

INSTITUTO FEDERAL
SANTA CATARINA
Campus São José

Realização de transmissor/receptor e detector DTMF:

Equipe 1: Guilherme Medeiros e Alisson Boeing

Disciplina: Processamento de Sinais Digitais

Professor: Marcos Moecke

São José, 13 de Dezembro de 2019

Sumário

1. Introdução
 - 1.1. Sobre a discagem DTMF
 - 1.2. Processo de filtragem DTMF
2. Objetivos
3. Especificação
 - 3.1. Sobre os tons DTMF e as saídas do sistema
 - 3.2. Sobre a frequência de amostragem
 - 3.3. Sobre os filtros realizados
4. Realização
5. Resultados
6. Referências

Resumo

Uma URA (unidade de resposta audível) pode ser implementada através de uma sequência de utilização de filtros e chaveamentos lógicos. Este projeto se propõe a realizar a simulação de uma URA utilizando o software Matlab como instrumento. Foram utilizados filtros IIR e FIR de especificação do próprio grupo, além de blocos de processamento de dados para tratamento. Ao final, foi possível chavear uma entrada de áudio dependendo do tom DTMF pressionado ao início. O projeto atende a maioria das especificações, com exceção de duas saídas de erro que não foram implementadas.

1. Introdução

1.1 Sobre a discagem DTMF

No desenvolvimento da comunicação telefônica, uma das maiores dificuldades foi a de implementar um sistema capaz de determinar, em uma ligação de um elemento A para um elemento B, como encontrar B a partir de A. Um endereço se mostrou necessário para encontrar e realizar a comunicação. Após perceberem que um endereço pode ser descrito como uma sequência de números, os primeiros engenheiros e cientistas da telecomunicação que trabalharam neste tipo de tecnologia agora precisavam desenvolver uma maneira de transmitir este código de alguma maneira que tornasse possível a comunicação (Cram, 2006).

Sabendo que, em telefonia, um dos elementos comuns de toda comunicação era a voz humana e que a voz é um som transmitido em uma largura de banda mínima que vai de 300Hz à 3kHz, utilizar tons específicos dentro deste intervalo para fazer a transmissão se tornou a tecnologia que ficou conhecida como *DTMF (dual-tone multi-frequency)*.

Utilizar apenas um tom de uma frequência como identificador de um número e uma sequência de tons como um código de envio pode ser perigoso já que a voz pode simular um

destes tons, um sistema mais complexo é necessário (Cram, 2006). No DTMF, define-se uma matriz de quatro linhas e três colunas, uma tabela em que cada entrada é a combinação de duas frequências, uma linha e uma coluna. Cada entrada é definida como um tom DTMF e a tabela de linhas e colunas pode ser visto na figura 1, onde pode ser visto que as frequências das linhas são as mais baixas e frequências da coluna são as mais altas.

Ou seja, dois tons DTMF diferentes podem ter uma frequência em comum, mas o conjunto de linha e coluna é único para cada tom. Como em uma fala humana a frequência varia muito rápido, foi necessário estipular que um tom DTMF é reconhecido apenas quando as duas frequências que o determinam estão ativas em um sinal por 65 milissegundos.

Assim, transmitindo uma sequência de tons DTMF, ou seja, uma sequência de duplas de frequência, torna-se possível transmitir um código que representa um endereço para uma central, onde o roteamento pode ser feito. Tudo isso pode ser realizado apenas com circuitos analógicos.

	1209 Hz	1336 Hz	1477 Hz
941 Hz	1	2	3
852 Hz	4	5	6
770 Hz	7	8	9
697 Hz	*	0	#

Figura 1: Tabela DTMF (Cram, 2006)

Entretanto, na transmissão da fala com os tons é impossível simplesmente identificar os tons. O sinal precisa ser filtrado, separado de tudo que pode atrapalhar a verificação, como o som da comunicação (voz entre outros) e ruído do canal de transmissão. Para isso, é necessário realizar uma sessão de filtragens para separar as frequências DTMF de todas as outras frequências do sinal e verificar a ausência e presença dos tons. Todas essas filtragens estão detalhadas na seção 1.2.

1.2 Processo de filtragem DTMF

Com o objetivo de separar todas as frequências de um sinal complexo, onde estão presente sinais DTMF, ruído branco e sinais de voz, é necessário fazer uma sessão de filtragens, resultando exclusivamente em sinais separados com apenas a frequência de uma linha ou coluna da tabela representada na figura 1.

