



TÉCNICO
LISBOA

Agenda
17,3

Eletrónica Geral
Relatório do Laboratório 3:
Conversor Digital Analógico

Turno L03

Grupo 11

Mariana Vinhas, nº 92708

Afonso Carvalho, nº 93209

Afonso Vale, nº 93542

Lisboa, 15 de novembro de 2021

Professores: José Gerald e Diogo Caetano

Índice

1	Introdução	2
2	Implementação	2
2.1	Gerador de dados e baralhador	2
2.1.1	Teste e Análise	3
2.1.1.1	Gerador de dados local	3
2.1.1.2	Gerador de dados remoto	5
2.2	Híbrido	5
2.2.1	Teste e Análise	6
2.3	Cancelador de Eco, Ganho e ERLE	8
2.3.1	Cancelador de Eco	9
2.3.2	ERLE	10
2.3.3	Teste e Análise	10
2.4	Sistema Total	12
2.4.1	Teste e Análise	12
2.4.1.1	Teste do sistema sem ruído ($G = 0$)	12
2.4.1.2	Teste do sistema com ruído ($G \neq 0$)	17
3	Conclusões	20
4	Referências	20



1 Introdução

Esta atividade experimental consiste na implementação em MATLAB *Simulink* da simulação de um filtro adaptativo FIR transversal, utilizando para isso um algoritmo LMS, a operar como cancelador de eco de um sistema de transmissão de dados em banda de base.

Inicialmente, será feita a conceção e design de cada uma das partes constituintes do sistema, realizando testes para averiguar o seu funcionamento. De seguida, será realizada a integração do sistema e testado o sistema na sua íntegra, de forma a avaliar diferentes parâmetros, como a estabilidade e a rapidez do sistema.

Abaixo apresenta-se o diagrama de blocos simplificado do sistema que vamos implementar, dado no guião laboratorial [1].

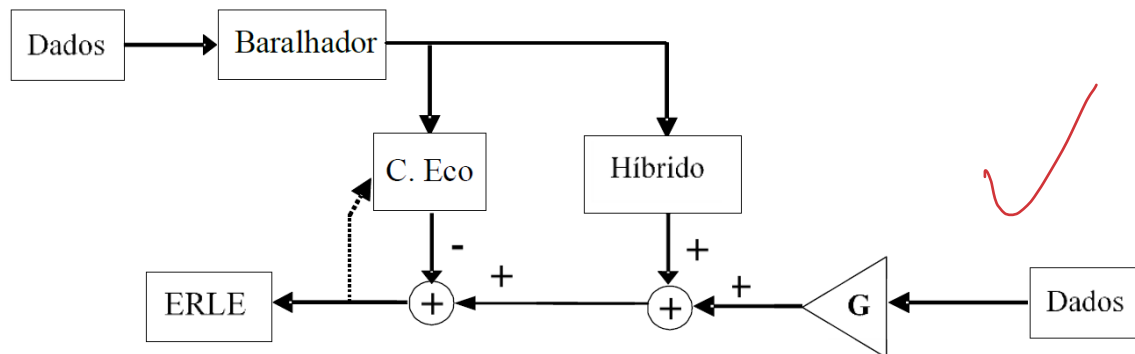


Figura 1: Diagrama de blocos do sistema a implementar. [1]

2 Implementação

2.1 Gerador de dados e baralhador

Em primeiro lugar, é de referir que vai ser necessário alimentar o sistema com dados em dois pontos, como se observa na figura 1, daí que se tenha um gerador de dados local (à esquerda) e um gerador de dados remoto (à direita).

É requerido que os dados gerados pelo gerador de dados sejam aleatórios, pelo que a sua arquitetura vai passar por um **gerador de dados**, que emite uma onda quadrada, seguido de um **baralhador de dados**. Este último é regido por equações diferentes, no caso do emissor local $1 + x^3 + x^5$, e no caso do emissor remoto $1 + x^5 + x^7$. Tomando T como o período de fornecimento dos dados e \oplus o operador lógico “ou-exclusivo (XOR)”, realizam as operações,

$$y(t) = x(t) \oplus y(t - 3T) \oplus y(t - 5T), \quad (1)$$

$$y(t) = x(t) \oplus y(t - 5T) \oplus y(t - 7T). \quad (2)$$

Utilizando o *Simulink*, implementaram-se os geradores de dados local e remoto apresentados nas figuras abaixo. De notar que o baralhador de dados é incluído no mesmo subsistema que o gerador propriamente dito e não num subsistema separado como sugerido na figura 1. Acrescenta-se ainda que, uma vez que os dados à saída do gerador de dados têm de ter os níveis +1 e -1, foi necessário adicionar um **conversor de nível** antes da saída do subsistema. Nos diagramas das figuras 2 e 3, esta parte corresponde ao ponto de soma a vermelho, onde entram a constante -1 e o ganho 2 multiplicado pela saída do *XOR*.1.

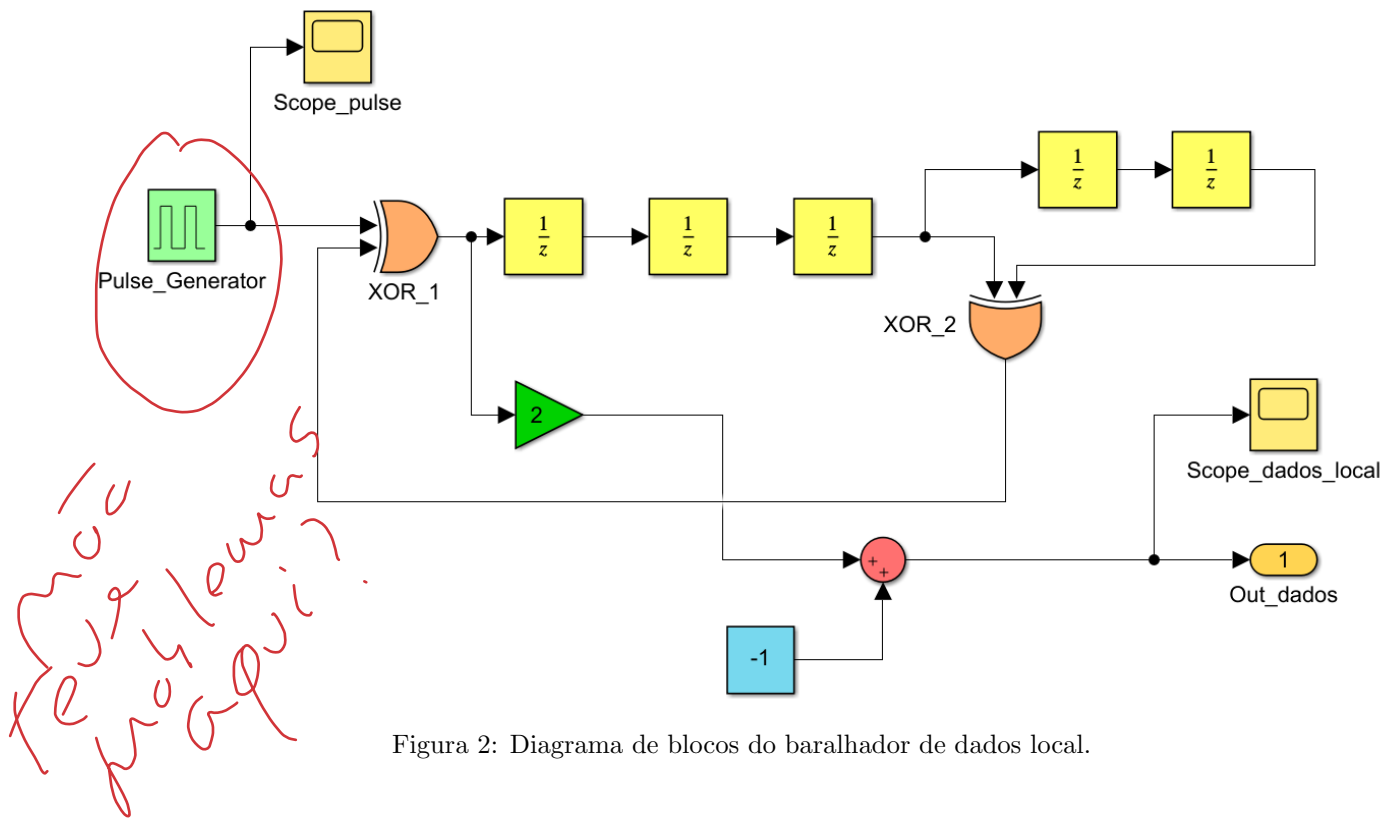


Figura 2: Diagrama de blocos do baralhador de dados local.

