

*Instituto Superior de Engenharia de Lisboa*

Área Departamental de Engenharia de Electrónica e Telecomunicações e de Computadores

O Maestro

Projecto e Seminário 2010/2011

Relatório do Projecto

**Desenvolvido por:**  
Ana Correia e Diogo Cardoso

**Orientado por:**

Artur Ferreira Pedro Sampaio



*Instituto Superior de Engenharia de Lisboa*

Área Departamental de Engenharia de Electrónica e Telecomunicações e de Computadores

O Maestro

Projecto e Seminário 2010/2011

Relatório do Projecto

**Setembro 2011**

**Autores:**

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ANA SOFIA DUARTE CORREIA , Nº 31831 (A31831@ALUNOS.ISEL.PT)

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_  
DIOGO SÉRGIO ESTEVES CARDOSO, Nº 32466 (A32466@ALUNOS.ISEL.PT)

**Orientadores:**

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_  
ARTUR FERREIRA? (ARTURJ@ISEL.PT)

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_  
PEDRO MIGUEL SAMPAIO? (PSAMPAIO@CC.ISEL.PT)

# Resumo

# Agradecimentos

Conteúdo

[Resumo I](#_Toc302427664)

[Agradecimentos III](#_Toc302427665)

[1. Introdução 1](#_Toc302427666)

[1.1 Motivação 1](#_Toc302427667)

[1.2 Objectivos e Descrição 2](#_Toc302427668)

[1.3 Análise de Requisitos 3](#_Toc302427669)

[1.4 Soluções existentes 4](#_Toc302427670)

[1.5 Organização do documento 4](#_Toc302427671)

[2. Formulação do Problema 6](#_Toc302427672)

[2.1. Conceitos musicais 7](#_Toc302427673)

[2.1.1. Notas musicais 7](#_Toc302427674)

[2.1.2. Figuras musicais 8](#_Toc302427675)

[2.1.3. Alterações Musicais 9](#_Toc302427676)

[2.1.4. Claves Musicais 10](#_Toc302427677)

[2.1.5. Compasso 10](#_Toc302427678)

[2.1.6. Pauta 12](#_Toc302427679)

[2.1.7. Instrumento 12](#_Toc302427680)

[2.2. Instrumento de Teste 13](#_Toc302427681)

[2.3. Algoritmos de detecção de Frequências 14](#_Toc302427682)

[3. Detecção de frequência 17](#_Toc302427683)

[3.1. - O algoritmo de Goertzel 17](#_Toc302427684)

[3.2. Descrição 18](#_Toc302427685)

[3.3. Características 20](#_Toc302427686)

[3.4 Implementação do algoritmo 21](#_Toc302427687)

[3.5 Tratamento da Resolução do Goertzel 22](#_Toc302427688)

[3.6 Filtragem do sinal 24](#_Toc302427689)

[3.7 Filtros *FIR* 25](#_Toc302427690)

[4. Implementação 27](#_Toc302427691)

[4.1 Linguagem de programação 27](#_Toc302427692)

[4.2. Algoritmo de Goertzel 27](#_Toc302427693)

[4.3. GoertzelController 28](#_Toc302427694)

[4.3.1 Configuração e Parametrização 29](#_Toc302427695)

[4.3.2 Samples Manager 30](#_Toc302427696)

[4.3.3 Goertzel Filters 30](#_Toc302427697)

[4.3.4 Results Controller 31](#_Toc302427698)

[4.3.5 Funcionamento e Características 32](#_Toc302427699)

[4.4 Arquitectura PC (Windows) 34](#_Toc302427700)

[4.5 Arquitectura ARM7 35](#_Toc302427701)

[4.5.1 Aquisição de sinal 35](#_Toc302427702)

[4.5.2 Sistema Operativo 35](#_Toc302427703)

[4.5.3 *Port* da infra-estrutura para *ARM* 37](#_Toc302427704)

[5. Testes e Resultados 39](#_Toc302427705)

[5.1. Testes ao algoritmo de Goertzel 39](#_Toc302427706)

[5.1.1. Preparação 39](#_Toc302427707)

[5.1.2. Teste teórico 40](#_Toc302427708)

[5.1.3. Teste temporal 41](#_Toc302427709)

[5.2 Testes à infra-estrutura *GoerzelController* 42](#_Toc302427710)

[5.2.1 Preparação 42](#_Toc302427711)

[5.2.2. Teste teórico 43](#_Toc302427712)

[5.2.3. Teste temporal 43](#_Toc302427713)

[5.2 Testes temporais do *Micro Operating System* 45](#_Toc302427714)

# 1. Introdução

O projecto descrito neste relatório - O Maestro - foi criado por Ana Correia e Diogo Cardoso, no âmbito de Projecto e Seminário, na Licenciatura em Engenharia Informática e de Computadores, do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, no semestre de Verão 2010/2011.

## 1.1 Motivação

Hoje em dia, a música faz parte do quotidiano de todas as classes sociais. Esta disseminação da música faz com que praticamente todas as pessoas tenham consigo um dispositivo de reprodução de música, o exemplo mais marcante é o dos leitores de mp3 que existem praticamente em todos os dispositivos móveis, nomeadamente telemóveis. Este contacto diário com a música faz com que muitas pessoas iniciem um estudo sobre o mundo da música, levando-as a aprender a tocar determinado instrumento. Apesar de existirem diversos meios de estudo e aprendizagem, a interacção humana no âmbito do processo de aprendizagem é algo fulcral para os iniciados, uma vez que, estes simplesmente ainda não têm conhecimento suficiente para saber se o que estão a tocar está correcto ou não. Como tal, necessitam de interacção no processo de aprendizagem musical.

Seria então interessante que existisse uma terceira entidade neste mundo; assim além dos alunos e professores propomos a criação de *O Maestro*. O sistema dedicado desenvolvido neste projecto, tratará de averiguar que notas estão a ser tocadas, permitindo assim aos iniciados comparar as notas tocadas com o que realmente deveria ser tocado. Assim, o sistema produzirá uma pauta musical a partir do som recolhido de um instrumento.