Considerando S um sinal recebido pela receptora em uma URA (*unidade de resposta auditiva*), componente responsável por fazer o processamento de S e especificar o destino da chamada, primeiro é necessário separar linha de coluna, ou seja frequências baixas de frequências altas. Para isso são utilizados dois filtros, um passa baixa e um passa faixa, ambos com frequência de corte em valores intermediários entre 941 e 1209Hz, com alta

atenuação na banda de corte, definida por -30dBm (ETSI, 2000). Os sinais de baixa frequência serão nomeados S_{LF} e os sinais de alta frequência serão nomeados S_{HF} . Todo o procedimento de filtragem pode ser verificado em um diagrama de bloco na figura 2.

Um comparador de limiar pode ser implantado neste ponto mas não é inteiramente necessário. À partir daí, o objetivo do sistema é separar agora, cada frequência DTMF separadamente (ETSI, 2000). S_{LF} e S_{HF} passam por uma sessão de filtros passa faixa. Daqui já saem sinais com valores de frequência apenas onde é considerável para cada tom DTMF, são eles S_1, S_2, S_3 (etc), para, respectivamente 1, 2, 3 (etc).

Os sinais de cada tom DTMF, agora discriminados, precisam ser retificados para o processo de decisão, para isso, o sinal passa por um bloco de valor absoluto e por um filtro passa baixa em baixíssima frequência, definida pelo valor de subida da onda, próximo de 5 milissegundos. Compreende-se, então, que a frequência de corte desse filtro é dada por:

$$\omega = \frac{1}{2 * \pi * 5 * 10^{-3}} = 31 Hz \text{ (equação 1: frequência de corte do filtro de retificação)}$$

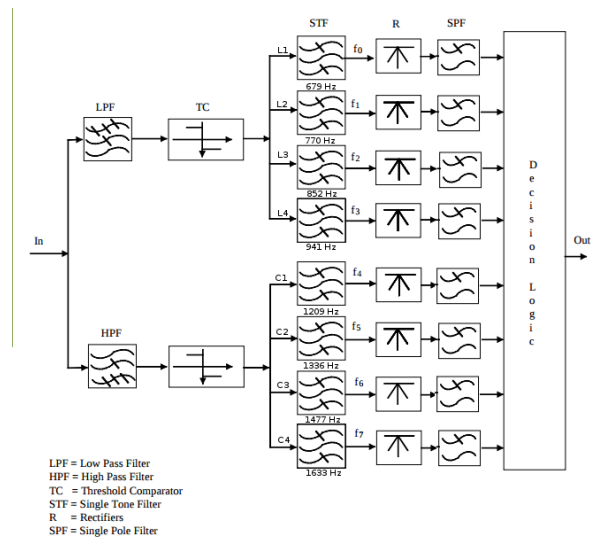


Figura 2: Procedimento de filtragem DTMF (ETSI, 2000)

Obtendo-se então os valores contínuos dos sinais, cada saída de todo este processo entra em um bloco lógico onde a decisão de qual tom (se algum) foi pressionado, é tomada. Este bloco pode ser implementado de formas variadas, inclusive em circuitos analógicos, por isso, este relatório não entrará em detalhes. A maneira com que os autores deste trabalho realizaram este processo está descrita na seção 4.

2. Objetivo:

Desenvolvimento de um sistema com transmissor, receptor e detector de sinais DTMF. O sistema precisa, ao final, processar a mistura de sinais DTMF, um sinal de voz e um sinal de ruído, conseguindo separar os tons DTMF e identificar qual foi transmitido. A relação sinal/ruído deve ser alterável entre 1dB e 80dB.

3. Especificação

O projeto em todo pode ser compreendido pela figura 3, representando todo o projeto à partir da recepção dos tons DTMF em um diagrama de blocos.