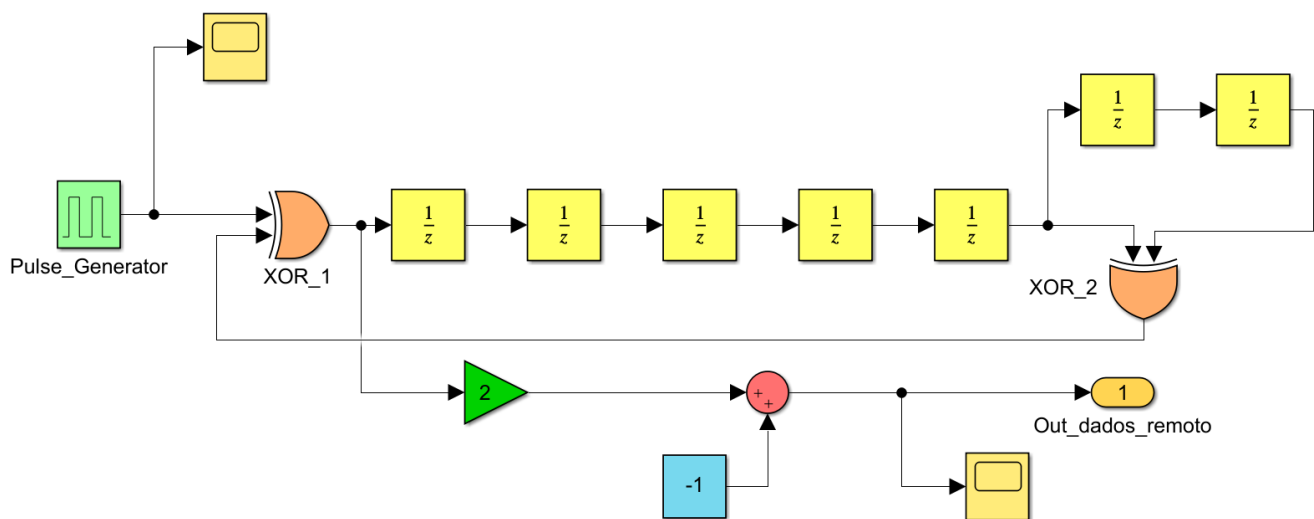


Figura 3: Diagrama de blocos do baralhador de dados remoto.

2.1.1 Teste e Análise

2.1.1.1 Gerador de dados local

Para testar o correto funcionamento do baralhador de dados, foi introduzida uma onda quadrada de período T (repare-se que é referido no guia laboratorial que todo o sistema deve funcionar ao mesmo ritmo de dados [1]).

Na figura 4 apresenta-se o sinal de entrada aplicado à entrada do baralhador de dados e na Figura 5 o sinal de saída do mesmo, depois de passar pelo conversor de nível.

Valores previstos?

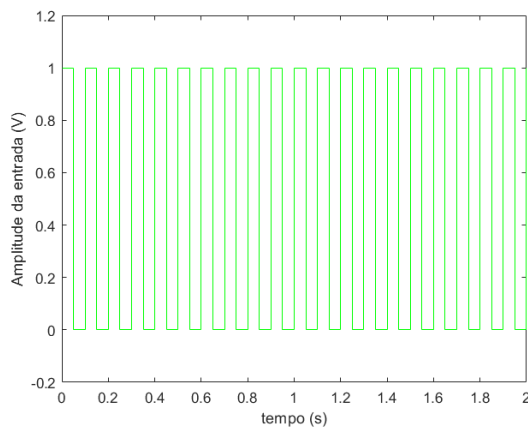


Figura 4: Sinal de entrada do baralhador de dados local, onda quadrada.

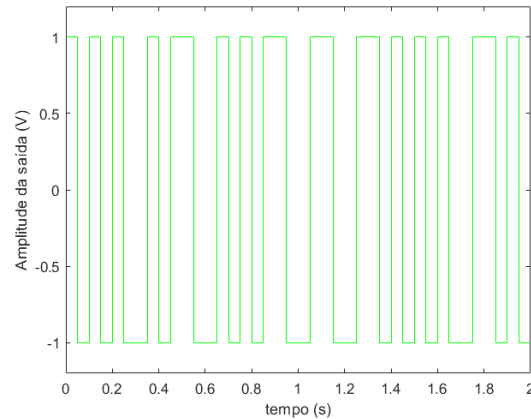


Figura 5: Sinal de saída do baralhador de dados local, depois de passar pelo conversor de nível, onda quadrada.

Destas imagens destacam-se os seguintes tópicos:

- o efeito do baralhador de dados, que transforma o sinal de entrada num sinal pseudo-aleatório;
- o efeito do conversor de nível, que passa o sinal de $[0,1]$ V para $[-1,1]$ V, obtendo-se um sinal NRZ de valores -1 e +1;
- obtém-se uma sequência de dados aparentemente aleatórios, visto que o sinal aplicado na entrada é periódico, com a referida codificação NRZ. No entanto, nota-se que em simulações diferentes, o sinal de saída permanece inalterado, visto que o sinal de saída não é verdadeiramente aleatório, mas sim pseudo-aleatório, determinado pelo sinal que se aplica na entrada.

Adicionalmente, testou-se ainda a situação em que a entrada corresponde a um sinal constante em zero. Apresentam-se em baixo os gráficos relativos às mesmas posições que os anteriores.

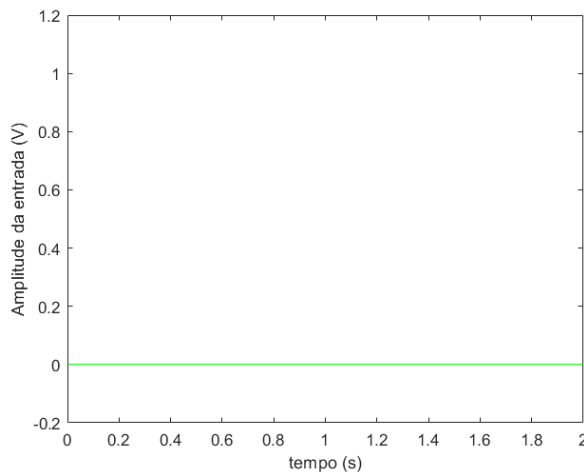


Figura 6: Sinal de entrada do baralhador de dados local, constante 0.

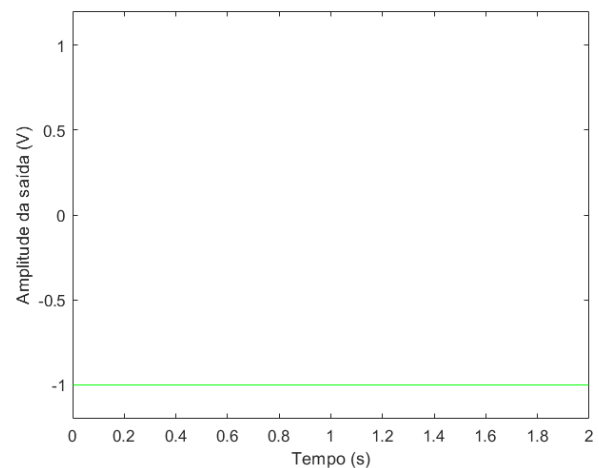


Figura 7: Sinal de saída do baralhador de dados local, depois de passar pelo conversor de nível, constante 0.

Observa-se que o sinal à saída se mantém contínuo, mas que o seu valor muda para -1. Isto deve-se à operação realizada no *XOR*, que, tendo o sistema condições iniciais nulas, devolve o valor 0, e que, seguido do conversor de nível, se transforma em -1 (que é a codificação em NRZ do bit 0).

(certo)

2.1.1.2 Gerador de dados remoto

Também aqui foi introduzida uma onda quadrada, de período T , à entrada. Pelo facto de termos um baralhador de dados de polinómio diferente, obtemos de certeza um sinal pseudo-aleatório diferente (pois como já se referiu, se o polinómio fosse o mesmo, como o sinal não é realmente aleatório, se a entrada fosse a mesma onda quadrada, a saída do baralhador seria a mesma). Como atrás, apresentam-se as figuras 8 e 9 para ilustrar os pontos de entrada e saída deste sinal no baralhador de dados e conversor de nível.

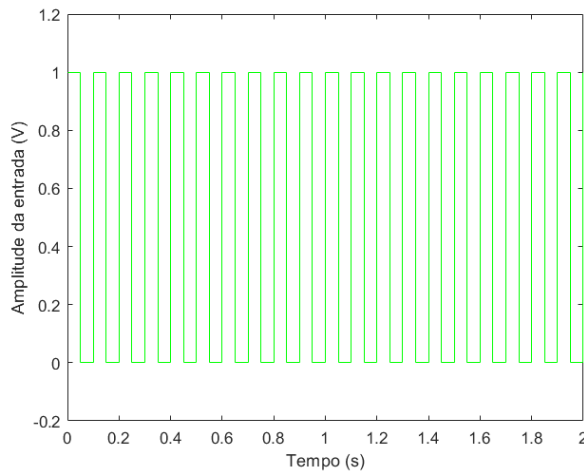


Figura 8: Sinal de entrada do baralhador de dados remoto, onda quadrada.

