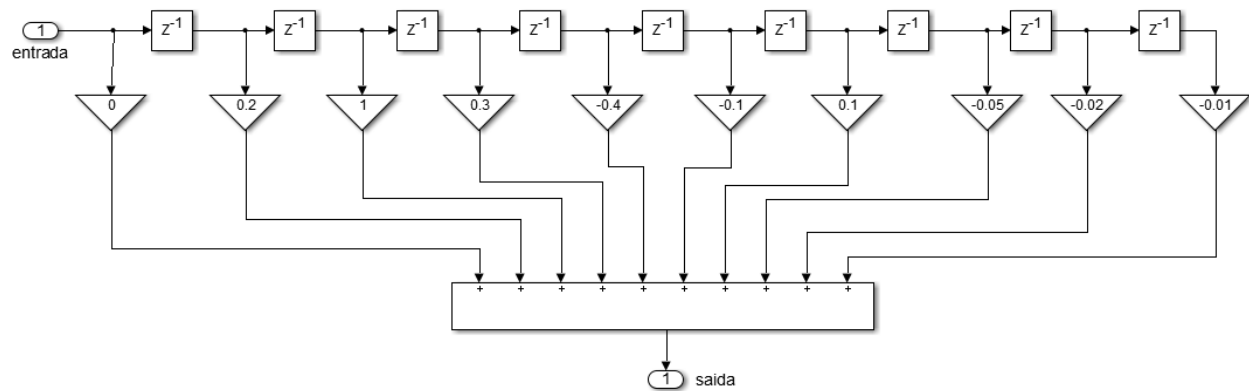


Figura 5: Híbrido

Cancelador de Eco

O cancelador de eco foi realizado com um filtro FIR transversal de 25^a ordem:

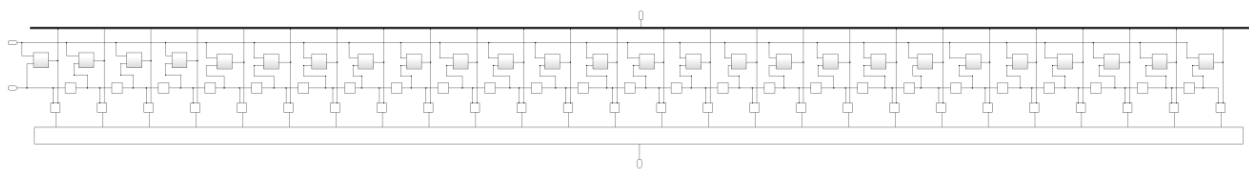


Figura 6: Vista geral do cancelador de eco

De uma forma detalhada, o cancelador está montado com uma sequência que se repete até ao 25^o bloco de atraso:

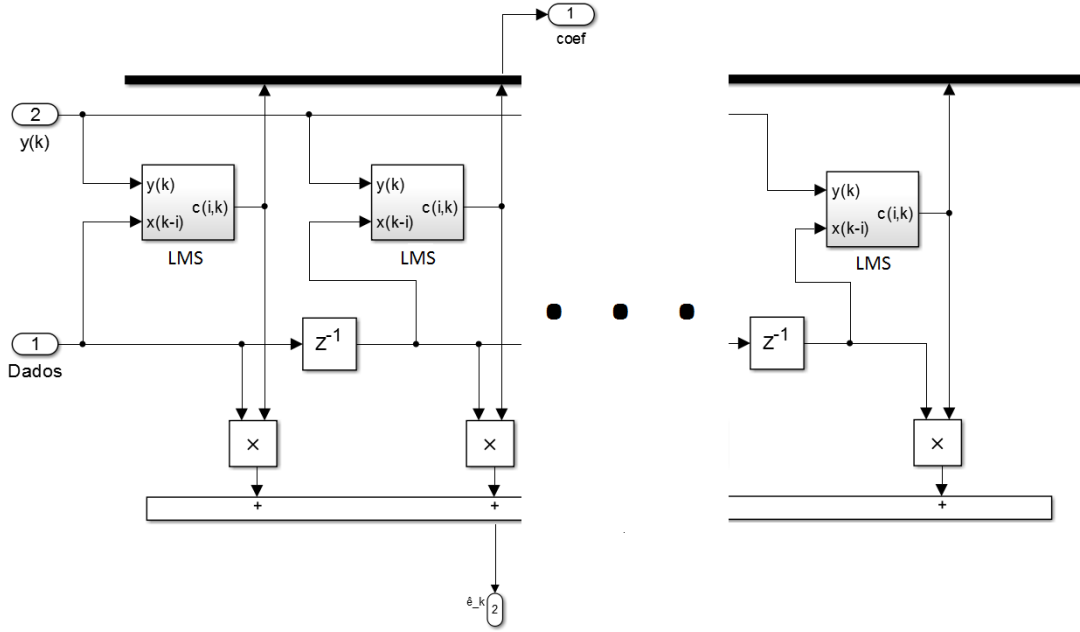


Figura 7: Esquema base do cancelador de eco

Cada um dos 26 coeficientes é atualizado de acordo com o algoritmo LMS:

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

O coeficiente $c_{i,k}$ representa o coeficiente da 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 de entrada do filtro que se encontra na baixada i para a iteração k . Assim, cada um dos 26 blocos LMS que compõem o cancelador (alguns deles visíveis na figura 7) foram implementados da seguinte forma:

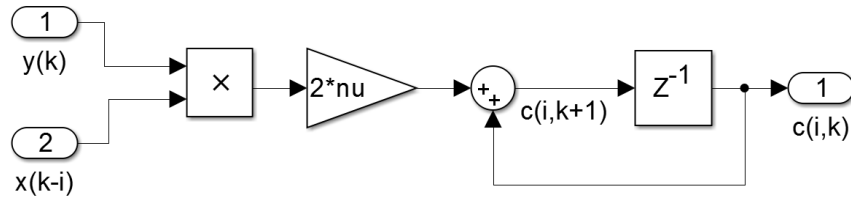


Figura 8: Bloco que implementa o algoritmo LMS

Bloco Ganho

Este bloco serve para atenuar o sinal remoto, uma vez que a amplitude deste é bastante inferior à do sinal de eco. Se $G = 0$ o sistema não tem ruído. A inclusão de ruído ($G \neq 0$) corresponde a considerar o sinal remoto.

ERLE ("Echo Return Loss Enhancement")

Este bloco tem como função medir o "Echo Return Loss Enhancement", sendo calculado de acordo com a seguinte equação:

$$ERLE = \left[\frac{E[e_k^2]}{E[(e_k - \hat{e}_k)^2]} \right]_{dB} \quad (3)$$

O ERLE representa o quociente entre a potência do sinal desejado e a potência do sinal residual. Para efeitos práticos, o parâmetro ERLE é uma medida da atenuação do eco, sendo tanto maior quanto mais elevada for a atenuação conseguida pelo cancelador de eco. O cálculo é obtido em *simulink* através do diagrama da figura 9.

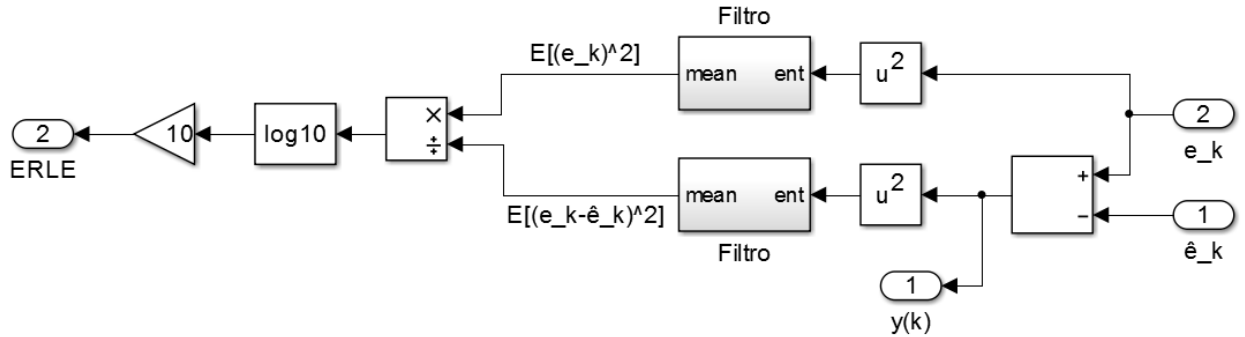


Figura 9: Bloco de cálculo do ERLE

A média (valor esperado) é calculada através de um filtro passa-baixo de 1ª ordem, que seleciona apenas a componente de frequência contínua do sinal de entrada, representado na figura anterior pelo bloco "Filtro". A implementação do mesmo encontra-se na figura 10.