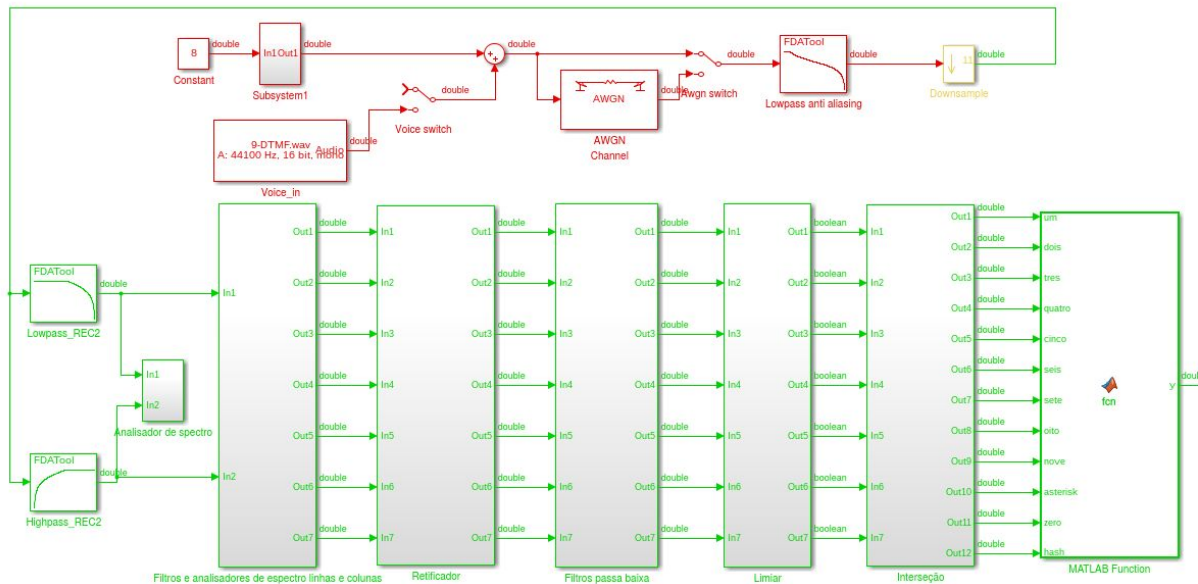


Figura 3: Representação em diagrama do projeto (criada pelos autores)

3.1 Sobre os tons DTMF e saídas do sistema

As entradas DTMF deverão gerar valores binário correspondente 1 => 0001 a 9 => 1001, 0 -> 1010, * => 1011, # => 1100. Estes valores deverão ser reconhecidos caso as frequências de linha e coluna do tom respectivo esteja representado. Os tons DTMF devem possuir tempo de duração de 65 milissegundos e pausa do mesmo valor.

Na saída do sistema, caso nenhuma frequência seja ativada o discriminador deverá indicar um código de "0000" (0). Caso seja ativada uma frequência o discriminador deverá indicar um código de ERRO 1 "1101" (13). Caso sejam ativados 2 linhas e 1 coluna ou 1 linha e duas colunas o discriminador deverá indicar um código de ERRO 2 "1110" (14). Caso contrário o discriminador deverá indicar um código de ERRO 3 "1111" (15).

A representação das linhas e colunas DTMF pode ser visto na tabela 1.

3.2 Sobre a frequência de amostragem

A frequência de amostragem f_{a2} do sinal de entrada no sistema receptor é de 44,1/N kHz, no entanto o sinal DTMF gerado no AUDACITY é amostrado em f_{a1} em 44,1 kHz, portanto é necessário incluir um filtro *antialiasing* (low pass) com frequência de corte em $(44,1/2)/N$ kHz e um circuito para subamostrar o sinal. Esse filtro deverá ser do tipo IIR, sendo de aproximação Butterworth ou Chebyshev tipo 1, para que tenha uma resposta de frequência monotonicamente decrescente após a frequência de corte. Assim o sistema terá duas frequências de amostragem, f_{a1} de 44,1 kHz até o subamostrador e f_{a2} de 44,1/N kHz

depois deste circuito. Para este grupo, o fator de *downsample* é de 11. Então a frequência f_{a2} pode ser definida por:

$$fa2 = \frac{44100}{N} = \frac{44100}{11} = 4009,1\text{Hz (equação 2: frequência de amostragem pós downsample)}$$

3.3 Sobre os filtros realizados

O primeiro filtro a ser realizado será feito com metade de f_{a2} , com valor de frequência de corte em f_{aliasing} de 2004,54Hz. A atenuação do filtro na banda de corte é de 30 dBm. Será utilizado o valor arredondado de 2005Hz.

Todo o bloco de geração dos tons e *downsample* pode ser visto na figura 4.