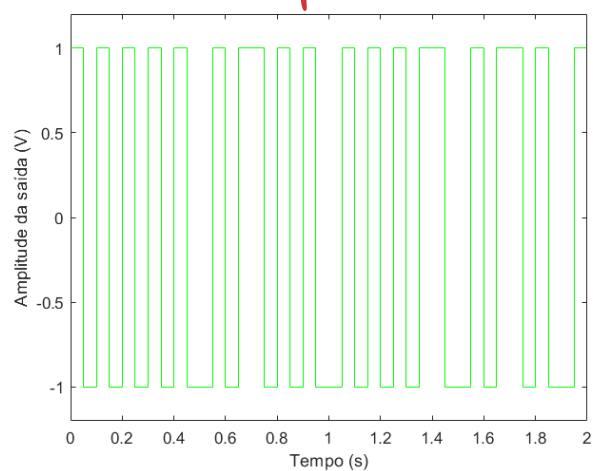


Figura 9: Sinal de saída do baralhador de dados remoto, após a ação do conversor de nível, onda quadrada.

Repare-se que, como esperado, comparando as figuras 5 e 9, os sinais de saída dos baralhadores do emissor local e remoto são diferentes. De novo, aplicou-se o sinal de entrada contínuo a 0 V, verificando-se exatamente a mesma saída que no caso anterior (sinal constante em -1, que corresponde a bits 0 em codificação NRZ), como se ilustra nas figuras abaixo.

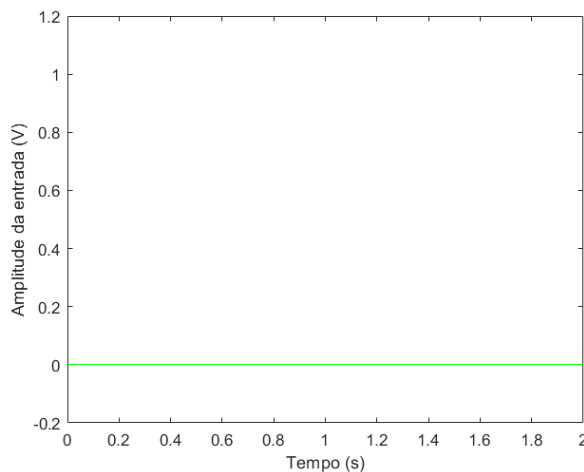


Figura 10: Sinal de entrada do baralhador de dados remoto, constante 0.

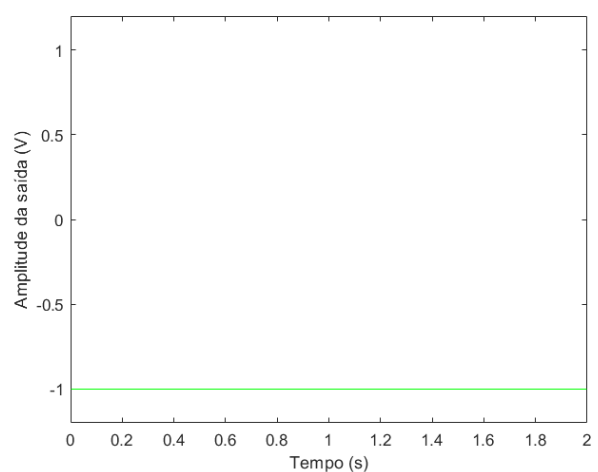


Figura 11: Sinal de saída do baralhador de dados remoto, após a ação do conversor de nível, constante 0.

2.2 Híbrido

O facto de se usar 4 fios nos emissores e recetores e 2 fios na linha de transmissão, exige a utilização de um circuito "híbrido", que é composto por um filtro FIR de 9ª ordem, de coeficientes dados no guia laboratorial [1] e

mostrados na tabela 1 (os coeficientes c_k correspondem às baixadas i).

e_o	e_1	e_2	e_3	e_4	e_5	e_6	e_7	e_8	e_9
0	0.2	1	0.3	-0.4	-0.1	0.1	-0.05	-0.02	-0.01

Tabela 1: Coeficientes do filtro FIR de 9ª ordem que constitui o híbrido.

A sua implementação em *Simulink* apresenta-se na figura 12:

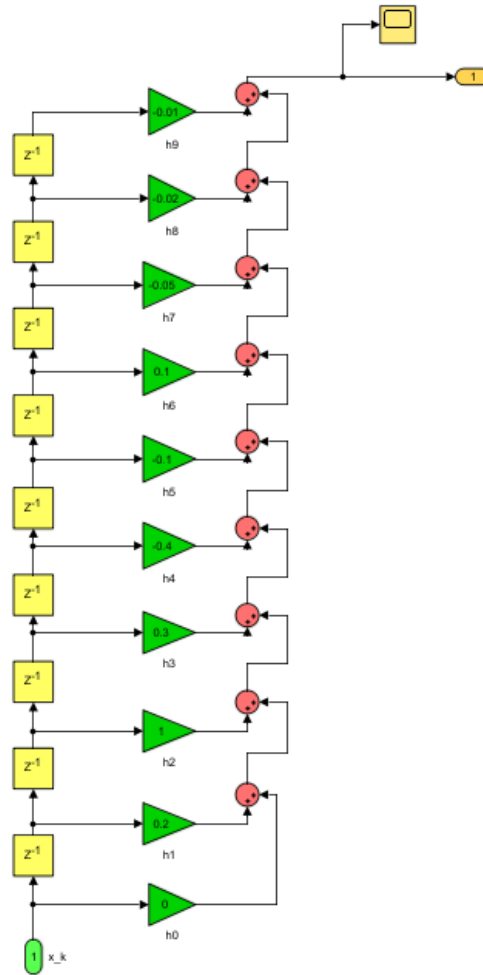


Figura 12: Diagrama de blocos do híbrido.

2.2.1 Teste e Análise

Para testar o funcionamento do híbrido, foi aplicado um sinal contínuo de nível 1 à entrada do filtro, e correu-se a simulação durante um tempo mais curto (2s), de forma a analisar mais em detalhe os sinais.

Na figura 13 encontra-se o modelo simulink utilizado neste teste.

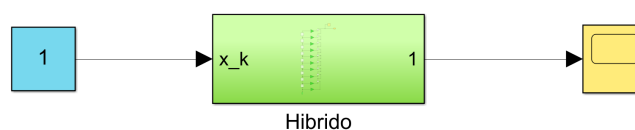


Figura 13: Diagrama de blocos em Simulink do teste do híbrido.

Obteve-se a saída representada na figura 14.

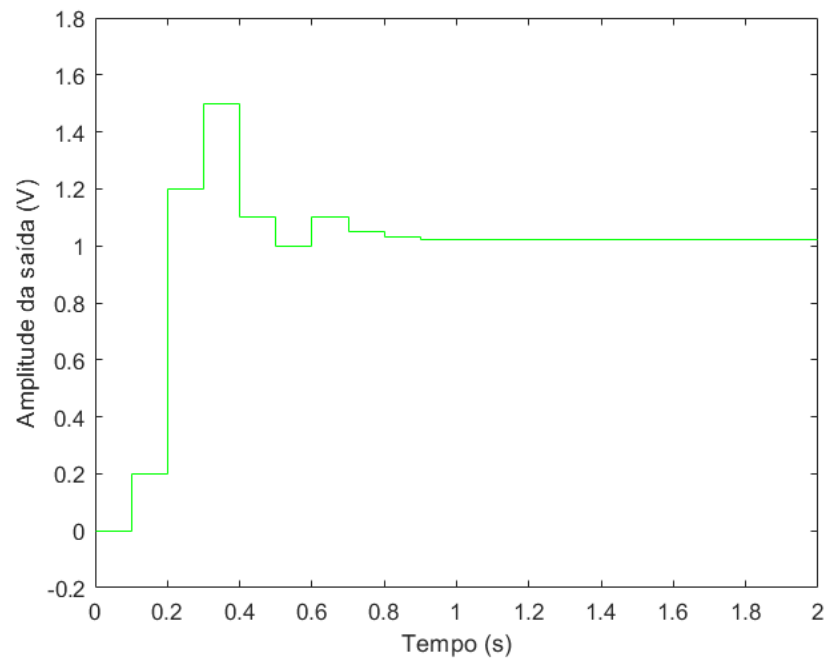


Figura 14: Sinal de saída do híbrido.

Daqui se observa a inerente estabilidade do filtro FIR que, num tempo relativamente curto (cerca dos 0.9s), estabiliza a saída.

Adicionalmente, calculou-se a função de transferência do filtro (com recurso aos seus coeficientes).

$$\begin{aligned}
 y(t) &= 0.2x(t-1) + x(t-2) + 0.3x(t-3) - 0.4x(t-4) - 0.1x(t-5) + \\
 &\quad + 0.1x(t-6) - 0.05x(t-7) - 0.02x(t-8) - 0.01x(t-9) \\
 \Rightarrow \frac{y(t)}{x(t)} &= \frac{0.2z^8 + z^7 + 0.3z^6 - 0.4z^5 - 0.1z^4 + 0.1z^3 - 0.05z^2 - 0.02z - 0.01}{z^9}
 \end{aligned}$$

Daqui se obteve ainda a posição dos zeros no plano Z, representada abaixo:

V

Sistema!