## 1.2 Objectivos e Descrição

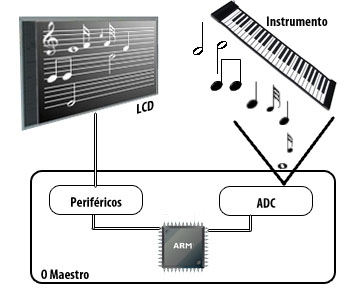
A ilustra o diagrama de blocos dos elementos do projecto e a interacção entre os mesmos.

Figura - Funcionamento do Maestro.

*O Maestro,* é um sistema dedicado sobre a arquitectura *Advance Risk Machine* (*ARM7TDMI)* [[1](#ARM11)] que trata de obter notas musicais produzidas por determinado instrumento e apresentá-las sob a forma de uma pauta musical. Para a recolha de amostras será utilizado o *Analog to Digital Converter* (*ADC)* associado ao microcontrolador. Para o *input* e *output* irá ser usado um *Liquid Crystal Display* (*LCD*) gráfico *touch screen* como ilustra a .   
A componente de software deste projecto está dividida em três camadas, tal como se apresenta na :

1. *Hardware*, responsável por interagir directamente com os periféricos internos e externos do microcontrolador.
2. Abstracção ao *hardware*, responsável por definir a ponte entre a camada aplicacional e o *hardware*.
3. Aplicacional, responsável pelo controlo do *input* e *output* do utilizador, gestão da aplicação e ainda é a camada onde o algoritmo de *Goertzel* será implementado.

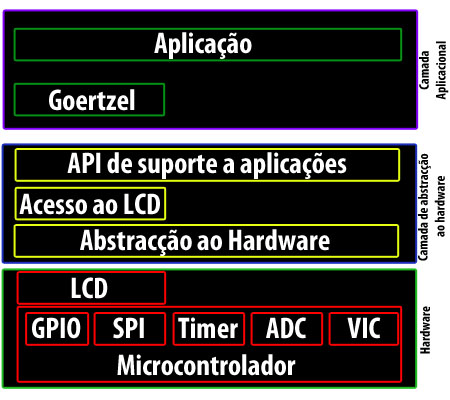
****

Figura - Arquitectura de *Software* do Projecto

Apesar do projecto ter sido desenhado para funcionar sobre um sistema embebido, foi tida especial atenção ao factor de portabilidade de código, assim foi objectivo deste projecto que o código fosse portável entre arquitecturas, limitando assim o uso de funcionalidades especificas de arquitecturas.

## 1.3 Análise de Requisitos

Após a análise dos requisitos do projecto, constatou-se que os problemas mais relevantes são a recolha e processamento das amostras de som. As frequências que se pretende captar e processar estão na banda de 27 Hz a 4186 Hz. Assim, é necessário, respeitando o teorema de *Nyquist* [[2](#1)]*,* no mínimo utilizar uma frequência de amostragem superior a 8372 Hz. O *ADC* funciona com 10 *bits* por amostra num intervalo de amplitude de 0 a 3 V, com frequência de amostragem até 400 kHz logo é uma solução adequada para a banda de frequência que se pretende processar.

Para a implementação do projecto vão ser utilizados os seguintes recursos:

* Microcontrolador baseado na arquitectura ARM7TDMI - LPC2294 da NXP [[3](#Kei11)].
* *LCD* R*G*B gráfico (320x240 *pixels*) com *touch screen*.
* Ferramentas open-source da GNU para desenvolvimento sobre a arquitectura ARM7TDMI.
* O periférico *ADC* do Microcontrolador LCP2294.

## 1.4 Soluções existentes

Existem várias soluções com objectivos semelhantes aos deste projecto. As soluções mais encontradas são aplicações de afinação de instrumentos encontradas normalmente para sistemas operativos móveis. O funcionamento destas reduz-se a pedir ao utilizador que toque uma nota musical, normalmente no centro da escala (*e.g.* 440Hz LÁ3), e posteriormente o som emitido pelo instrumento é avaliado e comparado com a nota pedida ao utilizador.

Existe ainda uma aplicação *Note Detector* (ADD\_REF\_TO) realizada em C# e C++ que tem o mesmo comportamento que o Maestro, esta trata de ouvir o som da placa gráfica e de identificar a nota que foi tocada através do algoritmo da FFT.

Apesar das diferentes aplicações com premissas semelhantes às deste projecto nenhuma cumpre todas os objectivos do Maestro, as aplicações de afinação apesar de funcionar praticamente em qualquer arquitectura estão normalmente comprometidas a um numero fixo de notas que conseguem detectar, ou sabem que nota vão detectar no momento do processamento de sinal, a aplicação *Note Detector* está comprometida coma a arquitectura PC e sistema operativo Windows, além disso usa um algoritmo com elevada complexidade aritmética para processar o sinal como irá ser descrito INSERT CAP 2.

## 

## 1.5 Organização do documento

Este documento está dividido em 4 secções.

Na secção 2 consta a descrição do algoritmo de *Goertzel* [[2](#1)] e as motivações para a escolha deste algoritmo para o projecto .

Na secção 3 apresenta-se o trabalho realizado até ao momento, nomeadamente a implementação do algoritmo de *Goertzel*, a resolução para problemas detectados nos testes realizados sobre o algoritmo.

Por fim a secção 4 contém as conclusões do trabalho realizado até ao momento, bem como o trabalho futuro do projecto.

## 2. Formulação do Problema

O âmbito deste projecto é criar uma aplicação que consiga identificar notas musicais e representa-las numa pauta musical. O principal problema encontrado foi como iria ser feito o processamento de sinal(detecção das frequências) e como o *target* do projecto é um sistema embebido que tem algumas limitações técnicas, sendo assim necessário fazer um levantamento de requisitos à complexidade do processamento a realizar, estes foram:

* Estar preparado para funcionar com arquitecturas que não tenham suporte para *floating* *point* (*FPU*).
* Ter latência baixa de processamento, de forma a apresentar resultados ao utilizador em tempo útil .
* Permitir simultaneamente a detecção de varias frequências

Para resolver o problema de detecção de frequências existentes num sinal, existem vários algoritmos, mas pelas limitações de hardware que se impôs sobraram dois algoritmos, a versão optimizada do algoritmo de *Goertzel* e *Fast Fourier Transfom*(FFT) na versão *Cooley-Turkey*.