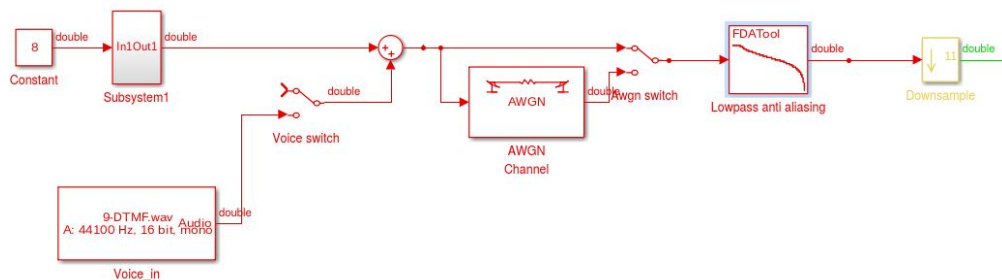


Figura 4: Diagrama com tons DTMF, canal AWGN e processo de subamostragem (criada pelos autores)

É necessário fazer a separação entre as frequências altas e frequências baixas que representam as linhas e colunas dos tons DTMF, como pode ser visto na figura 1. Esta separação será feita utilizando dois filtros, um passa baixas e um passa altas. O bloco desses filtros segue logo na saída da representação da figura 2 e pode ser visto na figura 5.

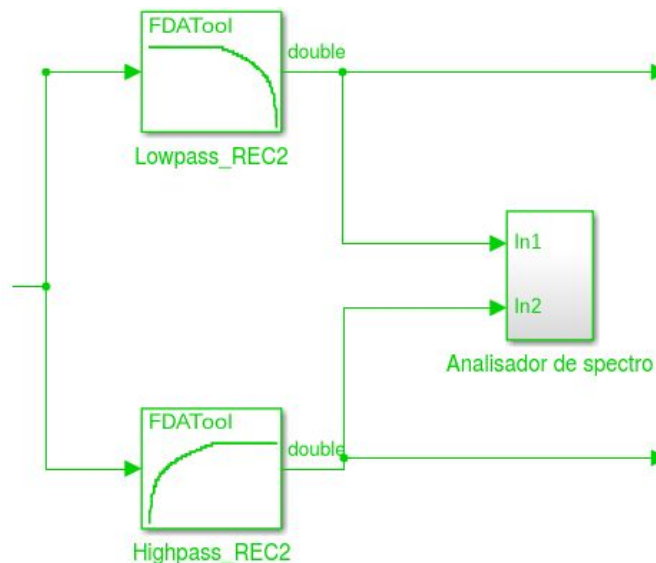


Figura 5 - Separação entre colunas e linhas (criada pelos autores)

Ambos os filtros foram do tipo IIR com a aproximação de Butterworth em frequência de corte em 1066,615Hz, definida pela média geométrica da maior das baixas frequências e menor das altas frequências:

$$f_{cP} = \sqrt{941 * 1209} = 1066,615Hz \text{ (equação 3: Frequência de corte do bloco separador)}$$

A atenuação na banda de corte é de 20dB.

Os filtros das linhas e colunas serão filtros passa faixa do tipo FIR. Serão usadas janelas do tipo Hamming. Caso haja diferentes atrasos dados por ordem diferente nos filtros, essas diferenças de atraso serão compensadas com um circuito de atraso. As frequências utilizadas no projeto destes filtros podem ser vistas na tabela 1, considerando a frequência central de cada linha ou coluna + 1.5% + 2 Hz.

Frequência (Hz)	Fs1	Fp1	Fp2	Fs2
679,000000	630,000000	666,815000	691,185000	712,940000
770,000000	734,695000	756,450000	783,550000	801,440000
852,000000	819,330000	837,220000	866,780000	886,148333
941,000000	905,516667	924,885000	957,115000	1034,365000
1209,000000	1111,615000	1188,865000	1229,135000	1257,410000
1336,000000	1285,685000	1313,960000	1358,040000	1389,641667
1477,000000	1421,243333	1452,845000	1501,155000	1536,271667
1633,000000	1571,388333	1606,505000	1659,495000	1680,000000

Tabela 1: Frequências utilizadas no projeto dos filtros

A atenuação na frequência de corte foi definida como 20dBm e foram usados filtros do tipo FIR. Este bloco pode ser visto na figura 6. Estes filtros têm o objetivo de selecionar cada tom DTMF, separando de qualquer impureza causada pelo canal AWGN ou pelo sinal de voz inserido. Entretanto, aqui os sinais ainda não estão estáveis para a verificação em um bloco identificador, por isso, antes é necessário fazer uma retificação do sinal.