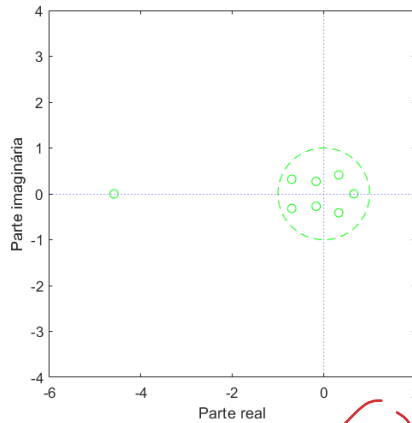


Figura 15: Posição dos zeros da função de transferência do híbrido no plano Z.

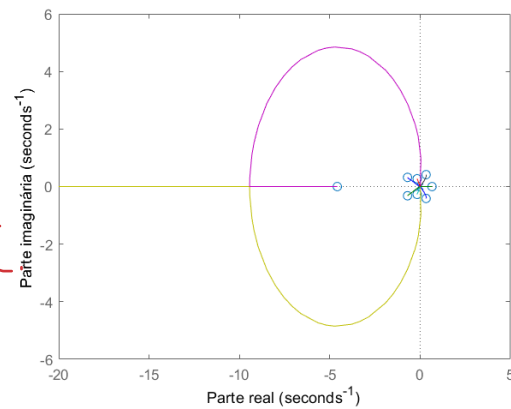


Figura 16: Root locus da função de transferência do filtro FIR.

Analisando agora a figura 14 em conjunto com o diagrama da figura 15, podem tirar-se as seguintes conclusões:

- no início da resposta, observa-se uma sobrelevação, que se deverá aos zeros dentro do círculo unitário no semiplano complexo esquerdo;
- após esta sobrelevação, a resposta desce, mas torna-se ligeiramente oscilatória, que se deverá aos zeros dentro do círculo unitário, mas desta vez no semiplano complexo direito. No entanto, verifica-se algum amortecimento, que será devido ao pólo no eixo real positivo;

De notar ainda que, no gráfico da figura 14, a resposta estabiliza num valor próximo de 1.02. Este resultado é consistente com o esperado, uma vez que será dado pelo ganho do filtro, já que a entrada é unitária. Pegando na função de transferência e fazendo $z = 1$, obtém-se o ganho do filtro, que corresponde exatamente a estes 1.02.

Através do root locus da figura 16 observa-se ainda que existe um ganho crítico a partir do qual o sistema passa a ser instável.

2.3 Cancelador de Eco, Ganho e ERLE

Como sugerido no guia laboratorial [1], a estrutura do cancelador de eco seguirá o modelo apresentado na figura 17.

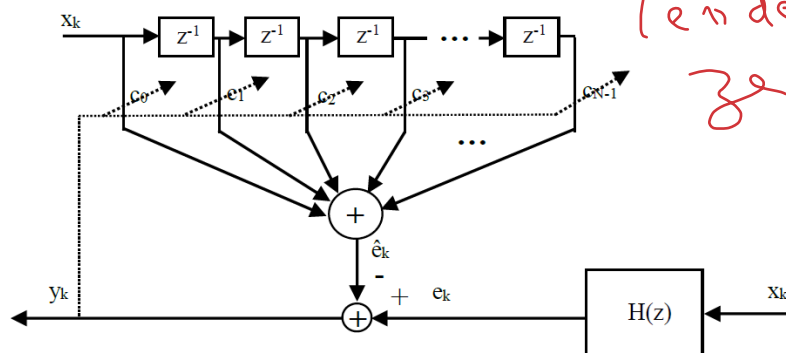


Figura 17: Diagrama de blocos do cancelador de eco a implementar. [1]

x_k representa o sinal de dados de entrada que origina o eco, c_i representa o coeficiente adaptativo da baixada i do cancelador, y_k representa o erro que, em retroação, adapta os coeficientes do filtro, e_k e \hat{e}_k representam, respectivamente, o sinal de eco e a sua estimativa dada pelo cancelador e, por último, $H(z)$ representa a função de sistema do caminho do eco a identificar pelo filtro.

Para a adaptação dos coeficientes do filtro, será utilizado o algoritmo LMS (Algoritmo do Gradiente Estocástico), segundo o qual a actualização a realizar em cada iteração (período de dados) é dada por:

$$c_{i,k+1} = c_{i,k} + 2\mu y_k x_{k-i}, \quad (3)$$

onde $c_{i,k}$ representa o valor do coeficiente da baixada i na iteração k , μ é o passo de adaptação que regula a rapidez de convergência (e condiciona a estabilidade e o erro residual), y_k é o erro instantâneo e x_{k-i} é a amostra do sinal de entrada no filtro na baixada i do filtro na iteração k .

É necessário ainda implementar um bloco que avalie o eco, bloco este que se denomina ERLE (*Echo Return Loss Enhancement*) e que faz esta medida em dB, a partir da razão entre os valores quadráticos médios do eco antes e depois do seu cancelamento, definido pela seguinte expressão:

$$ERLE = \frac{E[e_k^2]}{E[(e_k - \hat{e}_k)^2]} \Big|_{dB}. \quad (4)$$

Por último, refere-se ainda a presença de um bloco de ganho G (que se observa na figura 1), que tem por objetivo a atenuação do remoto. O seu valor será alterado nos diferentes testes a realizar mais à frente (mas refere-se já que o valor $G = 0$ corresponde a uma simulação de ausência de ruído).

2.3.1 Cancelador de Eco

Partindo do diagrama da figura 17, implementou-se em *Simulink* o seguinte esquema:

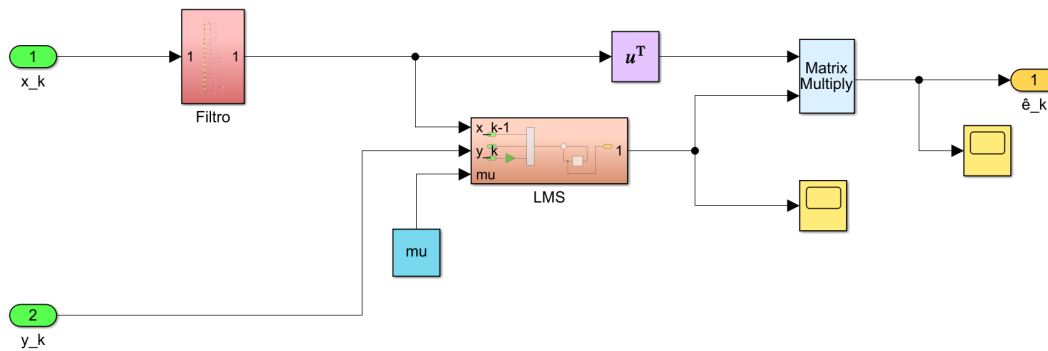


Figura 18: Diagrama de blocos em Simulink do cancelador de eco.

A sua implementação passa pela utilização de um filtro FIR de 15ª ordem, cujos coeficientes são adaptados pelo algoritmo LMS descrito atrás. No bloco de nome "Filtro" estão incluídas as baixadas do filtro, criadas a partir do sinal de entrada no cancelador, que são vetorizadas para funcionar com o restante sistema. Na figura 19 apresenta-se em mais detalhe este bloco.

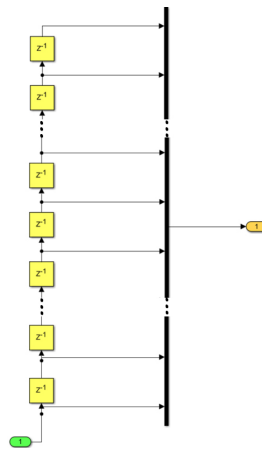


Figura 19: Diagrama de blocos em Simulink das baixadas do filtro FIR transversal.

2.3.2 ERLE

Implementando a equação 4 no *Simulink*, resultou o diagrama de blocos apresentado na figura 20:

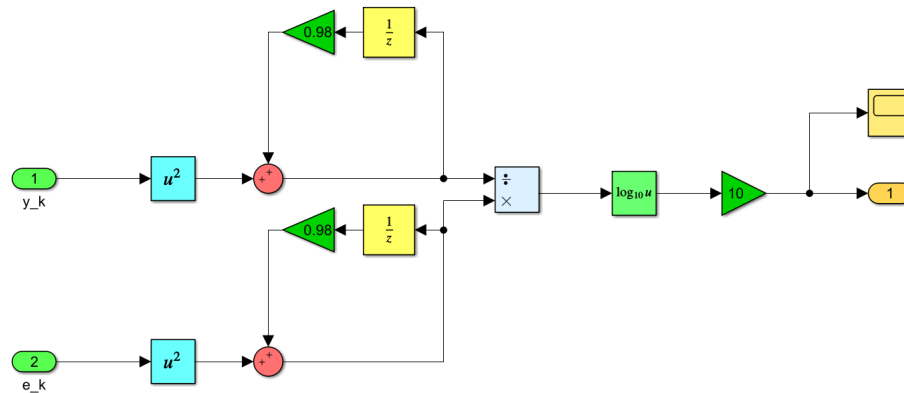


Figura 20: Diagrama de blocos em Simulink do bloco de cálculo de ERLE.