Uma vez que é objectivo deste projecto transformar o som de uma música em algo visível, nomeadamente uma pauta musical, foi necessário fazer um estudo de conceitos básicos fundamentais de música, designadamente a gama de frequências das notas musicais, a temporização de cada nota e as notações musicais.

## 2.1. Conceitos musicais

### 2.1.1. Notas musicais

No mundo da música, uma nota musical é a representação de uma frequência e da sua duração, isto é, a nota é uma sinusóide que se propaga no ar com uma determinada frequência definida em Hertz, que se encontra no intervalo de 16Hz a 8000 Hz e repete-se durante um período de tempo.

A frequência que se encontra na nota é a que classifica se é aguda ou grave, por exemplo, caso a frequência se encontrar no intervalo de 20Hz a 100Hz, a nota soa de forma grave, caso seja igual ou superior a 400Hz, a nota soa de forma aguda.

Uma escala musical é representada pelas 7 notas musicais Dó, Ré, Mi, Fá, Sol, Lá e Si. Existem duas escritas diferentes para representar uma escala, a primeira é usada na Europa e as notas são representadas por Dó, Ré, Mi, Fá, Sol, Lá e Si e a segunda é usada nos países de Língua Inglesa, em que as notas são representadas por C, D, E, F, G, A e B.

Existem ainda outras notas que são alterações na frequência das 7 notas musicais apresentadas anteriormente. Estas são representadas pelo nomes da nota que irá ser alterada mais o símbolo '#', que adiciona meio tom em altura(frequência) ou o símbolo 'b', que diminui meio tom em altura da nota. Com isso, existe ao todo 12 notas musicais: Dó, Dó# ou Réb, Ré, Ré# ou Mib, Mi, Fá, Fá# ou Solb, Sol, Sol# ou Láb, Lá, Lá# ou Sib, Si. Como poderá ser observado não existe as notas Mi# , Fáb , Si# e Dób porque a frequência que estas notas iram ter seria igual a outras notas, por exemplo, Mi# teria a mesma frequência que Fá.

Ao conjunto desta 12 notas dá-se o nome de oitava. Existem ao todo 9 oitavas. A figura [] ilustra este processo.



Figura - Representação das oitavas

Na tabela [] demonstra a frequência de cada nota musical e a oitava a que essa se encontra.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Oitavas** | **C** | **C#** | **D** | **Eb** | **E** | **F** | **F#** | **G** | **G#** | **A** | **Bb** | **B** |
| **0** | 16.35 | 17.32 | 18.35 | 19.45 | 20.60 | 21.83 | 23.12 | 24.50 | 25.96 | 27.50 | 29.14 | 30.87 |
| **1** | 32.70 | 34.65 | 36.71 | 38.89 | 41.20 | 43.65 | 46.25 | 49.00 | 51.91 | 55.00 | 58.27 | 61.74 |
| **2** | 65.41 | 69.30 | 73.42 | 77.78 | 82.41 | 87.31 | 92.50 | 98.00 | 103.8 | 110.0 | 116.5 | 123.5 |
| **3** | 130.8 | 138.6 | 146.8 | 155.6 | 164.8 | 174.6 | 185.0 | 196.0 | 207.7 | 220.0 | 233.1 | 246.9 |
| **4** | 261.6 | 277.2 | 293.7 | 311.1 | 329.6 | 349.2 | 370.0 | 392.0 | 415.3 | 440.0 | 466.2 | 493.9 |
| **5** | 523.3 | 554.4 | 587.3 | 622.3 | 659.3 | 698.5 | 740.0 | 784.0 | 830.6 | 880.0 | 932.3 | 987.8 |
| **6** | 1047 | 1109 | 1175 | 1245 | 1319 | 1397 | 1480 | 1568 | 1661 | 1760 | 1865 | 1976 |
| **7** | 2093 | 2217 | 2349 | 2489 | 2637 | 2794 | 2960 | 3136 | 3322 | 3520 | 3729 | 3951 |
| **8** | 4186 | 4435 | 4699 | 4978 | 5274 | 5588 | 5920 | 6272 | 6645 | 7040 | 7459 | 7902 |

Tabela - Notas musicais e as suas frequências.

A relação entre uma frequência de uma nota com a frequência da próxima numa oitava é dada por 21/12. Por exemplo, se quiser saber qual é frequência da nota a seguir ao Lá(400Hz).

PróximaNotaDoLá = 440 \* 21/12 ~ 446 Hz = Lá#

### 2.1.2. Figuras musicais

Como foi dito no inicio deste capitulo , uma nota também é a representação da duração de tempo, isto é, a nota pode-se repetir durante um período de tempo. Estes tempos são múltiplos uns dos outros. A tabela [] apresenta os símbolos deste tempos e a relação entre eles.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Nota | Pausa | Código | Nome | Valor Proporcional |
|  |  | 1 | Semibreve | 1 |
|  |  | 2 | Mínima | 1/2 |
|  |  | 4 | Semínima | 1/4 |
|  |  | 8 | Colcheia | 1/8 |
|  |  | 16 | Semicolcheia | 1/16 |
|  |  | 32 | Fusa | 1/32 |
|  |  | 64 | Semifusa | 1/64 |

Tabela - Representação dos símbolos dos tempos que uma nota musical poderá ter.

### 2.1.3. Alterações Musicais

Uma nota musical pode sofrer alterações na sua frequência original. A tabela [] ilustra os símbolos de alteração e as suas consequências.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Símbolo | Nome | Objectivo |
|  | Sustenido | Eleva a nota meio tom |
|  | Dobro Sustenido | Eleva a nota um tom |
|  | Bemol | Desce a nota meio tom |
|  | Dobro Bemol | Desce a nota um tom |
|  | Bequadro | Anula o efeito das alterações |

Também existe o símbolo 'ponto' que adiciona metade da duração original à nota, por exemplo, caso se encontre uma semínima pontuada(), é adicionado à duração original o tempo de uma colcheia.