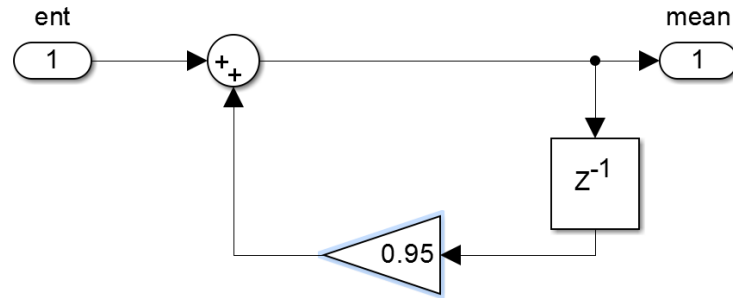


Figura 10: Filtro passa-baixo para cálculo do valor esperado

Realização do Sistema de Simulação

Teste do Baralhador de Dados

Gerador Local

Para o gerador de dados local com entrada de uma onda quadrada, esquematizado na figura 3, observou-se o seguinte gráfico, à saída do conversor de nível:

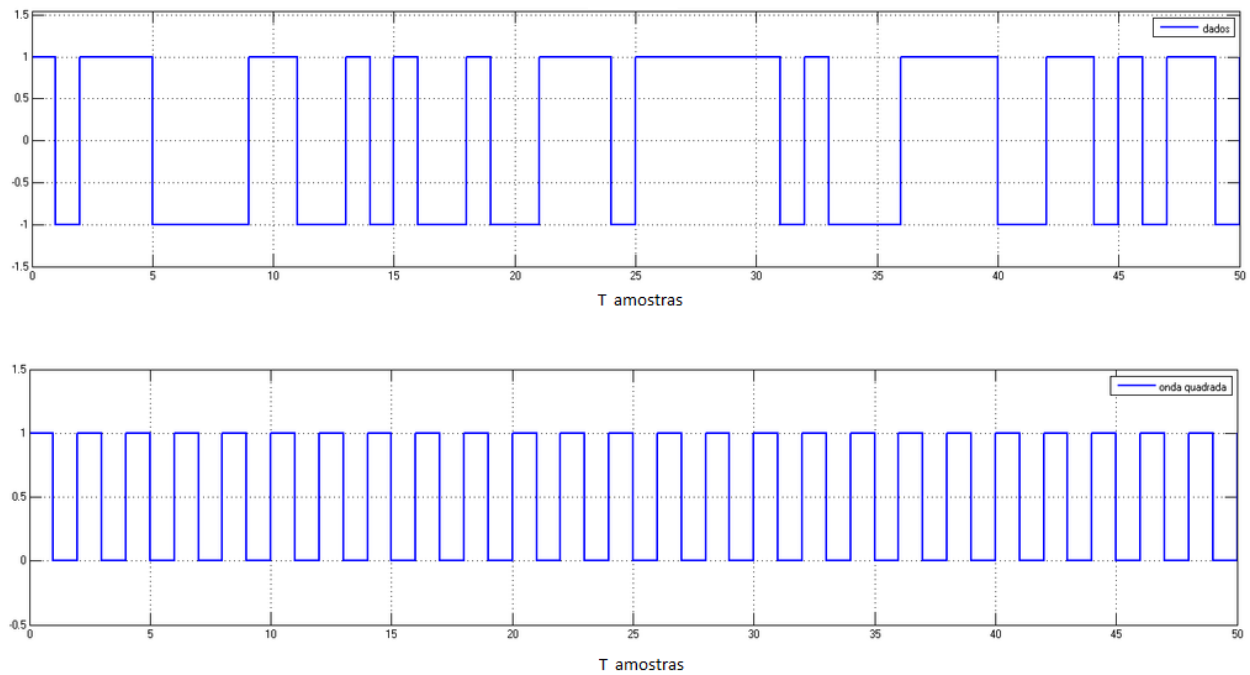


Figura 11: Saída do gerador local (em cima), para uma onda quadrada à entrada (em baixo)

De seguida, alterou-se o esquema da figura 3 e substituiu-se a onda quadrada pelo valor constante zero. À saída, obteve-se o seguinte gráfico, para condições iniciais dos atrasos nulas:

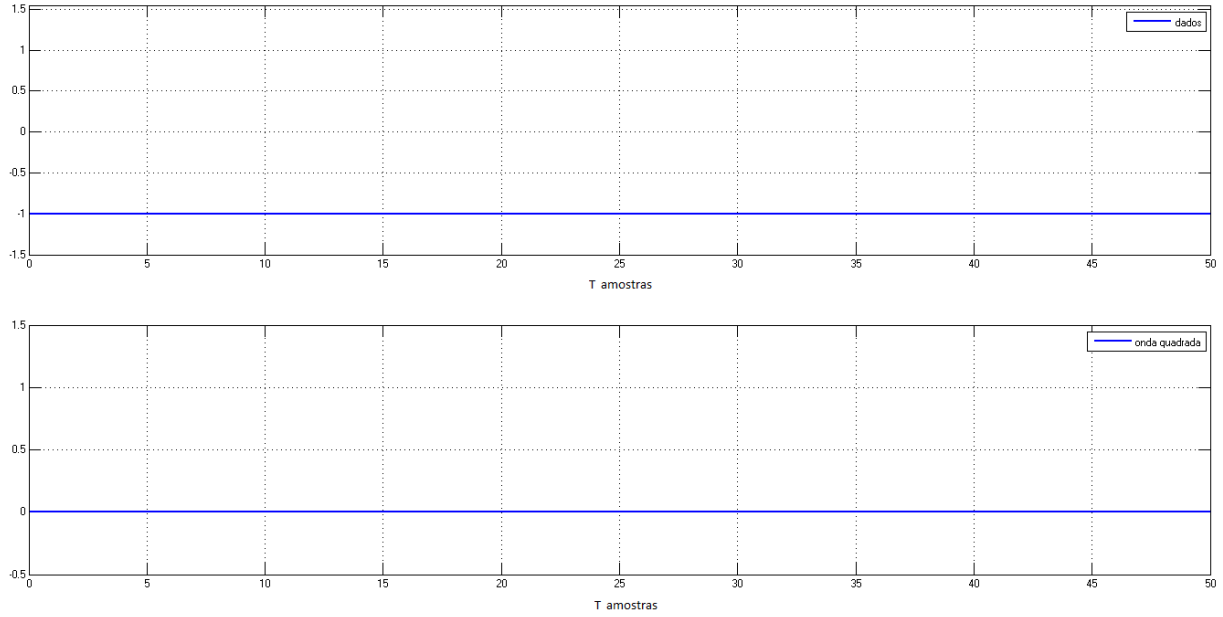


Figura 12: Saída do gerador local (em cima), para o valor 0 à entrada (em baixo), com condições iniciais nulas nos atrasos

Uma vez que a entrada é sempre 0, o valor à saída de cada amostra atrasada é também 0, pelo que se obtém para o valor lógico da operação:

$$y(t) = x(t) \oplus (y(t - 3T) \oplus y(t - 5T)) = 0 \oplus (y(t - 3T) \oplus y(t - 5T)) = (y(t - 3T) \oplus y(t - 5T)) \quad (4)$$

Que depende apenas das condições iniciais dos atrasos. Uma vez que as condições iniciais são nulas, a saída é $y(t) = 0 \oplus (0 \oplus 0) = 0$. Passando o conversor de nível este sinal toma o valor constante -1, como comprovado pelo gráfico da figura 12.

Para condições iniciais dos atrasos não nulas o valor obtido à saída do conversor de nível já não apresenta um valor constante. Por exemplo para:

$$\left\{ \begin{array}{l} y(t - T) = 0 \\ y(t - 2T) = 1 \\ y(t - 3T) = 0 \\ y(t - 4T) = 1 \\ y(t - 5T) = 0 \end{array} \right. \quad (5)$$

Obtém-se o sinal à saída do conversor de nível presente na figura 13.