Destaca-se o cálculo do valor esperado que é feito através de um filtro passa-baixo de primeira ordem. Realimenta-se o sinal com um atraso ~~unitário~~ e ganho de 0.98.

O filtro passa-baixo tem assim uma frequência de corte baixa de forma a captar a parte contínua do sinal, que será a uma boa aproximação do valor esperado pretendido.

2.3.3 Teste e Análise

Para testar o funcionamento do cancelador de eco, aplicam-se à sua entrada dados provenientes do gerador de dados aleatórios e, em paralelo com o cancelador, liga-se um filtro FIR transversal de 4^a ordem, com coeficientes nulos em todas as baixadas, à exceção da última, que tem coeficiente 1. O sistema liga-se ao ERLE, de forma a retirar então a saída deste. Assim sendo, recorreu-se ao seguinte esquema desenhado em *Simulink*:

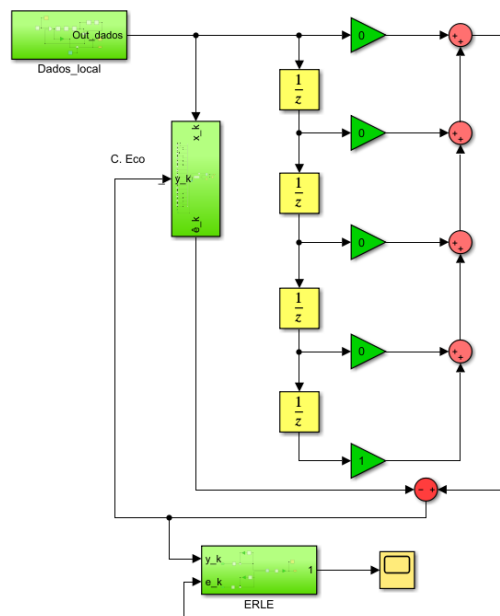


Figura 21: Circuito de teste do cancelador de eco.

Quando o circuito convergir, isto é, quando o erro y_k tender para zero, espera-se que o cancelador de eco identifique correctamente o filtro $H(z)$, ou seja, os coeficientes dos dois filtros são iguais nas baixadas comuns. Para os coeficientes das baixadas superiores a 4, espera-se que sejam nulos no cancelador de eco.

Utilizou-se também aqui o mesmo ritmo dos dados (uma vez que o sistema deve funcionar todo a este ritmo [1]). Uma vez que este foi escolhido como $T = 0.1s$, os valores de tempo de simulação sugeridos no guia foram indicados para realizar este teste, pelo que:

- $T = 0.1s$;
- Start time = 0.0s;
- Stop Time = 1000s;
- $\mu = 0.03$

No entanto, reparou-se que se se alterasse o valor de T para um valor superior, este tempo de simulação teria de ser aumentado para que fosse possível observar o patamar de estabilização, o que se deve ao facto de os algoritmos utilizados serem iterativos.

Utilizando estes parâmetros, obteve-se o seguinte gráfico à saída do bloco ERLE:

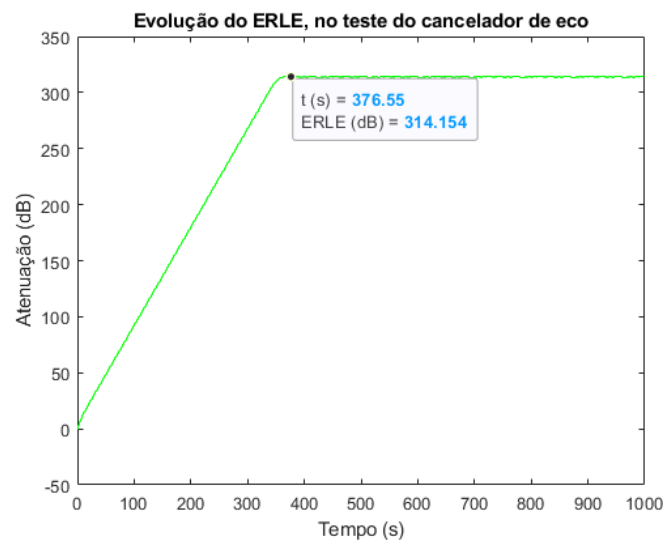


Figura 22: Parâmetro ERLE em função do tempo no teste do cancelador de eco.

Observa-se que a resposta tem uma evolução aproximadamente linear, de declive positivo, até estabilizar em torno de um valor próximo de 314dB (apresenta oscilações, mas é aproximadamente constante).

O facto de o ERLE estabilizar para o passo de adaptação escolhido prova que o cancelador de eco está a funcionar correctamente, ou seja, a estimação do eco iguala eventualmente o eco real do sistema de transmissão, anulando o erro.

Adicionalmente, expõem-se na figura 23 abaixo a evolução temporal dos coeficientes do cancelador de eco.

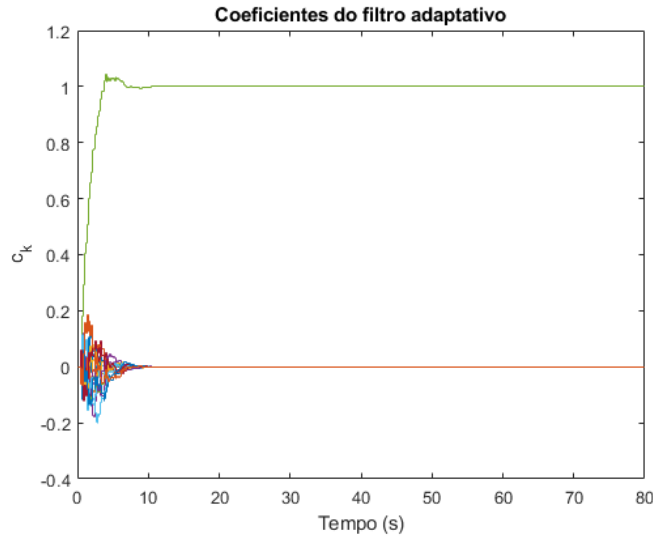


Figura 23: Coeficientes adaptativos em função do tempo no teste do cancelador de eco.

Daqui se conclui acerca da correcta identificação do filtro de quarta ordem: os coeficientes estabilizam num tempo muito inferior ao necessário para a estabilização do ERLE, para o valor de μ escolhido e em regime estacionário. Para além disto, os valores são os que se esperavam, todos os coeficientes são nulos à excepção do da baixada 4, que é 1.

2.4 Sistema Total

A partir destes subsistemas construídos atrás, fez-se a integração do sistema na sua totalidade, seguindo o esquema proposto na figura 1, e que se concretizou na figura 24.

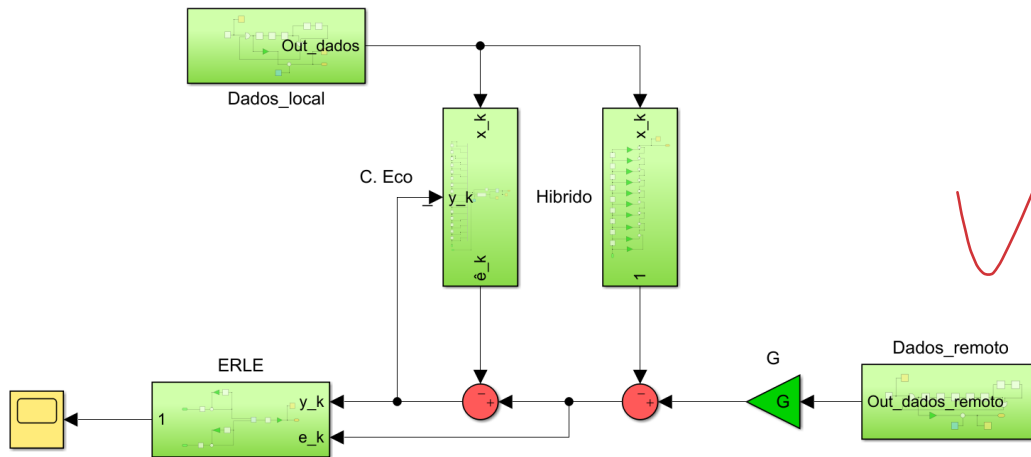


Figura 24: Circuito total de simulação do sistema de transmissão de dados.

2.4.1 Teste e Análise

2.4.1.1 Teste do sistema sem ruído ($G = 0$)

Passo de adaptação a $\mu = 0.03$ e ganho a $G = 0$

Começou-se por analisar o sistema total para o caso em que $G = 0$, isto é, em que não há presença de ruído.

Tal como sugerido em [1], implementou-se o sistema com um passo de adaptação $\mu = 0.03$ e tempo de aquisição de 1000 s. Foi utilizado um tempo de amostragem de 0.1 s. Obtiveram-se as evoluções temporais, tanto do *ERLE*, na figura 25, como dos valores dos coeficientes do *Cancelador de Eco*, (c_k), na figura 26.