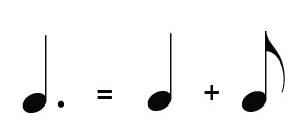


Figura - Aumento do tempo de uma simínima.

### 2.1.4. Claves Musicais

As claves são símbolos musicais que tem como objectivo determinar o nome e a altura(frequência) das notas correspondentes a cada uma das linhas e espaços da pauta. A tabela [] mostra as claves que existem.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Símbolo | Nome | Significado |
|  | Clave de Sol | Usada para instrumentos agudos |
|  | Clave de Fá | Usada para instrumentos graves |
|  | Clave de Dó | Usada para instrumentos de sons mediadores agudos |
|  | Clave de Percussão | Usada para instrumentos de percussão |

Tabela - Claves que existem na música.

A necessidade de existir varias tipos de claves é para facilitar a leitura musical de vários instrumentos. Por exemplo, o violino usa a clave de sol, o violoncelo usa a clave se Fá. O piano é um instrumento que para escrever todas as notas possíveis é necessário utilizar tanto a clave de Fá como a clave Sol.

### 2.1.5. Compasso

Um compasso é a forma de dividir quantitativamente em grupo de sons de uma composição musical, com base de som e silencio. Estes podem ser de diversos tipos de divisão, e são representados por fracções matemáticas, tais como, 2/4, 3/4 e outros. Existem duas categorias de compasso: simples e composto. Quando o compasso é superior a 2, 3 e 4, então o ele é simples ou se for superior a 6,9 ou 12 , então ele é composto.



Figura - Representação de um compasso.

#### 2.1.5.1.Compasso Simples

Um compasso simples indica a quantidade de notas que cabe dentro do compasso(número superior) e a unidade de tempo que deve ser usada dentro do compasso(número inferior). A figura[] ilustra um exemplo de compasso simples.



Figura - Exemplo de um compasso simples.

#### 

#### 2.1.5.2. Compasso Composto

Um compasso composto indica a quantidade notas que cabe dentro do compasso(número superior) e a figura musical que deve estar dentro do compasso(número inferior), porém não compromete a unidade de tempo, isto é, não obriga que a figura tenha o tempo de origem. A figura [] ilustra a ideia deste compasso.



Figura - Exemplo de um compasso composto.

### 2.1.6. Pauta

Uma pauta é constituída por um conjunto de 4 espaços delimitados por 5 linhas equidistantes cuja função é a identificação das notas (sons). A cada espaço ou linha corresponderá apenas a uma nota. Além destas linhas principais existem as linhas suplementares que só são utilizadas se existirem notas cuja localização seja fora das 5 linhas principais(notas mais agudas ou mais graves). Essas linhas não são totalmente desenhadas, apenas o suficiente para se perceber qual a localização exacta da nota. O conjunto de linhas e espaços, por si só não tem qualquer significado, é necessário ter uma clave para indicar a localização da nota.

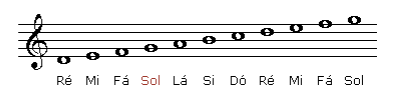


Figura - Exemplo de uma pauta com clave de Sol.

### 2.1.7. Instrumento

Todas as frequências das notas musicais são únicas, ou seja, são iguais para todos os instrumentos, o que distingue os instrumentos uns dos outros é o seu timbre.

O timbre é o que permite distinguir dois sons com a mesma frequência e a mesma amplitude, mas produzidos de instrumentos diferentes. Por exemplo, quando a nota Lá é tocada num piano e no violino ao mesmo tempo, consegue logo identificar qual dos instrumentos é que tocou, porque cada instrumento tem um timbre diferente.

Nem todos os instrumentos reproduzem todas as notas que demonstra a tabela[], porque os seus intervalos de frequências são diferentes. Na tabela [] demonstra alguns dos intervalos dos instrumentos mais conhecidos.

|  |  |
| --- | --- |
| Instrumentos | Largura de banda(Hz) |
| Piano | 27.50 - 4,186.00 |
| Tuba | 43.65 - 349.23 |
| Violino | 196.00 - 3,136.00 |
| Viola | 130.81 -1,174.00 |
| Violoncelo | 41.20 - 246.94 |
| Clarinete | 164.81 - 1,567.00 |
| Flauta | 261.63 - 3,349.30 |
| Guitarra | 82.41 - 880.00 |
| Trombone | 82.41 - 493.88 |
| Trompete | 164.81 - 987.77 |

Tabela - Gama de frequências de alguns instrumentos.

## 2.2. Instrumento de Teste

Para teste do algoritmo era necessário que o instrumento tivesse os seguintes aspectos:

* Ter uma largura de banda elevada, para ser possível aplicar o algoritmo para frequências altas e baixas.
* Produzir frequências próximas, para testar a precisão e resolução do algoritmo.

O piano cumpre estas condições, porque abrange uma vasta gama de frequências e estas são muito próximas das suas anteriores, como demonstra a tabela[] , assim as frequências que se pretende captar e processar estão na banda de 27 Hz a 4186 Hz. Portanto é necessário no mínimo utilizar uma frequência de amostragem superior a 8372Hz, respeitando o ritmo de *Nyquist* [3].