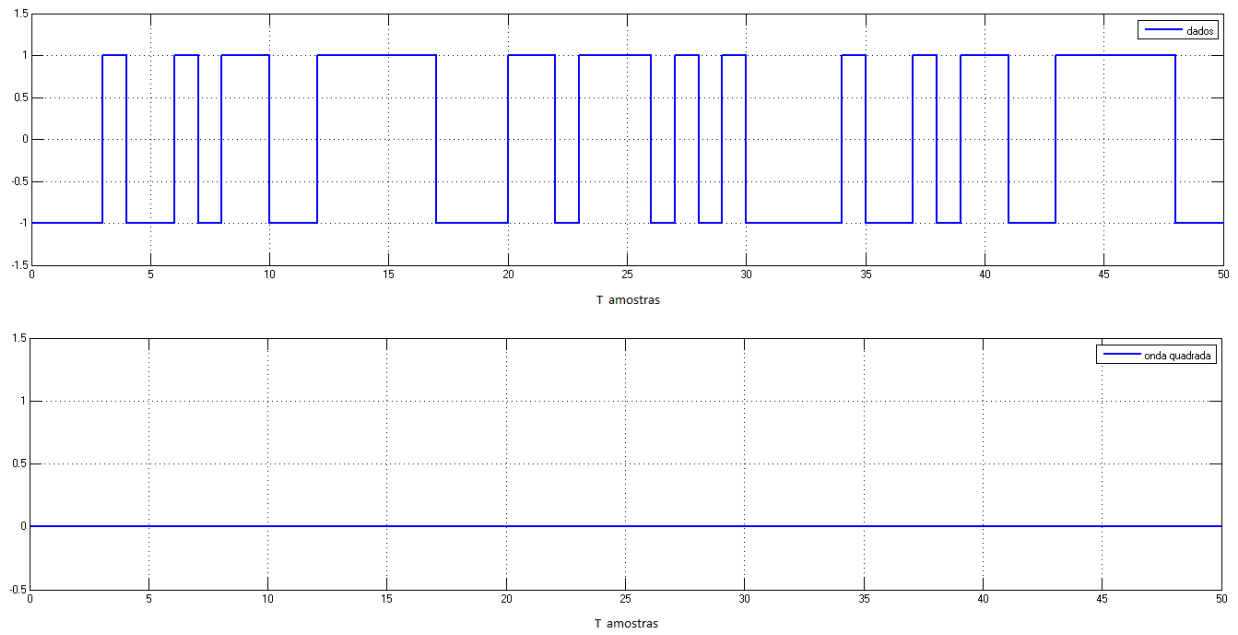


Figura 13: Saída do gerador local (em cima), para o valor 0 à entrada (em baixo), com condições iniciais não nulas nos atrasos

Gerador Remoto

Para o gerador de dados remoto, esquematizado na figura 4, observou-se o seguinte gráfico, à saída do conversor de nível:

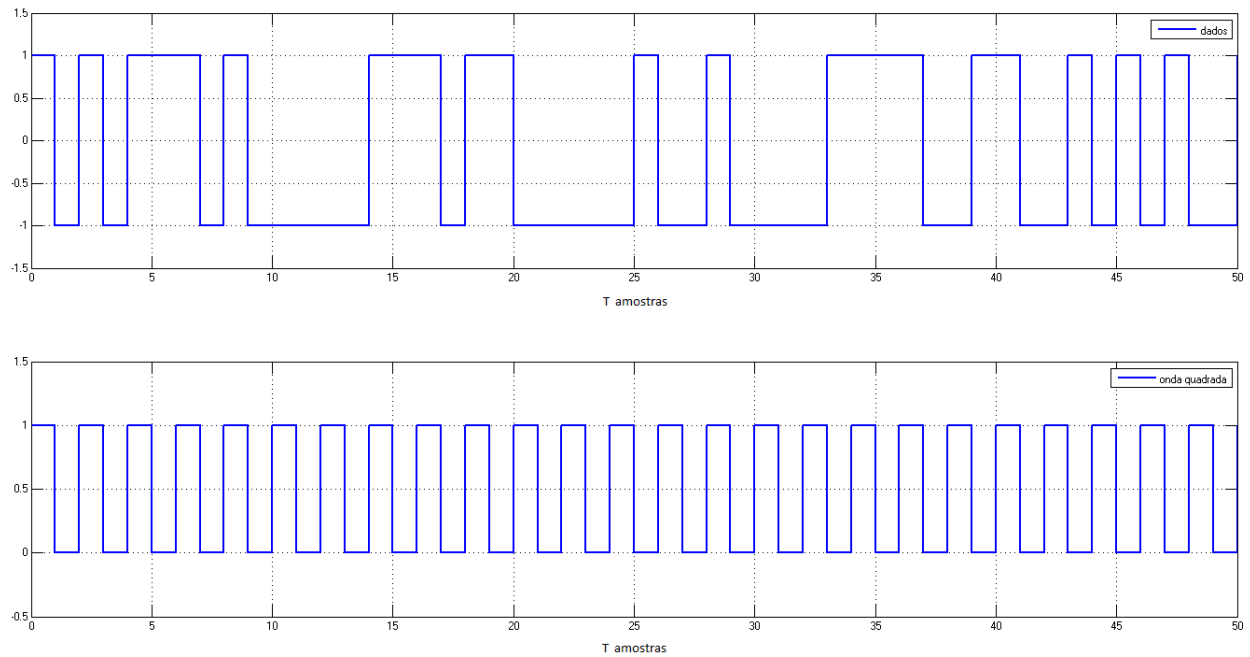


Figura 14: Saída do gerador remoto (em cima), para uma onda quadrada à entrada (em baixo)

Substituindo a entrada de onda quadrada do gerador remoto (figura 4) por uma entrada nula, observou-se o seguinte gráfico:

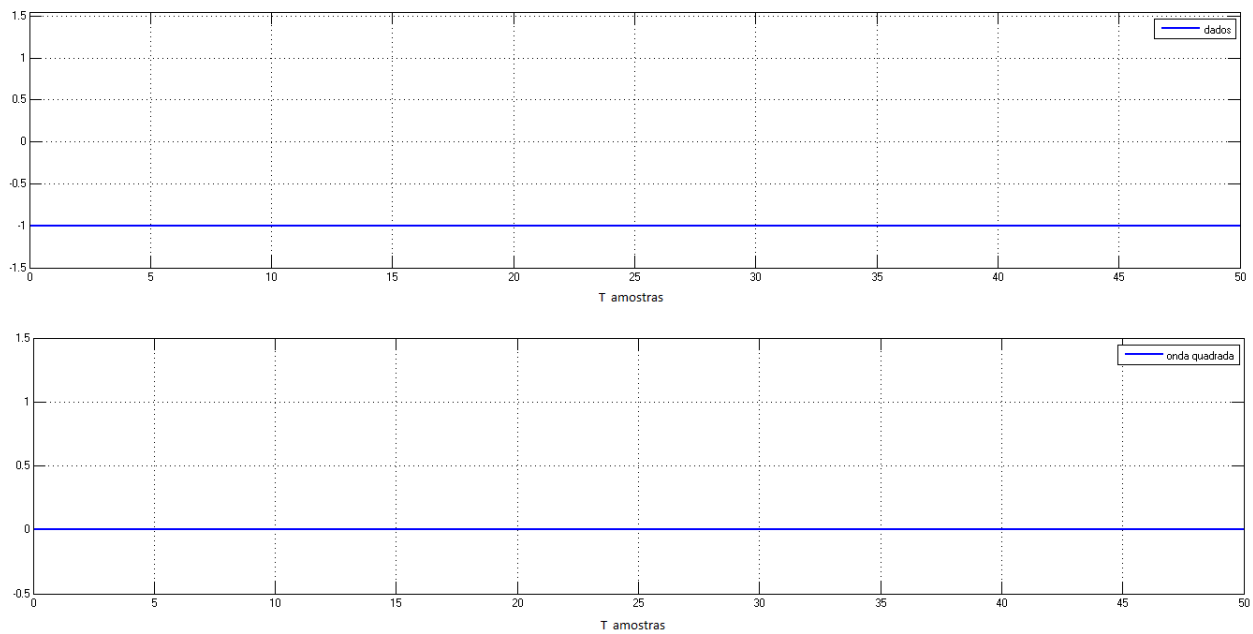


Figura 15: Saída do gerador remoto (em cima), para o valor 0 à entrada (em baixo), com condições iniciais nulas nos atrasos

As resultados obtidos são iguais aos do gerador local, pelas mesmas razões. Assim:

$$y(t) = x(t) \oplus (y(t - 5T) \oplus y(t - 7T)) = 0 \oplus (y(t - 5T) \oplus y(t - 7T)) = (y(t - 5T) \oplus y(t - 7T)) \quad (6)$$

Logo, para condições iniciais dos atrasos nulas obtém-se, à saída do conversor de nível o valor constante -1, tal como se observa no gráfico da figura 15.