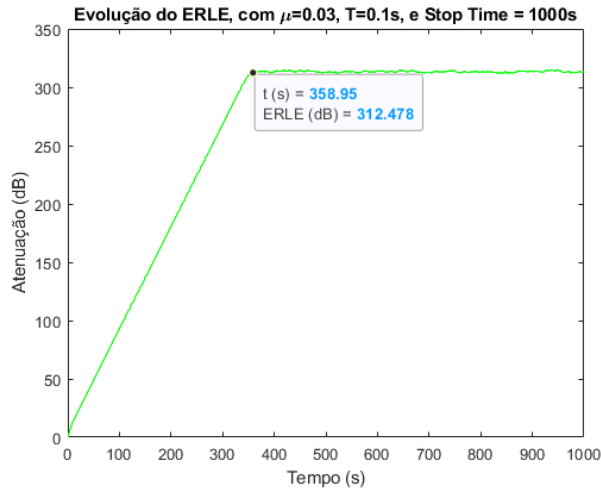


Figura 25: Evolução temporal do *ERLE* (dB), para $\mu = 0.03$, $T=0.1s$, e Stop Time = 1000s.

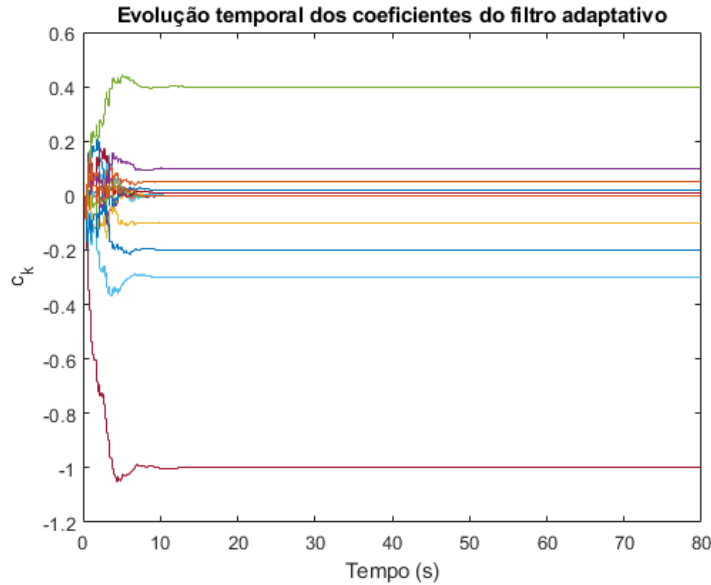


Figura 26: Evolução dos coeficientes c_k em função do tempo, $t(s)$, para $\mu = 0.03$, $T=0.1s$, e Stop Time = 1000s.

Analisando o gráfico da figura 25, constatamos um aumento monótono e uniforme do valor do *ERLE* até um determinado instante, a partir do qual o valor estabiliza em torno de um dado valor. O instante em que isso acontece foi determinado como sendo:

$$t_0 \approx 359s.$$

Obteve-se o valor do *ERLE* nesse instante, $ERLE(t_0) = 312dB$. Assim, no regime transitório, $t \in [0, t_0]$, a variação temporal do *ERLE* é aproximadamente linear, e pode assim ser dada por:

$$\frac{d}{dt}(ERLE) \approx \frac{ERLE(t_0)}{t_0} \approx 0.869dB/s.$$

Para $t > t_0$, ou seja, no período em que a saída do *ERLE* já se encontra estabilizada, verificam-se oscilações muito ligeiras em torno do valor em que este estabiliza, contudo, estas têm amplitude comparativamente muito baixas, e são portanto desprezáveis para a situação em análise.

Quanto ao gráfico da figura 26, verifica-se a mesma situação, em que há um período transitório, seguido por uma estabilização dos valores dos coeficientes. Contudo, há a notar que a estabilização do *ERLE* ocorre bastante depois da estabilização dos coeficientes do filtro adaptativo, visto que esta última ocorre para $t \approx 10$ s.

Passo de adaptação dez vezes menor, $\mu = 0.003$

De seguida alterou-se o valor do passo adaptação para um valor 10 vezes menor que o anterior, isto é, $\mu = 0.003$. Verificou-se ser necessário aumentar o *Stop Time* da simulação por forma a visualizar-se a estabilização do *ERLE*, tendo sido escolhido o valor de 2000 s, obtendo-se assim os seguintes resultados:

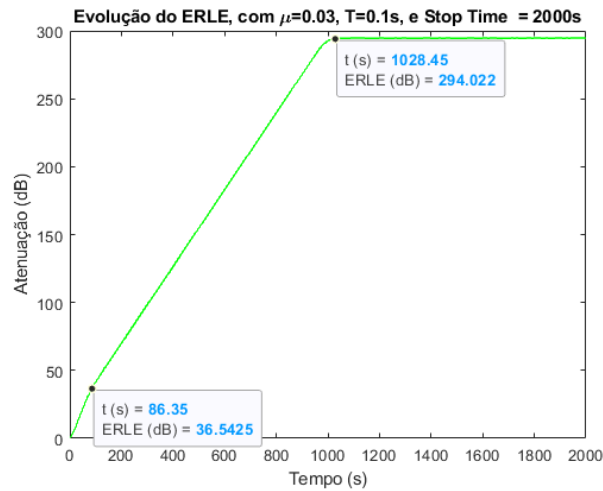


Figura 27: Evolução temporal do *ERLE* (dB), para $\mu = 0.003$, $T=0.1s$, e Stop Time = 2000s.

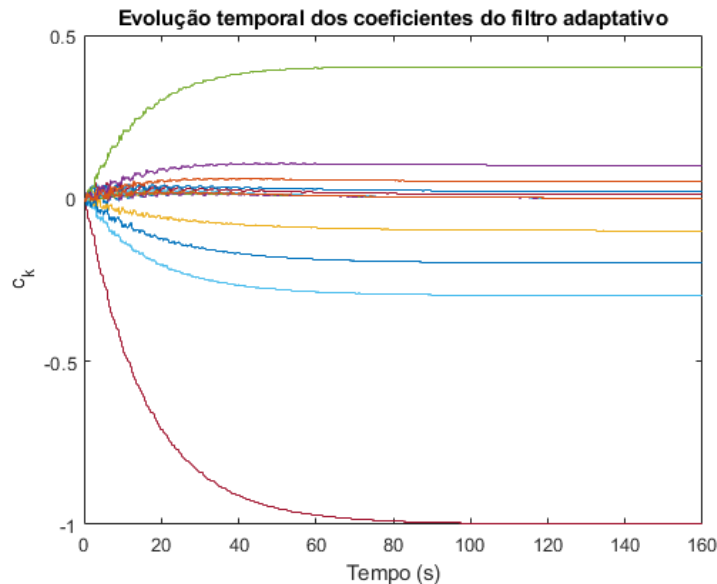


Figura 28: Evolução dos coeficientes c_k em função do tempo, $t(s)$, para $\mu = 0.003$, $T=0.1s$, e Stop Time = 2000s.

Da análise da figura 27, podemos identificar três regimes distintos da resposta do *ERLE*, com o tempo.

Para $t \in [0, 86]s$ tem-se um regime transitório, onde a evolução é linear com o tempo e onde a taxa de variação é maior, sendo:

$$\left(\frac{d}{dt} (ERLE) \right)_1 \approx \frac{36.54}{86.35} \approx 0.423 dB/s,$$

o que corresponde a um valor 2.05 vezes menor que o obtido para $\mu = 0.03$.

Para $t \in [86, 1028]s$, verifica-se uma evolução também linear, mas com taxa de variação menor. O *ERLE* acaba por estabilizar no instante:

$$t_0 \approx 1028s,$$

sendo $ERLE(t_0) \approx 294dB$.

Obteve-se assim para este regime:

$$\left(\frac{d}{dt} (ERLE) \right)_2 \approx \frac{294.02 - 36.54}{1028.45 - 86.35} \approx 0.273 dB/s.$$

Verifica-se assim a diminuição da taxa de variação, à medida que se diminui o valor de μ . O tempo necessário para otimizar a estimativa do eco pelo *Cancelador de Eco*, é consequentemente maior, ou seja:

$$t_0 \Big|_{\mu=0.003} = 2.865 t_0 \Big|_{\mu=0.03}.$$

São assim necessárias 2.865 vezes mais iterações, quando $\mu = 0.003$, para se atingir a convergência da estimativa do eco+ruído, do que quando $\mu = 0.03$.

Note-se ainda que para $\mu = 0.03$, a convergência foi suficientemente rápida para que não seja possível distinguirem-se os 2 diferentes regimes de evolução do *ERLE*, como se verificou para o caso de $\mu = 0.003$.

Relativamente à figura 28, podemos afirmar que o instante em que ocorre a estabilização dos valores das constantes c_k foi aproximadamente $t = 80s$, também superior ao tempo necessário $\mu = 0.03$. Há ainda a notar o facto do aumento do tempo necessário para a estabilização das constantes ser (em termos relativos) superior ao aumento do tempo necessário para a estabilização do *ERLE*.