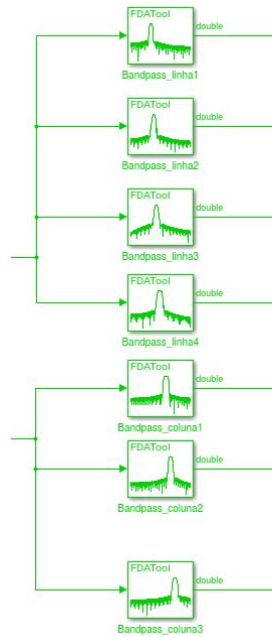


Figura 6: Bloco da seleção de frequências DTMF (criada pelos autores)

O processo de retificação será feito utilizando a função ABS que retorna o valor absoluto do sinal de entrada, somado a um processo de filtragem em baixas frequências. Essa frequência é calculada através do tempo de subida do sinal após o bloco ABS. Este tempo foi definido como 5 milissegundos, e a frequência foi calculada na equação 1.

Será utilizada a frequência de 33Hz, neste caso, colocando a frequência um pouco acima da definida pelo tempo de subida. Este bloco pode ser visualizado na figura 7.

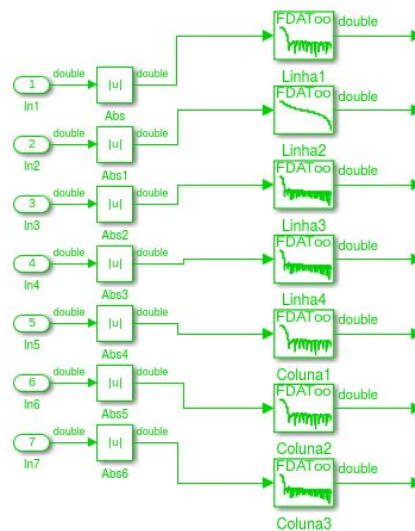


Figura 7: Bloco de retificação (criada pelos autores)

Após isto, será realizado um bloco de verificação de limiar, que testa a amplitude de cada sinal, sendo o limiar definido em 0,2 dB. Após isso, será realizado um bloco

identificador que analisará os sinais que estão acima do nível de atenuação definido e definirá qual tom está ativo. O retorno deste sistema já foi explicado na seção “**Sobre os tons DTMF e saídas do sistema**”.

4. Realização

Primeiramente foi necessário criar os arquivos que foram utilizados para verificar o funcionamento no andar da realização do projeto. Estes arquivos são os tons DTMF, que foram criados utilizando o software *AudaCity* ®. Cada tom DTMF é composto de 65 milissegundos de tom (duas frequências) e 65 milissegundos de silêncio. Foram criados os tons de 1 a 9, asterisco, cerquilha e uma sequência de todos os tons.

Estes tons são entradas de um multiplexador, que tem como seletor uma entrada escalar variando de 0 a 12. Em paralelo à essa entrada, há a entrada de um sinal de voz, que é somado à um tom DTMF (selecionado pelo multiplexador), o espectro dessa soma pode ser visualizado na figura 8.

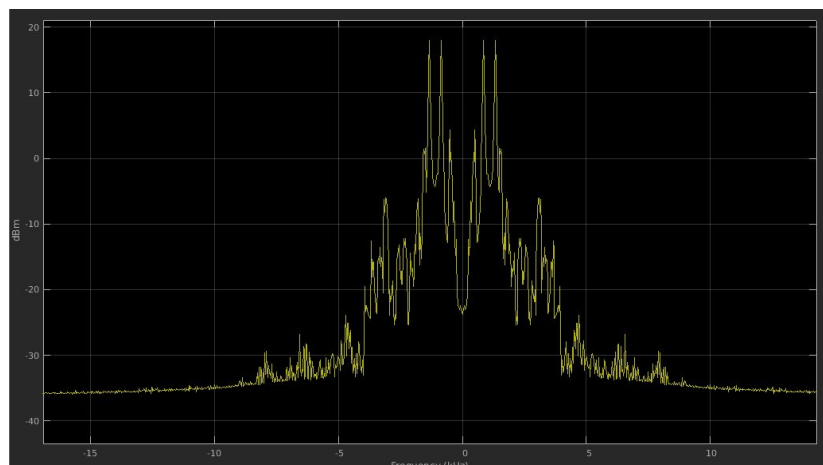


Figura 8: Sinal DTMF somado à uma entrada de áudio (simulink).