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Frequências | D.C.A | Frequências | D.C.A | Frequências | D.C.A | Frequências | D.C.A |
| 27,5000 | - - - | **97,9989** | 5,5003 | **349,2280** | 19,6000 | **1244,5100** | 69,8500 |
| 29,1352 | 1,6352 | **103,8260** | 5,8271 | **369,9940** | 20,7660 | **1318,5100** | 74,0000 |
| 30,8677 | 1,7325 | **110,0000** | 6,1740 | **391,9950** | 22,0010 | **1396,9100** | 78,4000 |
| 32,7032 | 1,8355 | **116,5410** | 6,5410 | **415,3050** | 23,3100 | **1479,9800** | 83,0700 |
| 34,6478 | 1,9446 | **123,4710** | 6,9300 | **440,0000** | 24,6950 | **1567,9800** | 88,0000 |
| 36,7081 | 2,0603 | **130,8130** | 7,3420 | **466,1640** | 26,1640 | **1661,2200** | 93,2400 |
| 38,8909 | 2,1828 | **138,5910** | 7,7780 | **493,8830** | 27,7190 | **1760,0000** | 98,7800 |
| 41,2034 | 2,3125 | **146,8320** | 8,2410 | **523,2510** | 29,3680 | **1864,6600** | 104,6600 |
| 43,6535 | 2,4501 | **155,5630** | 8,7310 | **554,3650** | 31,1140 | **1975,5300** | 110,8700 |
| 46,2493 | 2,5958 | **164,8140** | 9,2510 | **587,3300** | 32,9650 | **2093,0000** | 117,4700 |
| 48,9994 | 2,7501 | **174,6140** | 9,8000 | **622,2540** | 34,9240 | **2217,4600** | 124,4600 |
| 51,9131 | 2,9137 | **184,9970** | 10,3830 | **659,2550** | 37,0010 | **2349,3200** | 131,8600 |
| 55,0000 | 3,0869 | **195,9980** | 11,0010 | **698,4560** | 39,2010 | **2489,0200** | 139,7000 |
| 58,2705 | 3,2705 | **207,6520** | 11,6540 | **739,9890** | 41,5330 | **2637,0200** | 148,0000 |
| 61,7354 | 3,4649 | **220,0000** | 12,3480 | **783,9910** | 44,0020 | **2793,8300** | 156,8100 |
| 65,4064 | 3,6710 | **233,0820** | 13,0820 | **830,6090** | 46,6180 | **2959,9600** | 166,1300 |
| 69,2957 | 3,8893 | **246,9420** | 13,8600 | **880,0000** | 49,3910 | **3135,9600** | 176,0000 |
| 73,4162 | 4,1205 | **261,6260** | 14,6840 | **932,3280** | 52,3280 | **3322,4400** | 186,4800 |
| 77,7817 | 4,3655 | **277,1830** | 15,5570 | **987,7670** | 55,4390 | **3520,0000** | 197,5600 |
| 82,4069 | 4,6252 | **293,6650** | 16,4820 | **1046,5000** | 58,7330 | **3729,3100** | 209,3100 |
| 87,3071 | 4,9002 | **311,1270** | 17,4620 | **1108,7300** | 62,2300 | **3951,0700** | 221,7600 |
| 92,4986 | 5,1915 | **329,6280** | 18,5010 | **1174,6600** | 65,9300 | **4186,0100** | 234,9400 |

Tabela - Gama de frequências (D.C.A - Diferença Com a Anterior).

## 2.3. Algoritmos de detecção de Frequências

Quando é necessário resolver um problema que envolva detecção de frequências, normalmente, a primeira abordagem a tomar é usar a *Fast Fourier Transform* (*FFT*).

A *FFT* é um algoritmo utilizado para calcular a transformada discreta de *Fourier* (*DFT*) e a sua inversa. O modo de funcionamento deste algoritmo é repartir uma DFT que contem N amostras, por duas DFT de comprimento N/2 como demonstra a equação [].


  \begin{matrix} X_k & =
& \sum \limits_{m=0}^{N/2-1} x_{2m}     e^{-\frac{2\pi i}{N} (2m)k}   +
  \sum \limits_{m=0}^{N/2-1} x_{2m+1} e^{-\frac{2\pi i}{N} (2m+1)k}.
  \end{matrix}


onde Xk é o resultado da DFT, N é o número de amostras, x2 é o sinal adquirido.

A FFT diferenciam-se do Goertzel pelo facto de conseguir detectar várias frequências de uma só vez porque produz um vector com *N* coeficientes espectrais, enquanto que para cada filtro de *Goertzel* apenas é possível detectar a presença de uma frequência. Essa diferença reflecte-se nas diferentes complexidades computacionais destes dois algoritmos. Para um sinal com *N* amostras, o cálculo da sua *FFT* envolve a execução de *Nlog2(N)* multiplicações complexas, logo não se poderia utilizar este algoritmo, porque os sistemas alvo que se pretende abranger podem não conter *FPU*, além disso a *FFT* usa uma quantidade substancial de memória e necessita de uma grande capacidade computacional devido à sua elevada complexidade aritmética. A principal vantagem da *FFT* é a rapidez do calculo de uma *DFT*, mas não seria aproveitado nos sistemas alvo por causa das suas limitações de recursos computacionais.

O algoritmo de *Goertzel* em comparação com a *FFT*, é um algoritmo mais leve em relação ao poder de computação necessário, não necessita de uma grande quantidade de memória e é portável para todos tipos de arquitectura (com ou sem *FPU*). A principal vantagem é o facto de ser possível ter diferentes filtros de *Goertzel* em execução com diferentes configurações (*N* e *Fs*), podendo assim optimizar ainda mais o processamento das frequências.

Tanto a FFT como o Goertzel, descartam a amplitude e o timbre do instrumento, apenas focando-se nas frequências do sinal, assim ambos podem ser utilizados para detectar as frequências de qualquer instrumento que esteja a tocar.

# 3. Detecção de frequência

No capitulo 2 (INSERIR\_LINK) abordou-se o algoritmo de Goertzel e a FFT como possíveis soluções para a detecção de frequências, mas como descrito em (INSERIR\_LINK\_GOERTZEL\_VS\_FFT) o algoritmo de Goertzel é mais portável e menos complexo aritmeticamente do que a FFT, levando assim a que este seja o algoritmo eleito para resolução deste problema. Neste capítulo são analisadas as suas características, o seu funcionamento e algumas limitações do algoritmo.