Para condições iniciais diferentes de zero o sinal à saída do gerador de dados deixa de tomar sempre o valor -1. Por exemplo para:

$$\left\{ \begin{array}{l} y(t - T) = 0 \\ y(t - 2T) = 1 \\ y(t - 3T) = 0 \\ y(t - 4T) = 1 \\ y(t - 5T) = 0 \\ y(t - 6T) = 1 \\ y(t - 7T) = 0 \end{array} \right. \quad (7)$$

Obtém-se o sinal presente no gráfico da figura 16.

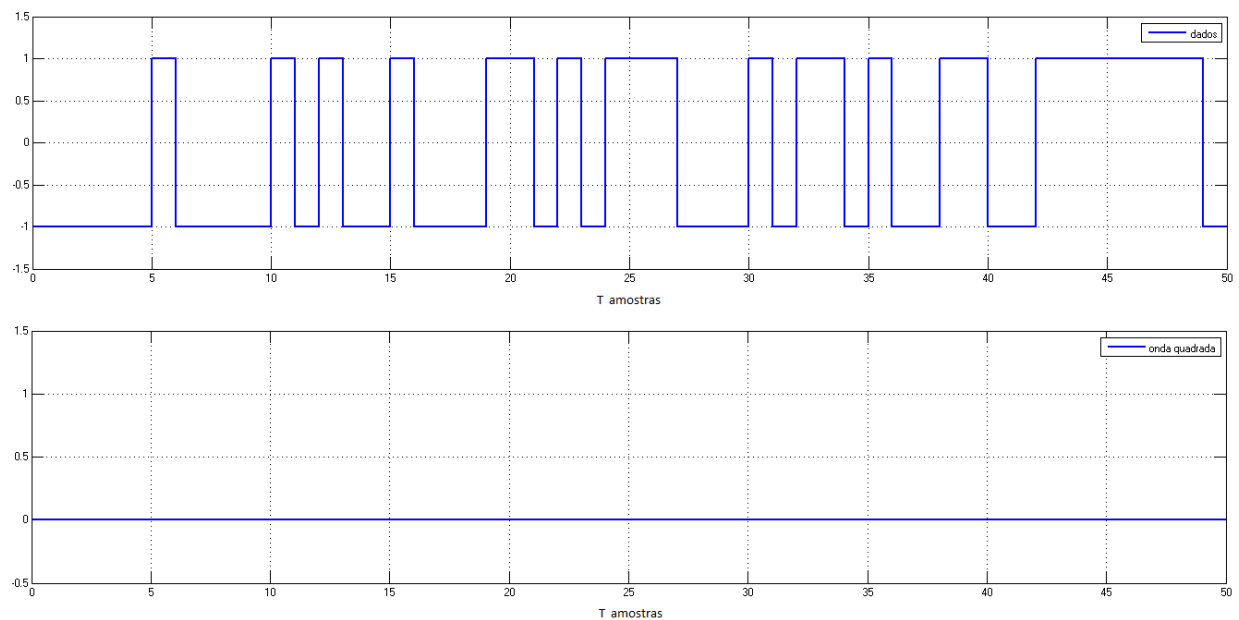


Figura 16: Saída do gerador remoto (em cima), para o valor 0 à entrada (em baixo), com condições iniciais não nulas nos atrasos

Teste do Híbrido

O bloco do híbrido foi testado aplicando um sinal contínuo de nível 1 à entrada. O sinal observado encontra-se no gráfico da figura 17.

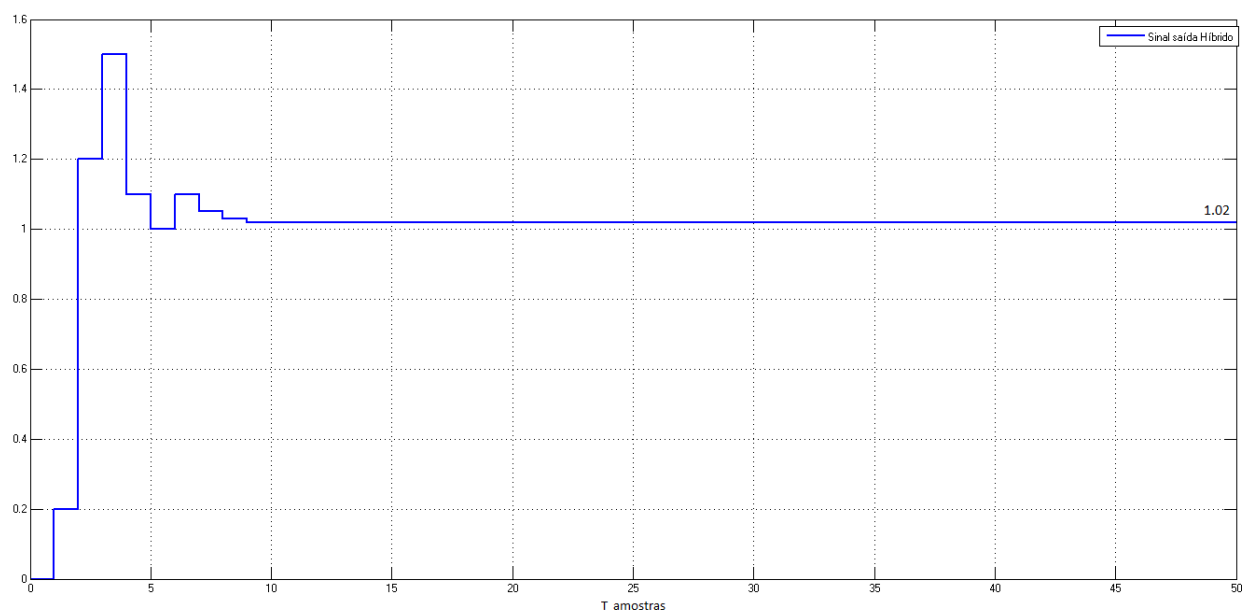


Figura 17: Saída do bloco do híbrido, para um sinal contínuo de nível 1 à entrada

Uma vez que o sinal de entrada corresponde ao valor 1, a saída tende para a soma sucessiva dos coeficientes do híbrido, a começar pela baixada 0. Assim, a partir de $T = 9$ amostras, o valor final é $0 + 0.2 + 1 + 0.3 - 0.4 - 0.1 + 0.1 - 0.05 - 0.02 - 0.01 = 1.02$.

Teste do Cancelador de Eco

Para testar o cancelador de eco aplicou-se à entrada do mesmo os dados provenientes do gerador de dados local. De forma a simular o caminho do eco, ligou-se um filtro transversal FIR de 4ª ordem com coeficientes nulos à excepção do último com coeficiente unitário.