O próximo passo é uma chave que possibilita ao projetista adicionar um canal AWGN com relação sinal ruído modificável que adiciona ruído branco gaussiano ao sinal transmitido. A análise temporal do sinal até este ponto pode ser visualizado na figura 9.

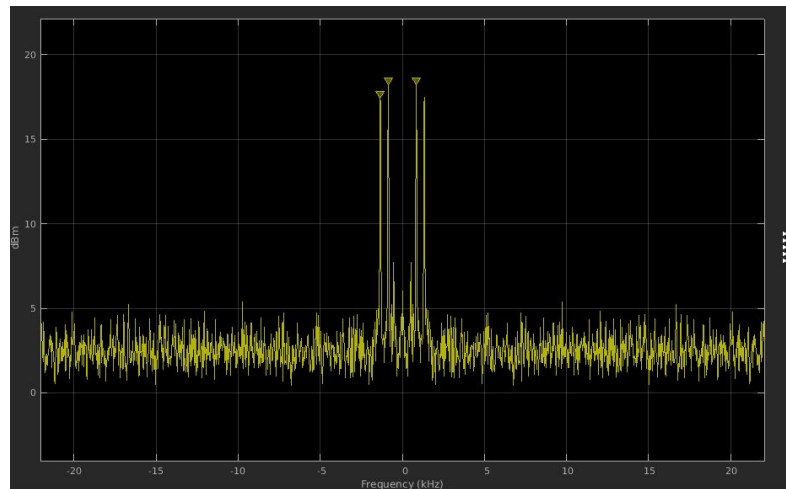


Figura 9: Sinal somado de ruído branco gaussiano (simulink)

À seguir é realizado um processo de *downsample*, mas antes é necessário fazer uma filtragem anti-aliasing. Este filtro é um IIR e tem frequência de corte em 2006 Hz, metade da frequência de amostragem pós *downsample*, que já foi definida no começo deste documento como 4001 Hz. Para cumprir as especificações, a ordem necessária foi 4.

O tom DTMF é amostrado em 44100 Hz, porém, a frequência do tom de maior frequência é de 1477 (Cram, 2006), tornando possível fazer este *downsample* e tratar de dados em menor amostragem. Todo o bloco descrito do começo da sessão 4 até aqui pode ser visualizado na figura 4, presente na seção 3.3.

Com o objetivo de separar as linhas e colunas, como foi descrito na seção 1 (Cram, 2006) foi necessário criar dois filtros, um passa alta e um passa baixas. Tanto o passa alta quanto o passa baixa são filtros do tipo IIR, com frequência de corte em 1066 Hz (ver equação 3). Para atender as especificações, ambos os filtros tiveram ordem 10. Todo este bloco pode ser visualizado na figura 5 da seção 3.3, bem como o gráfico demonstrando ambas as saídas dos filtros, que pode ser visto na figura 10.

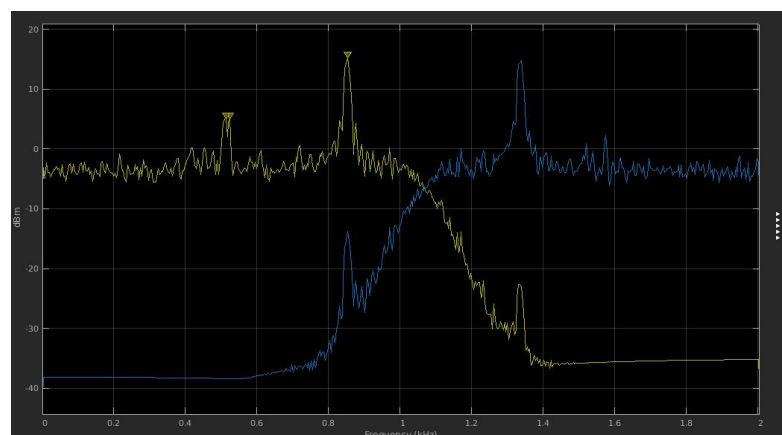


Figura 10: Saída dos filtros separadores altas e baixas frequências (simulink)