## 3.1. - O algoritmo de Goertzel

O algoritmo de *Goertzel* foi criado por Gerald Goertzel em 1958. Este algoritmo calcula um coeficiente da transformada discreta de Fourier (*DFT* – *Discrete Fourier Transform*) através de um filtro recursivo [[4](#Rob01)]. Existem várias versões do algoritmo; neste documento trata-se uma versão optimizada que não tira partido de operações complexas para a detecção de frequências.

A ilustra o diagrama de blocos do filtro de *Goertzel*.

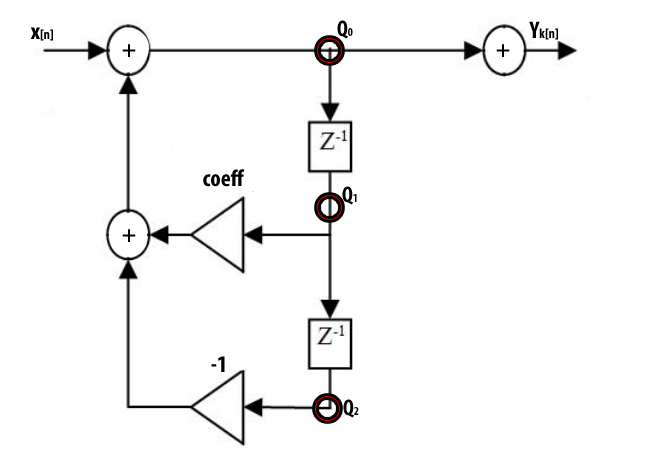


Figura - Diagrama de blocos de um filtro de Goertzel.

## 3.2. Descrição

O algoritmo de *Goertzel* [[5](#Gen1)] [[6](#MarcadorPosição1)] detecta a presença de uma dada frequência através de amostragem do espectro do sinal nessa frequência. Calculado o valor do módulo do espectro de amplitude numa dada frequência e comparando-o com a energia total das amostras, é possível verificar quanto é que a frequência contribui para a energia do sinal. Quanto menor a diferença entre a energia do sinal e a energia da frequência, maior é a contribuição da frequência para o sinal. Assim, definindo um limite nesta diferença é possível avaliar se uma frequência se encontra ou não presente no sinal [[7](#Gen111)].

O algoritmo é composto pelos seguintes componentes:

* Um coeficiente .
* Uma constante *k* que representa a frequência que se pretende detectar.
* O valor da frequência de amostragem *Fs.*
* O valor da frequência que se pretende detectar, *Fn.*
* O numero de amostras do sinal que irão ser processadas, *N*.

O valor do coeficiente e da constante *k* são calculados pelas seguintes expressões:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (1) |

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (2) |

A constante *k* tem o valor inteiro mais próximo resultante do arredondamento do resultado da equação (2).

A partir da pode-se deduzir as seguinte equações:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | ;  *onde y(-1) e y(-2) = 0* | (3) |
|  |  | (4) |

A equação 3 representa a relação entre as amostras de entrada x(n) e o resultado do filtro y(n), enquanto que a equação 4 representa a evolução dos valores das unidades de atraso intermédias à medida que as N amostras "circulam" pelo filtro. O filtro guarda apenas os últimos dois estados intermédios para os usar posteriormente na geração de um novo.

Após o processamento de todos os elementos das *N* amostras o algoritmo de *Goertzel* retorna um valor de energia relativa através da equação .

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (5) |

Na realidade o algoritmo de *Goertzel* não retorna a energia total do espectro da frequência, isto é, este só retorna o valor da energia da componente positiva do espectro. Sendo assim é necessário multiplicar por dois para obter a energia total da frequência no espectro (6).

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (6) |

Para saber se uma dada frequência está presente no sinal é necessário comparar a energia total do sinal com a energia relativa da frequência assim é necessário calcular essa energia relativa com a equação (7):

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (7) |

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |

## 3.3. Características

O algoritmo optimizado de *Goertzel* não usa operações complexas, e como consequência a sua complexidade aritmética é reduzida necessitando apenas de multiplicações e adições, sendo *N* o número de amostras do sinal na entrada do filtro.

Em memória, em cada instante o algoritmo apenas necessita de ter a amostra actual e os valores intermédios , e , podendo ter em memória não volátil os valores de k e coeficientes.

Outra característica do Goertzel é este ser paralelizável uma vez que cada filtro é independente de outros que possam existir, podendo assim detectar várias frequências simultaneamente. Através de um banco de filtros de Goertzel, é possível detectar simultaneamente a presença de várias frequências.

A resolução em frequência do algoritmo é dada pela equação (7).

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (8) |

A resolução em frequência é o intervalo entre duas frequências detectáveis, ou seja, se tivermos duas frequências *a* e *b* para detectar, a diferença entre estas deve ser maior do que o valor da resolução (8).

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | para *b > a* | (9) |

Qualquer frequência entre o intervalo ] *a , b* [ que se pretenda detectar irá ser falsamente detectada sempre que *a* ou *b* estejam presentes no sinal.

Concluindo, todos os factores referidos anteriormente tornam o algoritmo de *Goertzel* bastante eficiente, escalável e implementado com pouca memória, tornando-o portável a qualquer tipo de arquitectura.

## 3.4 Implementação do algoritmo

A representa o *flowchart* da implementação do algoritmo de *Goertzel*.

Figura - Máquina de Estados de um filtro de *Goertzel*. O estado "Calcular energia relativa" refere-se à equação

A ilustra o funcionamento do algoritmo como referido anteriormente na equação e . Este algoritmo utiliza uma equação recorrente e necessita de apenas três variáveis locais (Q0, Q1 e Q2) para calcular o módulo do espectro de amplitude da frequência que se deseja detectar.