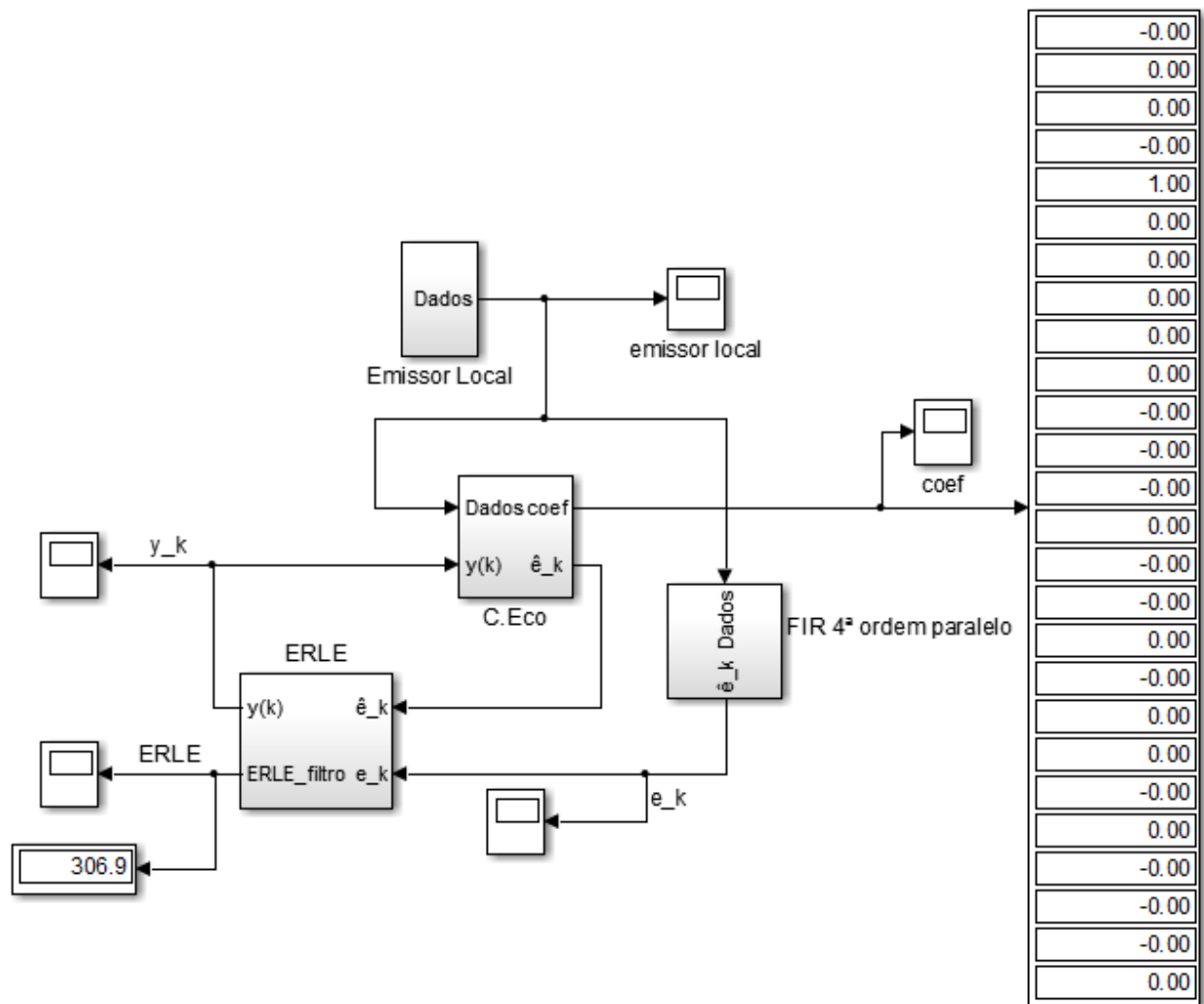


Figura 18: Esquema do teste realizado para o cancelador de eco

Os parâmetros escolhidos para o teste foram os seguintes:

- Start Time - 0.0;
- Stop Time - 4000;
- Passo de adaptação $\mu = 0.03$

A simulação acima descrita resultou na seguinte curva, à saída do ERLE:

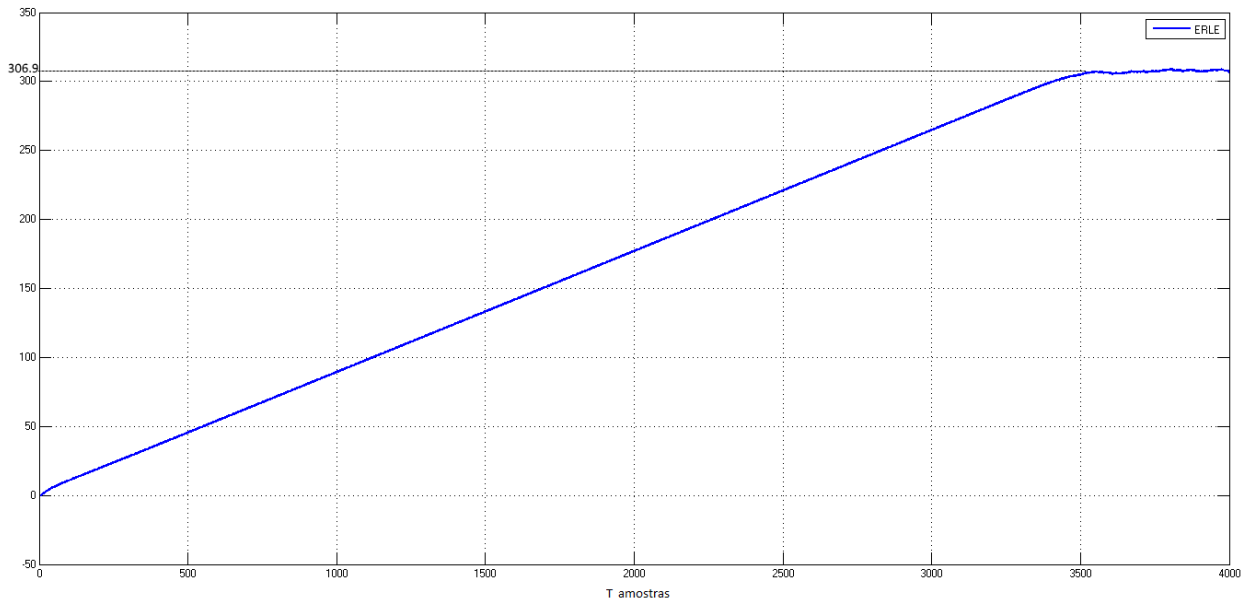


Figura 19: Evolução do ERLE para $\mu = 0.03$

Como se pode verificar o parâmetro ERLE estabilizou num valor (306.9 dB, tal como se verifica no bloco de *display* do ERLE da figura 18). O gráfico da figura 20 mostra a evolução dos coeficientes do cancelador de eco, ao longo do tempo:

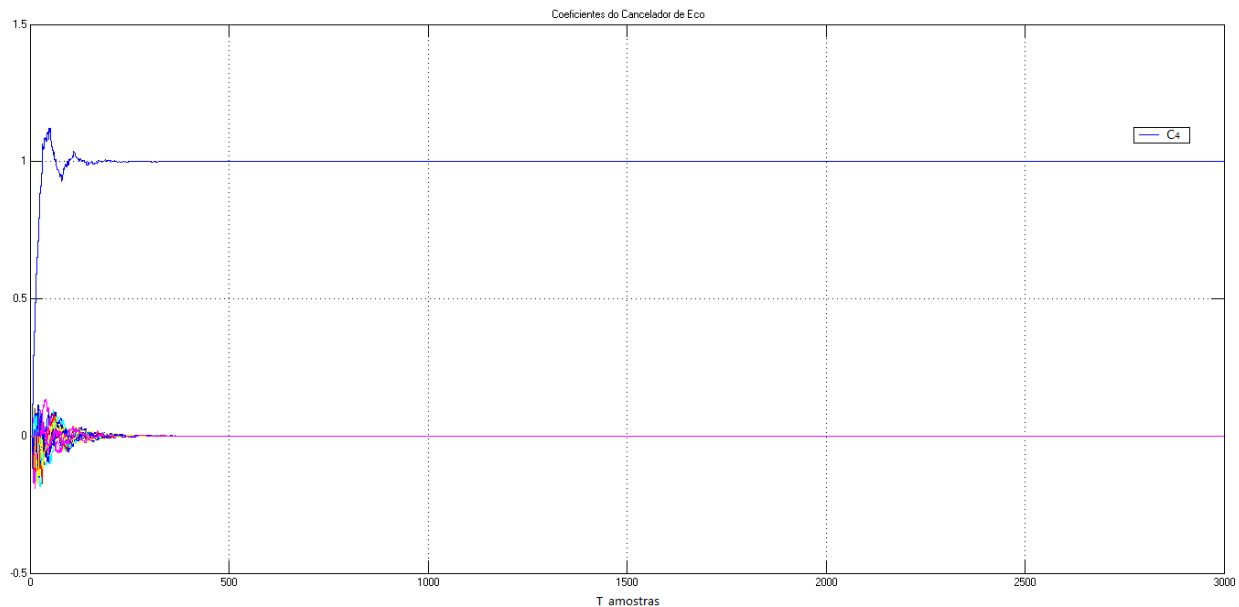


Figura 20: Evolução dos coeficientes do cancelador de eco, ao longo do tempo

Como se pode observar através do gráfico e do painel da direita do esquema da figura 18, os coeficientes do cancelador tenderam para os coeficientes do filtro de 4ª ordem (apenas o 5º coeficiente, de ordem 4, é igual a 1). Este resultado está de acordo com o esperado uma vez que o filtro adaptativo do cancelador de eco se encontra em modo de identificação.

Teste do Sistema

Sem Ruído

$$\underline{\mu = 0.03}$$

Para o teste sem ruído retirou-se a influência do sinal remoto, fazendo $G = 0$, tal como se encontra no esquema da figura 1. Este caso simula a situação em que apenas um dos intervenientes numa comunicação telefónica está a falar. A evolução temporal do ERLE e dos coeficientes do filtro adaptativo e o valor no qual estes estabilizam, para um passo de adaptação $\mu = 0.03$, encontram-se nas figuras 21 e 22 e na tabela 1, respetivamente.