Passo de adaptação μ_{max} para garantir a estabilidade

Nesta secção pretendeu-se determinar o valor máximo de μ para o qual a resposta do *ERLE* ainda conduz a um processo estável. Ou seja, o valor para o qual a resposta do *ERLE* estabiliza num determinado valor, ao invés de decrescer monotonamente para valores negativos.

Com este objetivo, e partindo do valor sugerido de $\mu = 0.03$, incrementou-se sucessivamente o valor do passo de adaptação em 0.01, até obter uma resposta instável. De seguida, decrementou-se sucessivamente na casa decimal seguinte, ou seja, 0.001 até obter-se uma resposta estável, e assim sucessivamente, até se atingir o limiar da estabilidade. Obteve-se assim o valor:

$$\mu_{max} = 0.0625.$$

Análise para o passo de adaptação $\mu = \mu_{max}$

Tal como determinado na secção anterior, o valor máximo do passo de adaptação para o qual a resposta resulta num processo estável é $\mu_{max} = 0.0625$. A correspondente resposta do *ERLE* em função do tempo, t , obtida para $\mu = 0.0625$ é apresentada na figura 29. Note-se que apesar de ter sido utilizado um *Stop Time* de 1000s, apenas são apresentados os resultados até 100 s, pois verifica-se que a resposta segue um padrão semelhante durante o resto do tempo.

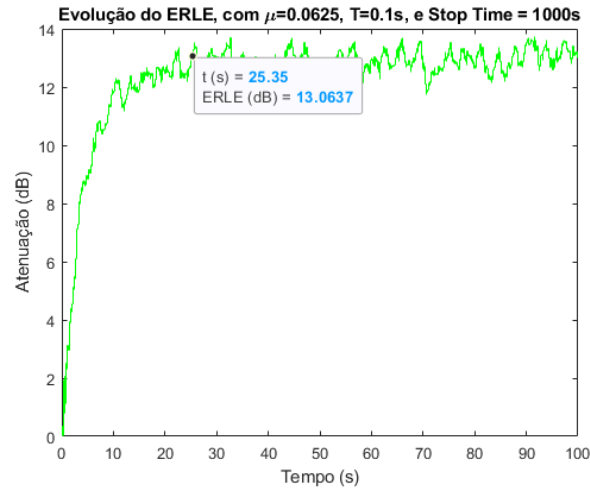


Figura 29: Evolução temporal do *ERLE* (dB), para $\mu = 0.0625$, $T=0.1s$, e Stop Time = 1000s.

Analisando a figura 29, verifica-se que o valor da atenuação rapidamente estabiliza, e oscila em torno de um ponto de equilíbrio sensivelmente constante, de aproximadamente 13 dB. As oscilações nesta situação foram consideravelmente superiores às situações até agora analisadas, tratando-se do valor máximo que garante a estabilidade. Tal como seria de esperar, do comportamento do tempo de estabilização verificado com variações de μ , para o valor de μ_{max} há uma evolução para o valor estável da atenuação consideravelmente mais rápida que nas situações anteriormente analisadas, correspondendo a $t_0 \approx 25$ s. Contudo, a atenuação do eco é significativamente mais baixa.

Análise para um passo de adaptação $\mu > \mu_{max}$

Com o objetivo de demonstrar o que ocorre quando a resposta do *ERLE* não conduz a um processo estável, utilizou-se $\mu = 0.063$, obtendo-se a seguinte resposta:

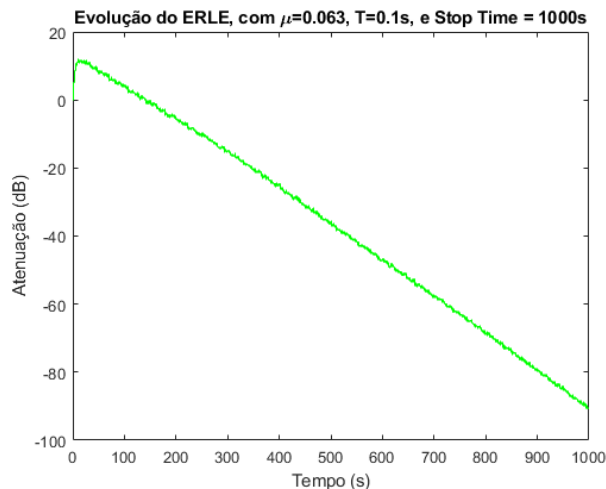


Figura 30: Evolução temporal do *ERLE* (dB), para $\mu = 0.063$, $T=0.1s$, e Stop Time = 1000s.

Tal como explicado anteriormente, na figura 30 o *ERLE* não estabiliza em nenhum valor, apresentando um comportamento monótono decrescente, ou seja, não conduz a um processo estável.

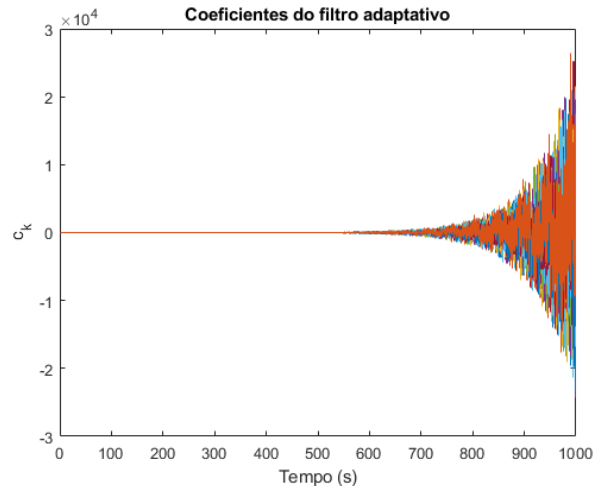


Figura 31: Evolução dos coeficientes c_k em função do tempo, $t(s)$, para $\mu = 0.063$, $T=0.1s$, e Stop Time = 1000s.

De igual modo, na figura 31 se verifica que os valores dos coeficientes do filtro adaptativo não estabilizam, divergindo por completo, tornando assim impossível a existência de atenuação estável do eco.

Sugestões de otimização do sistema

Existem 4 parâmetros do sistema que podem ser otimizados:

- Tempo de convergência, t_0 ;
- Taxa de variação $\frac{\Delta ERLE}{\Delta t}$;
- Valor de estabilização da atenuação do $ERLE$;
- Oscilações do $ERLE$.

Optimizar o tempo de convergência, ou a taxa de variação $\frac{\Delta ERLE}{\Delta t}$, implica otimizar ambos, tendo em conta que o passo de adaptação não é alterado. Para efetuar esta otimização, deve-se assim determinar o valor de μ para o qual t_0 é mínimo.

Optimizar o valor da atenuação, corresponde a maximizar a atenuação do eco em que a resposta estabiliza. Para tal, deve ser encontrado o valor de μ que maximiza este valor, por forma a reduzir tanto quanto possível o efeito do eco.

A estabilidade pode ser otimizada, escolhendo o valor de μ mais pequeno possível. No entanto, para μ reduzido, nenhum dos parâmetros anteriores seria otimizado. Para $\mu = 0.003$, tem-se uma instabilidade comparativamente reduzida, mas para $\mu = 0.0625$, verifica-se uma instabilidade muito elevada, correspondendo a oscilações de cerca de 8% em torno do valor de estabilização.

Assim, diferentes valores de μ poderão ser considerados ótimos, dependendo de quais forem as prioridades no projeto do filtro adaptativo.

2.4.1.2 Teste do sistema com ruído ($G \neq 0$)

Passo de adaptação a $\mu = 0.03$ e ganho a $G = 0.1$

Nesta secção pretende-se analisar o sistema, mas introduzindo ruído no mesmo para simular condições mais próximas do que acontece na realidade. Este ruído é introduzido através de um gerador de dados remoto, com um ganho G definido previamente. O gerador remoto é completamente independente do gerador de dados local.

Tal como sugerido, começou-se por implementar um passo de adaptação $\mu = 0.03$, $G = 0.1$, tempo de amostragem $T = 0.1$ s, e *Stop Time* de 1000 s. Obtiveram-se os gráficos das evoluções no tempo do *ERLE* (figura 32) e dos valores dos coeficientes do filtro adaptativo c_k (figura 33). Note-se que apesar de ter sido utilizado um *Stop Time* de 1000s, apenas são apresentados os resultados até 150 s, pois verifica-se que a resposta segue o mesmo padrão durante o resto do tempo.