O próximo bloco separa cada linha e coluna dos tons DTMF. Ele é composto por uma série de filtros passa faixa, em paralelo, onde sua saída é a separação das sete frequências que

compõem quatro linhas e três colunas dos tons DTMF. Este bloco pode ser visualizado na figura 6. Aqui, cada frequência é devidamente discriminada (com uma largura aceitável de passagem, definida na seção 3.3, e mostrada na tabela 1). Foram utilizados filtros FIR sendo que a ordem de todos os filtros foi definida como 150, considerando que utilizando ordens diferentes seria necessário analisar e considerar o uso de um componente de atraso para cada uma dessas saídas (sabendo que o atraso de grupo depende linearmente da ordem). Foi decidido usar uma ordem que simplesmente funcionasse com todas as frequências e atendesse as especificações.

À partir daí, cada uma das frequências está separada e quase pronta para a comparação, só é necessário retificar o sinal e estabilizar para poder ser feita a verificação de ativação de cada botão. Para isto, é utilizado um retificador, implementado no *simulink* como uma função *abs*, que tira o valor absoluto do sinal de entrada. Para a estabilização é utilizado um filtro passa baixa com frequência de corte calculada pela equação 1 (seção 1.2) como 31 Hz, o grupo decidiu utilizar um pouco acima, em 33 Hz, devida à incerteza do tempo de subida. Na equação 1 foi utilizado 5 milissegundos, entretanto, foi encontrado na literatura que τ pode variar de 4 a 5 milissegundos (ETSI, 2000). O sinal antes e depois da retificação e estabilização pode ser visto na figura 10. Um diagrama com blocos desta sessão pode ser visto na figura 6 da seção 3.3.

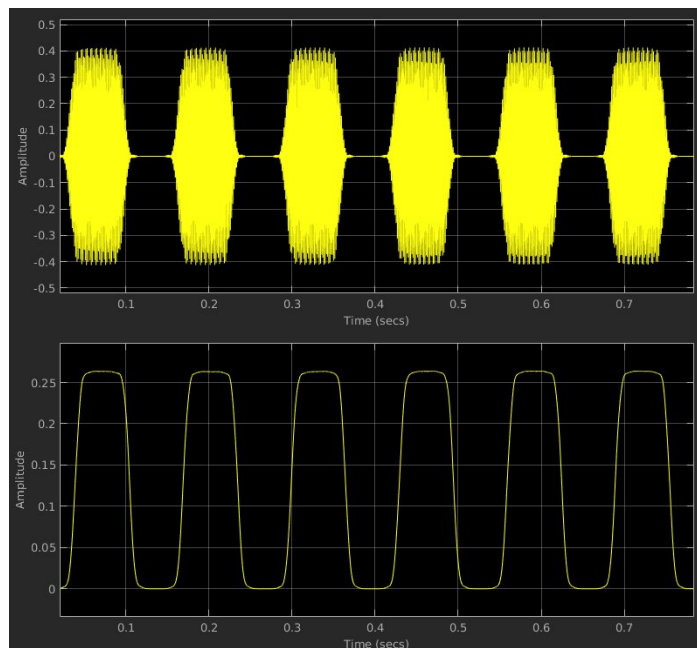


Figura 11: Sinal de entrada e saída do bloco de estabilização (simulink)

O projeto à partir deste ponto tem os dados prontos para comparação. Daqui em diante, todos os blocos são compostos de funções matemáticas criadas em blocos de *Matlab*.

Ao final dos blocos de processamento, cada botão pressionado chaveia a entrada de voz para uma das saídas definida pelo tom DTMF em questão. Este é o funcionamento básico de uma URA, que transmite à um endereço (transmitido através de um tom sonoro) uma outra entrada de áudio. Diferente da especificação, este projeto não estipula uma saída binária para

cada caso descrito na seção 3.1, mas sim simplesmente chaveia uma entrada de áudio ao endereço selecionado pelo tom pressionado. A única saída binária implementada é no caso de nenhum botão estar pressionado, sendo essa a saída “0”, que tem como valor binário “0000”. Um diagrama de blocos desta fase do projeto pode ser visto na figura 12.