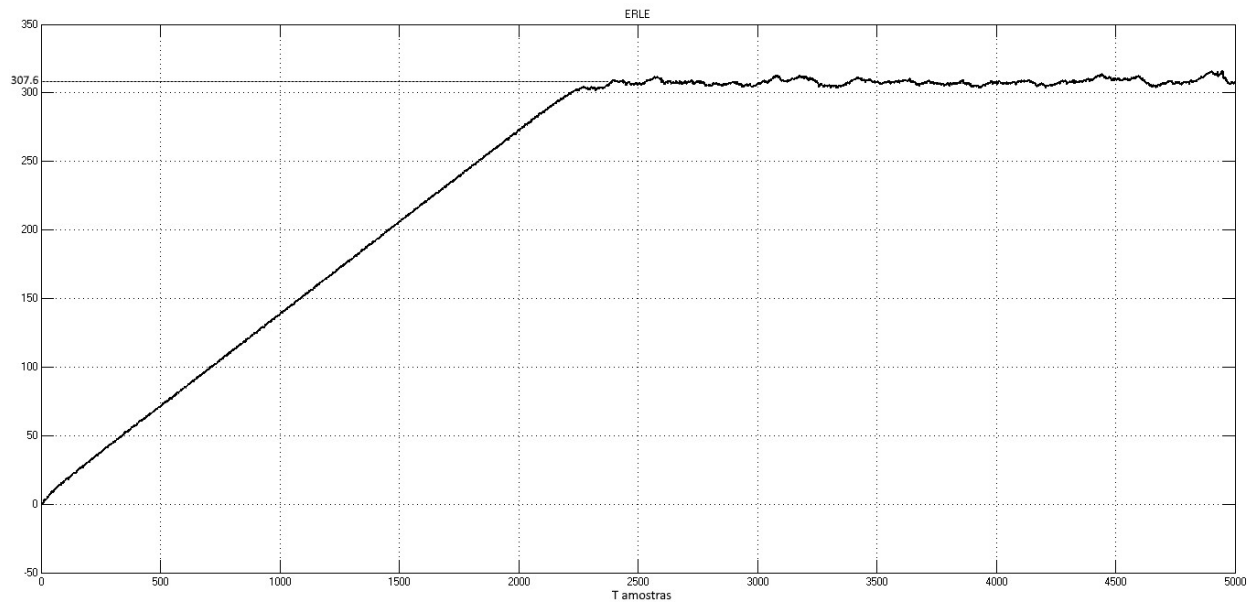


Figura 21: Evolução do ERLE para $\mu = 0.03$ e $G=0$ (sem ruído)

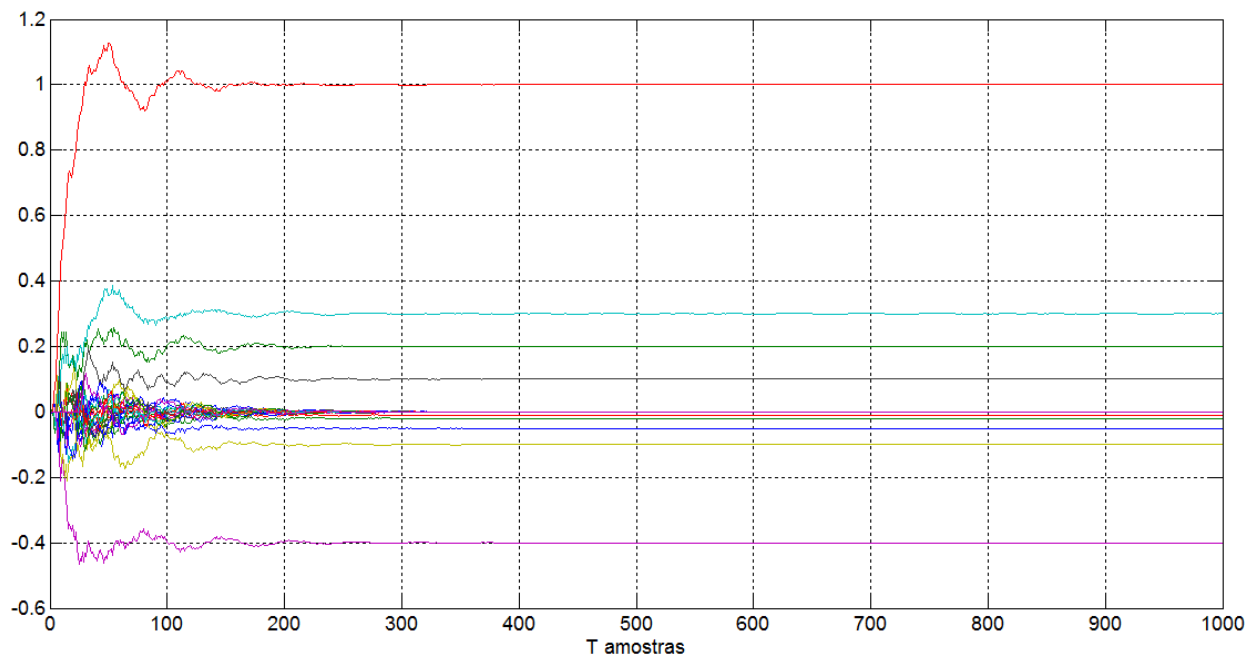


Figura 22: Evolução dos coeficientes do filtro adaptativo para $\mu = 0.03$ e $G=0$ (sem ruído)

Coef	Valor
C_0	0,00
C_1	0,20
C_2	1,00
C_3	0,30
C_4	-0,40
C_5	-0,10
C_6	0,10

Coef	Valor
C_7	-0,05
C_8	-0,02
C_9	-0,01
C_{10}	0,00
C_{11}	0,00
C_{12}	0,00
C_{13}	0,00

Coef	Valor
C_{14}	0,00
C_{15}	0,00
C_{16}	0,00
C_{17}	0,00
C_{18}	0,00
C_{19}	0,00

Coef	Valor
C_{20}	0,00
C_{21}	0,00
C_{22}	0,00
C_{23}	0,00
C_{24}	0,00
C_{25}	0,00

Tabela 1: Coeficientes do filtro adaptativo para $\mu = 0.03$ e $G=0$ (sem ruído)

$\mu = 0.003$

A evolução temporal do ERLE para um passo de adaptação $\mu = 0.003$, encontra-se na figura 23 e os valores onde estabilizam os coeficientes do filtro adaptativo são iguais aos do teste anterior, estando representados na tabela 1.

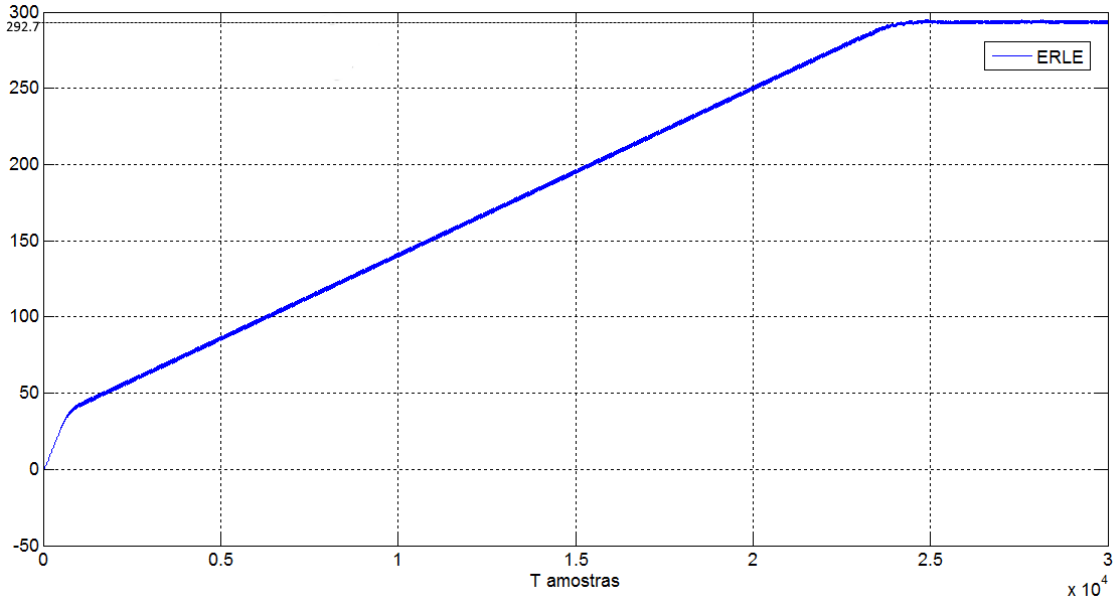
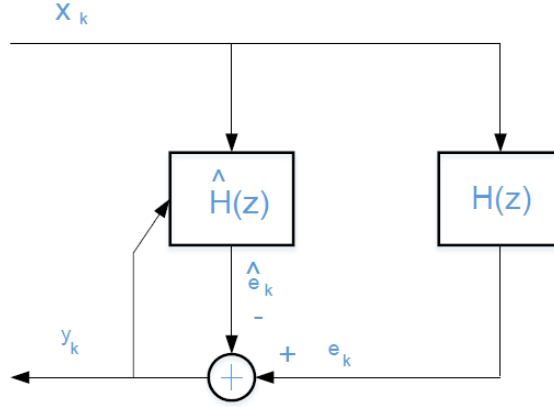