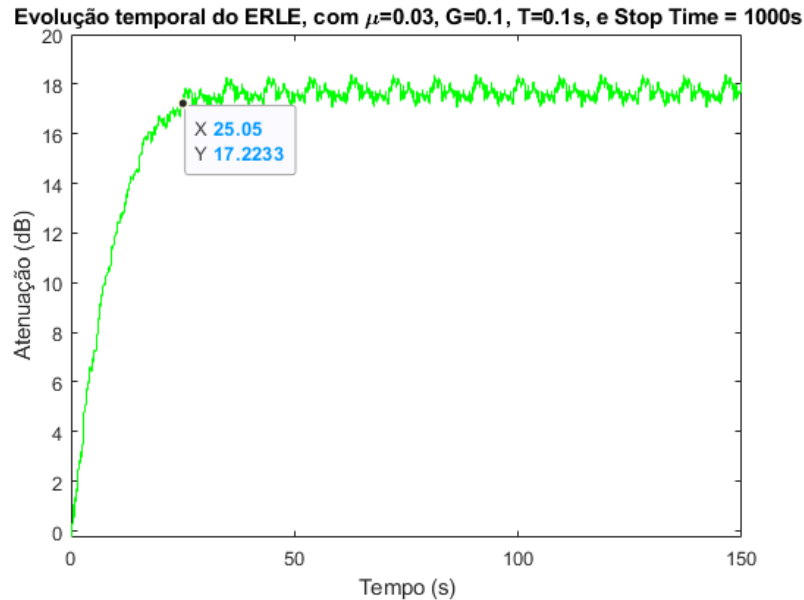


Figura 32: Evolução temporal do *ERLE* (dB), para $\mu = 0.063$, $G=0.1$, $T=0.1$ s, e Stop Time = 1000s.

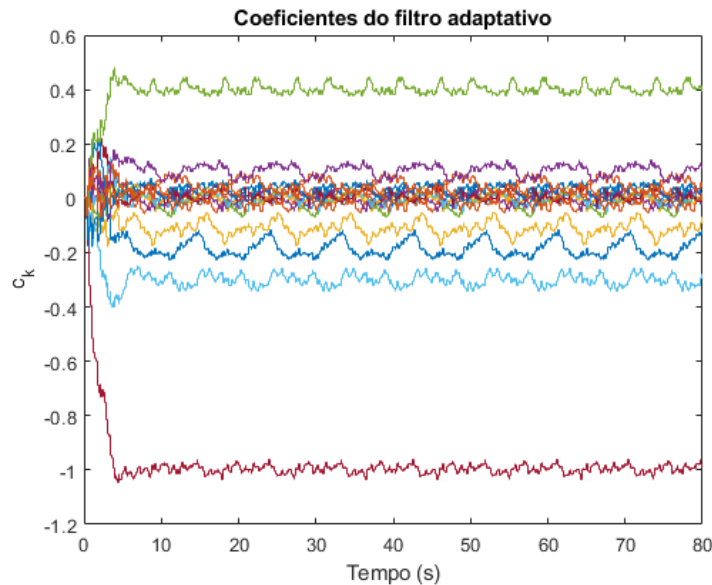


Figura 33: Evolução dos coeficientes c_k em função do tempo, $t(s)$, para $\mu = 0.003$, $G=0.1$, $T=0.1$ s, e Stop Time = 1000s.

A introdução de ruído perturba significativamente a atenuação de eco, reduzindo o seu valor de cerca de 312dB para 17dB. Esta redução poderá ser explicada pelo facto de o cancelador de eco não ser capaz de cancelar o ruído, cancelando apenas o eco produzido pelo híbrido. Nesta situação, o filtro processa o sinal com ruído e com eco como um só.

Aqui, o sinal e_k passa a ser constituído pelo eco e pelo sinal do gerador remoto que, apesar de atenuado, afeta o eco proveniente do emissor local. Assim sendo, os coeficientes do filtro adaptativo não vão verdadeiramente estabilizar e vão oscilar em torno de determinados valores, de forma periódica. Esta oscilação irá também contribuir para que o valor da atenuação seja significativamente mais baixo.

Passo de adaptação $\mu = \mu_{max}$ e $G = 0.4$

De seguida, utilizou-se o valor máximo de μ calculado sem ruído e aplicou-se um ganho de 0.4 para a introdução de ruído. Obteve-se assim a seguinte resposta:

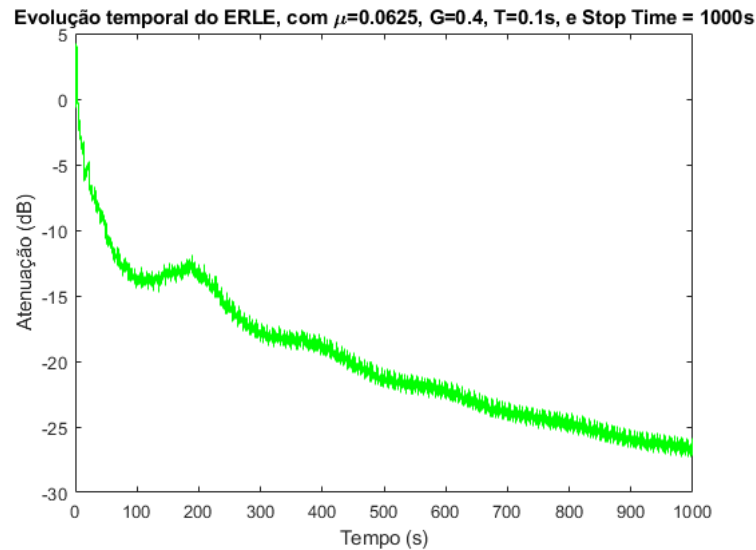


Figura 34: Evolução temporal do $ERLE$ (dB), para $\mu = 0.03$, $G=0.1$, $T=0.1s$, e Stop Time = 1000s.

Como é possível constatar na figura 34, utilizando o valor máximo que conferia uma resposta estável sem ruído, e aplicando ruído, o filtro não consegue atenuar com sucesso o eco, falhando na sua função de identificação, e levando à incapacidade de estabilização dos coeficientes, como se evidencia na figura 35.

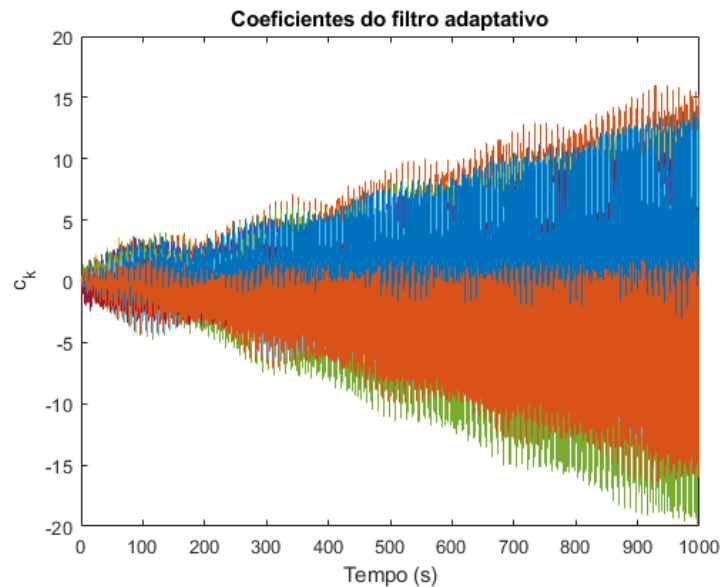


Figura 35: Gráfico coeficientes c_k em função do tempo, $t(s)$, para μ_{max} , $G = 0.4$ e $T = 5000s$.

Este comportamento está de acordo com o esperado, dado que com o valor de μ_{max} , a resposta se encontrava na margem da estabilidade, sendo suficiente a introdução de ruído para que o sistema deixe de conduzir a um processo estável.

Para resolver este problema, ou reduzir o impacto do ruído, poder-se-ia aumentar a ordem do filtro, mas é importante notar que não existem sistemas perfeitos e o ruído vai sempre estar presente. Outra solução plausível é a alteração dos parâmetros μ_{max} (que neste caso teria que ser menor do que o valor calculado sem ruído) e/ou a atenuação do ruído que entra no sistema.

3 Conclusões

No que diz respeito à simulação do sistema na sua totalidade, mas sem ruído, pode-se concluir que a eficiência no cancelamento do eco está diretamente relacionada com o valor do passo de adaptação μ para o algoritmo *LMS*. Foi possível determinar os passos a tomar para otimizar o cancelamento de eco, bem como o valor de μ limite que garante a existência de uma resposta estável, μ_{max} .

Ao introduzir ruído no sistema, o cancelador de eco vai associar o sinal de erro como proveniente apenas do eco do gerador de dados local quando na realidade há também uma contribuição do ruído do gerador remoto. Por outras palavras, vai associar o ruído do gerador remoto ao eco do emissor local e observá-lo como sendo o eco total deste último. Contudo, o ruído é independente deste gerador e logo, o filtro apenas vai conseguir identificar correctamente o eco do gerador local, sendo assim incapaz de estabilizar num valor fixo devido à variabilidade do ruído proveniente do emissor remoto. Neste caso também, o funcionamento do sistema vai depender do passo de adaptação utilizado. Há ainda a mencionar que para os mesmos valores de μ utilizados no sistema sem ruído, nota-se no sistema com ruído uma significativa perda de eficiência e redução da atenuação do eco, para $\mu = 0.03$. Para μ_{max} , o sistema não conduz a um processo estável, não sendo capaz assim de cumprir a sua função de cancelar o eco.

4 Referências

- [1] José António Beltran Gerald (2021), "Guia - 3º TRABALHO DE LABORATÓRIO, FILTRO ADAPTATIVO" URL:https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/563568428822836/LAB%203%20-Filtro%20Adaptativo_2021.pdf