Durante a implementação do algoritmo teve-se de ter em conta a representação numérica das amostras, uma vez que estas deveriam ser o mais próximo possível dos cálculos teóricos. Com este factor em mente foram realizadas duas implementações, uma com valores inteiros e outra com valores decimais (*floating-point*). (descritas em INSERIR\_CAP\_5\_SE)

## 3.5 Tratamento da Resolução do Goertzel

A resolução do algoritmo de *Goertzel* é dada pela equação (8) descrita anteriormente neste capitulo (INSERIR\_LIG\_PARA\_CARACT). Após a confrontação entre a gama de frequências que se pretende detectar (PAG\_DA\_TAB), a mínima frequência de amostragem(REF\_PARA\_A\_REF\_DO\_RITMO\_DE\_NYQUIST) a poder usar e os requisitos de memória conclui-se que iriam existir problemas na fase experimental do algoritmo de *Goertzel*.

Por exemplo, para os valores de e temos . Isso significa que caso se queira detectar uma frequência com o valor de 440 Hz e que esta se encontre numa dada amostra, o algoritmo de *Goertzel* irá falsamente indicar que as frequências dentro do intervalo se encontram presentes no sinal, introduzindo assim um erro significativo ao processamento das amostras.

A solução ideal seria que o valor de fosse inferior a qualquer diferença entre frequências que se pretende detectar. Na encontram-se exemplos de algumas frequências que se pretende detectar e a diferença entre as mesmas. Para baixas frequências, a necessidade de ter resolução detalhada leva a que tenha que ser utilizado um número elevado de pontos *N*.

|  |  |
| --- | --- |
| Frequência | Diferença com a anterior |
| 27,5000 | - - - |
| 29,1352 | 1,6352 |
| 30,8677 | 1,7325 |
| 32,7032 | 1,8355 |
| 34,6478 | 1,9446 |
| ... | ... |
| 3520,0000 | 197,5600 |
| 3729,3100 | 209,3100 |
| 3951,0700 | 221,7600 |
| 4186,0100 | 234,9400 |

Tabela - Algumas frequências da INSERIR\_REFERENCIA\_DA\_TABELA\_COMPLETA.

Como ilustrado na Tabela 1, as diferenças entre as frequências são crescentes e enquanto que a resolução anteriormente calculada era adequada para as frequências superiores a 3000 Hz não o era para as frequências inferiores a 740 Hz. Assim, foi necessário fazer ajustes de modo a que a resolução nunca seja superior à diferença entre duas frequências consecutivas.

A solução mais intuitiva seria aumentar o divisor da equação (8), o *N*, para um valor mais próximo de *Fs*, por exemplo com um , o valor de seria 1 sendo inferior a todas as diferenças de frequências. O problema desta solução é que se aumentava consideravelmente o tempo de processamento do algoritmo aumentando igualmente a latência e diminuindo o tempo de resposta aos consumidores do processamento de sinal.

A segunda solução não tão evidente seria diminuir o valor de *Fs*, diminuindo assim também o valor de . A consequência desta solução seria que ao diminuir a frequência de amostragem estaria-se a diminuir o intervalo de frequências possíveis de serem detectadas, pelo teorema de *Nyquist*.

No final a solução adoptada foi um misto das duas anteriores, a frequência de amostragem fica constante para que seja possível capturar a gama de frequências que se pretende, mas existe uma divisão desta realizada por software. Por exemplo para as primeiras frequências da o seu processamento será realizado com um e com um . Imaginando que existe um array de *N* posições onde são guardadas as amostras com uma frequência de amostragem de 8800 Hz, para que os dados sejam processados com um *Fs* de 275 Hz bastará que a indexação a esse *array* seja realizada com saltos de 32 posições uma vez que, .

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| ***Gama(Hz)*** | ***Fs (Hz)*** | ***N*** |
| **25,7 - 61,7354** | 275 | 200 |
| **65,4064 - 146,832** | 550 | 200 |
| **155,563 - 349,228** | 1100 | 200 |
| **369,994 - 830,609** | 2200 | 200 |
| **880 - 1975,53** | 8800 | 200 |
| **2093 - 4186,01** | 8800 | 100 |

Tabela - Valores de N e das frequências de amostragem para as frequências do piano.

Com esta solução construiu-se uma aplicação utilitária que tem como funcionalidade calcular os valores de *Fs* e *N* óptimos para capturar uma dada gama de frequências. Na Tabela 7 encontra-se o resultado da execução da aplicação referida anteriormente.  
   
 Com este tratamento foi possível reduzir a resolução do algoritmo de tal forma a que todas as notas sejam correctamente identificadas sem qualquer hipótese de falsas detecções pela resolução. Por exemplo a resolução para a primeira gama da ficou sendo um valor óptimo tendo em conta os valores da .

## 

## 3.6 Filtragem do sinal

O facto deste algoritmo apenas se basear no valor do coeficiente para detectar a presença de uma frequência num dado sinal, inviabiliza que existam frequências com o coeficiente igual, o problema é que ao resolver-se o problema da resolução do algoritmo(INSERIR\_LIG\_3.5), agravou-se este problema ainda mais, uma vez que a probabilidade de existirem duas ou mais frequências com o mesmo coeficiente é alta, já que as frequências estão divididas em blocos com frequências de amostragem diferentes e valor de *N* diferentes. A Tabela 3 demonstra alguns exemplos deste problema:

|  |  |
| --- | --- |
| Frequências(Hz) | Coeficiente |
| 110; 220; 440; 1760 | 0,61803 |
| 466,164; 116,54; 233,082 | 0,4743 |
| 293,665; 587,33; 2349,32 | -0,21282 |

Tabela - Exemplos de frequências com o mesmo coeficiente.

Uma vez que o problema está com os coeficientes a solução mais directa seria modular estes coeficientes até que todos os valores fossem diferentes, o problema desta solução é a complexidade de calcular coeficientes diferentes para todas as 88 frequências quando estas não partilham valores de frequências de amostragem nem de *N*. A solução terá de ser algo exterior ao algoritmo e a sua configuração, portanto optou-se por uma filtragem de sinal.

Esta filtragem irá ser realizada para cada gama de frequências () de tal maneira a que as amostras passadas ao algoritmo de *Goertzel* estejam filtradas antes deste efectuar a verificação, evitando assim as falsas detecções.