Figura 23: Evolução do ERLE para $\mu = 0.003$ e $G=0$ (sem ruído)

O filtro adaptativo apresenta-se em modo de identificação. Neste modo a função de transferência do filtro ($\hat{H}(z)$) tende para a função de transferência dos componentes atravessados pelos dados

$(H(z))$, de tal forma que o sinal residual $y_k = (e_k - \hat{e}_k) \rightarrow 0$, existindo um cancelamento do eco. Neste caso $H(z)$ representa o filtro FIR de 9^a ordem do híbrido e, sendo o filtro adaptativo também um filtro FIR, os coeficientes do filtro adaptativo tendem para os valores dos respectivos coeficientes do híbrido. Os coeficientes de ordem superior a 9 que não estão presentes no filtro do híbrido tomam no cancelador de eco o valor 0 (C_{10} a C_{25}). Este raciocínio encontra-se representado na figura seguinte:



O aumento do valor do ERLE, nos gráficos 21 e 23, com o aumento do número de amostras deve-se à diminuição da potência do sinal de erro $y(k)$. Em ambos os gráficos existe uma estabilização próxima dos 300 dB, havendo pequenas flutuações em torno deste valor. Para o passo de adaptação inferior ($\mu = 0.003$) esta necessita de um maior número de dados, tal como seria de esperar. Como não existe ruído os coeficientes do filtro adaptativo estabilizam nos valores que permitem uma muito boa estimação de $H(z)$, levando a um baixo valor da potência do sinal de erro $(e_k - \hat{e}_k)$, e consequentemente a um valor elevado do parâmetro ERLE.

μ_{max}

Testando o sistema com diferentes valores para o passo de adaptação que ainda conduz a um processo estável obteve-se $\mu_{max} = 0.038$. A evolução do ERLE encontra-se na figura 24.

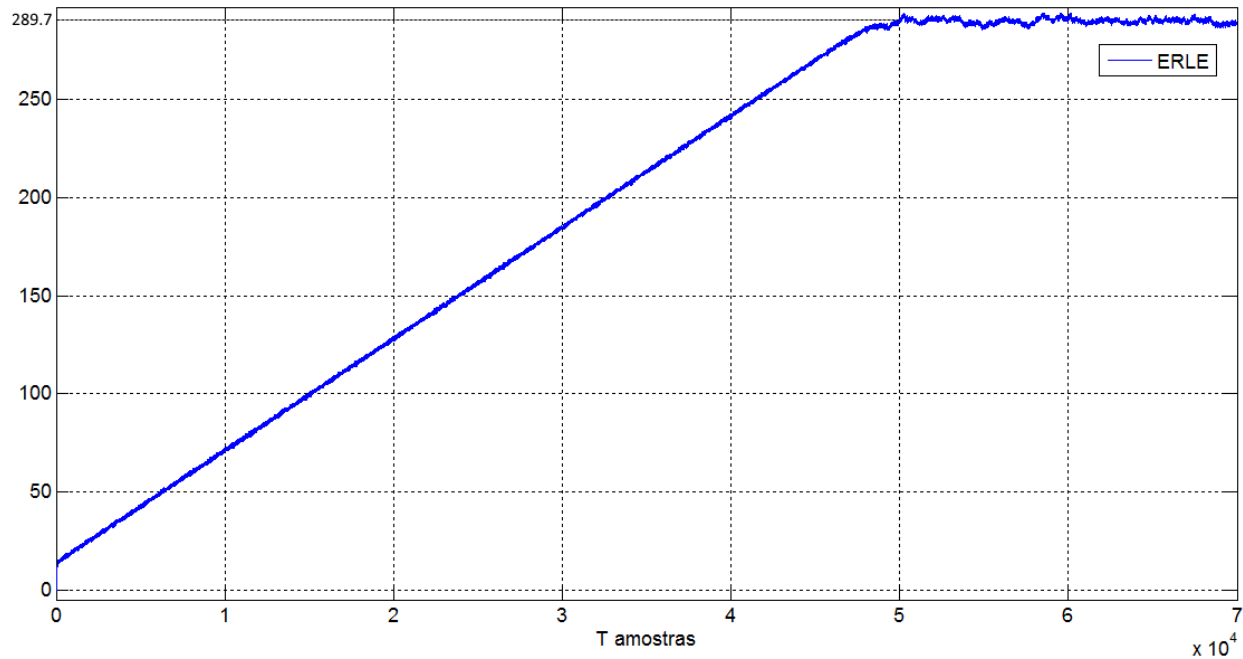


Figura 24: Evolução do ERLE para $\mu = 0.038$ (μ_{max}) e $G=0$ (sem ruído)

Comparando este gráfico com o da figura 21, verifica-se que o ERLE necessita de mais amostras para estabilizar, pelo que o sistema se tornou mais lento com o aumento do passo de adaptação. Para valores mais elevados de μ o algoritmo LMS começa a apresentar problemas de convergência, demorando assim mais tempo a estabilizar o valor do ERLE. Com $\mu > \mu_{max}$ o algoritmo diverge, deixando de ser possível a estimação por parte do filtro adaptativo. Este problema pode ser resolvido com a utilização de um algoritmo LMS normalizado ou um algoritmo do sinal, permitindo assim:

- Acelerar a convergência dos coeficientes em direção aos seus valores ótimos.
- Reduzir o erro residual dos coeficientes em regime permanente, relativamente aos valores ótimos.

Com Ruído

$\mu = 0.03$

Para o teste com ruído, $G = 0.1$, a evolução temporal do ERLE e o valor dos coeficientes do filtro adaptativo para um passo de adaptação $\mu = 0.03$, encontram-se nas figuras 25 e 26, respetivamente.