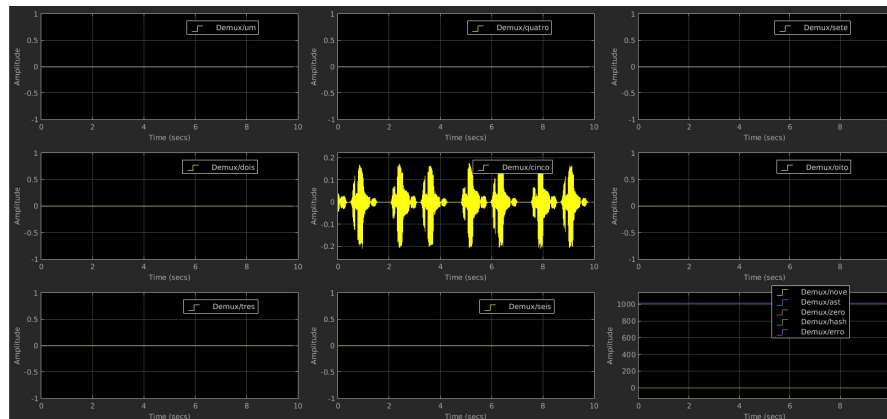


Figura 12: Saída do sistema (*simulink*)

Em resumo, o bloco de intersecção, verifica se ambos linha e coluna de determinado dígito estão selecionados, isto gera um sinal para cada tom, sendo este sinal 1, quando há intersecção e zero caso contrário. A duração deste sinal é verificada no bloco seguinte, considerando a contagem de amostras para 40 milissegundos. Se a afirmação anterior é verdadeira, este tom é considerado ativo e a saída deste bloco é um seletor para o multiplexador que chaveia a voz de entrada em 12 circuitos de saída. Uma representação do bloco de contagem pode ser visto na figura 13, onde a entrada é a sequência DTMF, “0123456789*#”, onde cada dígito está representado por uma cor diferente.

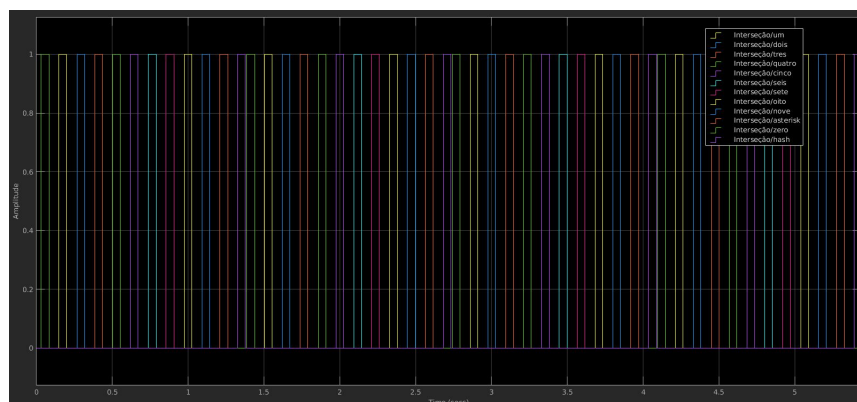


Figura 13: Bloco de contagem (*simulink*)

5. Resultados

Foi possível discriminar as frequências DTMF, mesmo as entradas em áudio fossem atrapalhadas por um sinal de voz e um canal AWGN. Foram utilizados filtros FIR e IIR de

especificação variada, que tornaram possível a separação, discriminação e processamento de todos estas entradas para cumprir o objetivo do projeto.

Como foi mencionado, a saída do projeto difere-se um pouco da especificação, simulando uma URA e simplesmente chaveando o sinal de voz para a saída determinada pelo tom, tratando apenas duas situação de erro, sendo elas, nenhuma frequência ativa e quatro frequências (mais que um tom). Essa saída é a própria voz de entrada e pode ser direcionada para qualquer circuito de auto falante para ser ouvida.

6. Referências

GANDARA FERREIRA, João Roberto, Artigo Técnico: Como Funcionam os Tons DTMF. **Cram**, 2006. Disponível em: <https://www.cram.org.br/wordpress/?p=1325>. Acesso em: 11 de Dezembro de 2019, às 15:41.

EUROPEAN TELECOMMUNICATIONS STANDARDS INSTITUTE. **ES 201 235-3 V1.1.1**: Specification of Dual Tone Multi-Frequency (DTMF) Transmitters and Receivers; Part 3: Receivers. Valbonne: Etsi, 2000. 13 p. Disponível em: <https://www.etsi.org/deliver/etsi_es/201200_201299/20123503/01.01.01_50/es_20123503v010101m.pdf>. Acesso em: 11 dez. 2019.