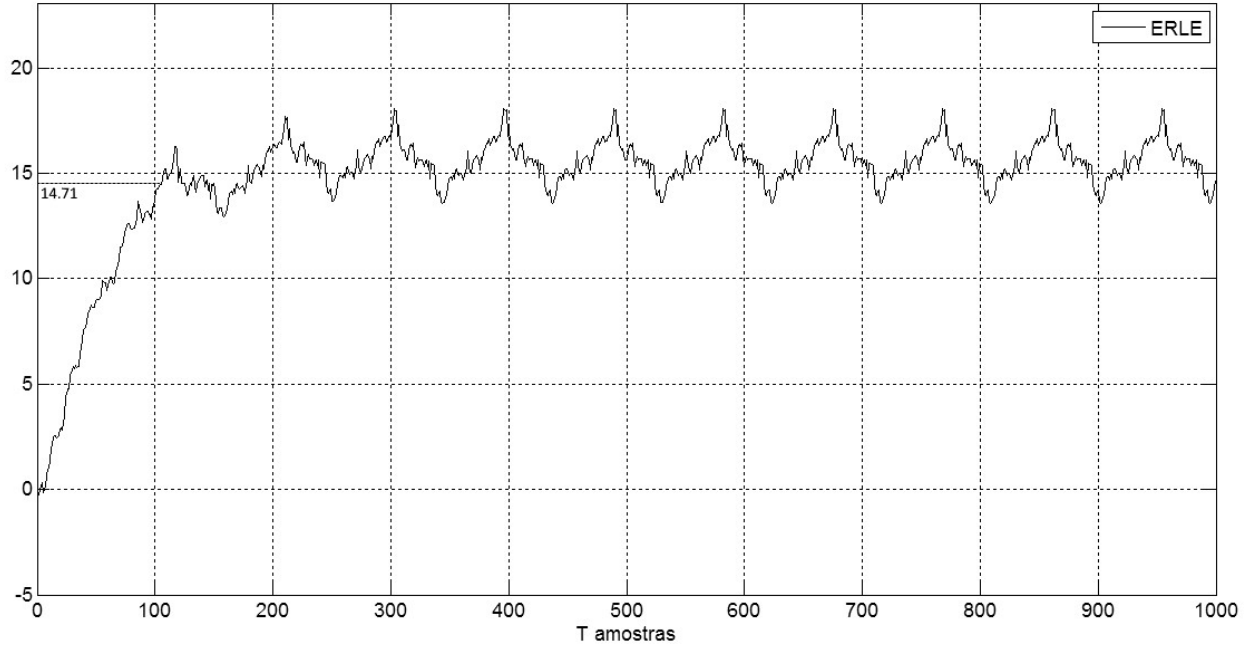


Figura 25: Evolução do ERLE para $\mu = 0.03$ e $G=0.1$

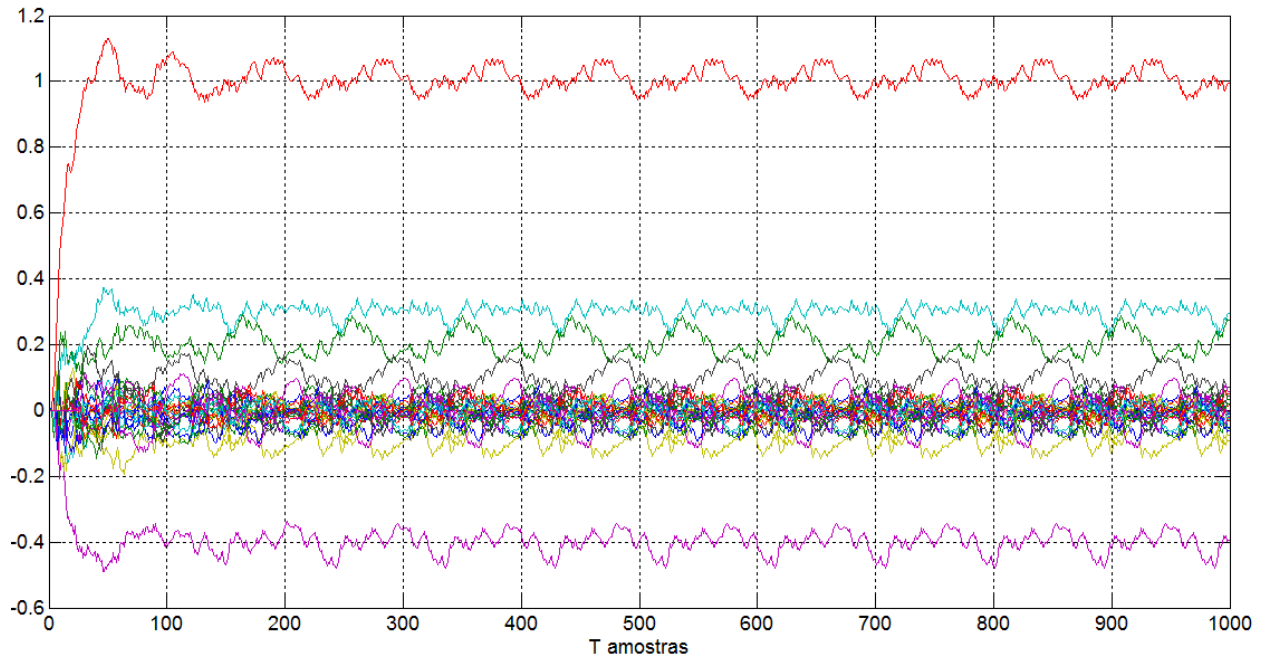


Figura 26: Evolução dos coeficientes do filtro adaptativo para $\mu = 0.03$ e $G=0.1$

A alteração do bloco ganho para um ganho diferente de 0, adiciona os dados do emissor remoto ao sistema, isto é, simula a situação em que os intervenientes numa ligação telefónica falam em simultâneo. Nesta situação o sinal e_k passará a ser constituído pelo eco e pelo sinal do emissor

remoto (simula o sinal de voz do segundo locutor), que, apesar de atenuado, deturpa o caminho do eco proveniente do emissor local, que já não é mais aquele que era simulado por $H(z)$. Como tal, os coeficientes do filtro adaptativo não irão estabilizar, logo não serão exatamente iguais aos de $H(z)$ e assim sendo, o filtro adaptativo não conseguirá estimar \hat{e}_k corretamente, o que levará a uma potência do sinal $(e_k - \hat{e}_k)$ significativa e consequentemente a parâmetros ERLE muito mais baixos, como demonstra a figura 25.

Uma solução possível para este problema passaria por instalar no sistema um bloco de detecção à voz dos dois locutores em simultâneo, que, quando as detetasse, interrompia o algoritmo adaptativo, congelando os valores dos coeficientes registados na altura em que apenas um interveniente falava, maximizando assim o cancelamento de eco.

$$\underline{\mu_{max}}$$

Para $\mu_{max} = 0.038$ e $G=0.4$, a evolução do ERLE encontra-se na figura 27.

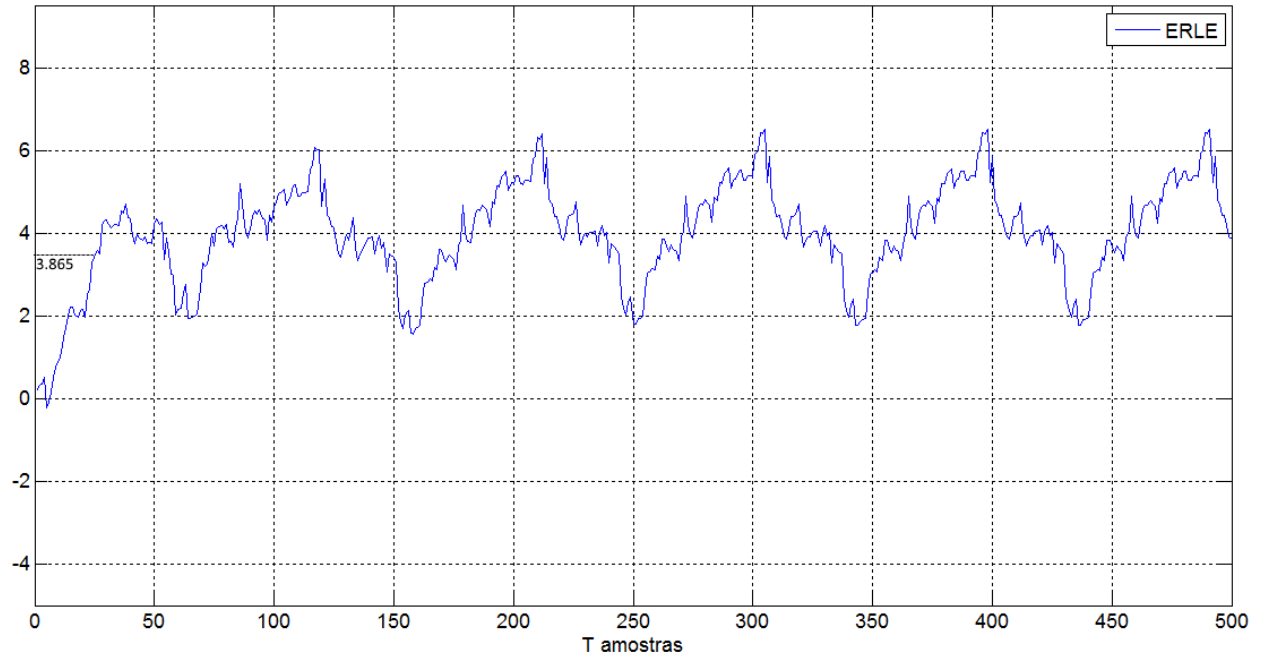


Figura 27: Evolução do ERLE para $\mu = 0.038$ (μ_{max}) e $G=0.4$

Com este valor de ganho, o sinal de voz do segundo locutor é amplificado $4\times$, em relação à situação anterior, e como tal a sua influência passa a ser também maior, tornando ainda pior a estimativa do eco \hat{e}_k , levando a parâmetros ERLE mais baixos. Daqui se infere que quando um

dos locutores aumenta a amplitude da sua voz na situação em que falam em simultâneo, torna o cancelamento de eco menos eficiente.

Conclusão

Da análise dos resultados verificou-se que uma variação do passo de adaptação provoca alterações no tempo de estabelecimento do ERLE. Para o sistema sem ruído o ERLE tende para um valor bastante elevado ($\approx 300dB$), pois a potência do sinal residual pode ser desprezada. A partir de um certo valor crítico do passo de adaptação, μ_{max} , o algoritmo LMS deixa de convergir.

Ao introduzir-se ruído são provocadas alterações no caminho do eco anteriormente simulado por $H(z)$. Deste modo o filtro adaptativo não consegue identificar os valores exatos dos coeficientes de $H(z)$. Quando isto acontece o sinal residual ($e_k - \hat{e}_k$) deixa de apresentar um valor não desprezável, não existindo o correto funcionamento do sistema de cancelamento de eco.