## 3.7 Filtros *FIR*



Figura - Diagrama de blocos de um filtro *FIR*

Para filtrar as amostras foram utilizados filtros do tipo FIR (Finite Impulse Response), o seu funcionamento está ilustrado na .

|  |  |
| --- | --- |
|  | () |

A equação representa as amostras filtradas, esta equação evidencia que o numero de amostras atrasadas presentes no filtro é o mesmo que o numero total de coeficientes .

Os coeficientes são calculados a partir da resposta impulsional de um filtro passa-banda, que por sua vez é calculado com a diferença da resposta impulsional de dois filtros passa-baixo como demonstra a equação .

|  |  |
| --- | --- |
|  | (11) |

Os valores de são dados pela equação:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (12) |

A componente representa a frequência normalizada e é calculada com a seguinte expressão:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (13) |

Foi ainda aplicada a janela de Hamming (INSERIR\_REF) sobre a resposta impulsional do filtro de maneira a minimizar o ganho das frequências próximas das frequências de corte, bem como foi realizada uma normalização do ganho do filtro de tal forma a que as frequências que estejam entre o filtro tenham um ganho unitário ao ser filtradas.

(INSERIR IMAGENS DE MATLAB MOSTRANDO O SINAL ANTES E DEPOIS DA JANELA E NORMALIZAÇÃO?)

(TO REMOVE? )

Por fim a aplicação descrita anteriormente em (INSERIR\_REF\_PARA\_TRATAMENTO\_DA\_RES) foi actualizada de tal forma a que todos os coeficientes dos filtros sejam automaticamente gerados.

# 4. Implementação

Este capitulo trata de clarificar as soluções e opções adoptadas na implementação do projecto, bem como dos requisitos a nível de hardware e software necessários para correr a aplicação final.

## 4.1 Linguagem de programação

Um dos aspectos fulcrais para a realização deste projecto foi a boa escolha da linguagem programática, as opções eram à partida limitadas uma vez que como descrito em (INSERIR\_REF\_PA\_INTRO) era essencial que o código produzido no âmbito do projecto corresse em qualquer dispositivo com baixas ou altas características a nível de hardware, bem como sob qualquer sistema operativo no mercado. A escolha ficou reduzida às linguagens *C* e *C++*, ambas reconhecidas pela sua eficiência e propagação no mercado. A linguagem *C* é conhecida por ser uma das mais eficientes uma vez que é a linguagem imperativa "mais próxima" do hardware e pelos seus baixos custos a nível de memória. A linguagem *C++* é uma extensão do *C* introduzindo o paradigma orientado a objectos. Um dos maiores problemas da linguagem *C++* é o facto de não existir bons compiladores, especialmente quando o target são sistemas embebidos. Apesar disso a linguagem *C++* é muito menos propicia a erros do programador do que a linguagem *C*, por ser uma linguagem tipificada, o código produzido em *C++* é mais genérico (*template metaprograming* (ADD\_REF)) e mais legível levando assim a esta ser a linguagem adoptada na elaboração do projecto.

## 4.2. Algoritmo de Goertzel

No capitulo 3 (INSERIR\_REF) descreveu-se como funciona o algoritmo e que técnicas foram abordadas de forma a que o algoritmo seja utilizado no âmbito deste projecto. Nesta secção do capitulo tratara-se de explicar os detalhes de implementação de todos os mecanismos necessários para utilizar o algoritmo.

Uma das características mais interessantes do algoritmo de Goertzel é o facto deste ser paralelizável, essa característica é fulcral para sistemas em que o tempo de resposta deve ser o mais curto possível, como é o caso deste projecto, assim foi criada toda uma infra-estrutura (*GoertzelController* add ref 4.3) que tira-se partido e controlasse todo o processo de processamento de amostras.

### 4.3. GoertzelController

Neste subcapítulo, filtro de Goertzel refere-se à implementação de todas as funcionalidades descritas no CAP\_3\_REF (filtragem das amostras, implementação do algoritmo, etc) necessárias para o bom funcionamento do algoritmo de Goertzel.

A infra-estrutura *GoertzelController* é responsável por controlar:

* Os filtros Goertzel (INSERT\_REFE\_TO\_THAT).
* O buffer onde as amostras são guardadas.
* Quando é que as amostras devem ser entregues aos filtros.
* Quando e como os resultados dos filtros devem ser apresentados.
* Toda a sincronização necessária para aceder a variáveis partilhadas.

A representa o *pipeline* de processamento de sinal utilizando o algoritmo de *Goertzel*.

Existem três módulos intrínsecos na infra-estrutura, o primeiro passa por salvaguardar as amostras num buffer interno (*Samples Manager*) onde serão posteriormente enviadas para os filtro *Goertzel,* o segundo é a detecção das frequências presentes na amostra (*Goertzel Filters*) e o ultimo é o armazenamento e complemento dos resultados retornados pelos filtros com *metadata* gerada pelo controlador (*Results Controller*).

Figura - Diagrama de blocos do processamento de sinal.

### 4.3.1 Configuração e Parametrização

Os módulos do *GoertzelController* funcionam com valores gerados/calculados previamente à sua execução, (coeficientes dos filtros, gama de frequências, etc) para tal foi necessário criar um estrutura que defina esses valores de forma a que fosse possível implementar código genérico ao nível de funcionamento. As estruturas são as seguintes:

* ***GoertzelFrequency*** - representa uma frequência, contem os valores da frequência e do coeficiente de *Goertzel*.
* ***GoertzelFrequenciesBlock*** - representa uma gama de frequências, nesta está presente a frequência de amostragem da gama, o seu valor de *N*, o salto necessário para realizar a divisão da frequência de amostragem por software(CAP3\_RESOLVER\_RESO\_DO\_GOERTZEL), um array com os valores do filtro a utilizar sobre esta gama e finalmente o array de frequências que pertencem a esta gama.
* ***GoertzelResult*** - representa o resultado produzido pelo filtro de Goertzel, contem uma referencia para a frequência encontrada (*GoertzelFrequency*) e uma percentagem com a diferença entre a energia total do sinal e a energia relativa calculada pelo algoritmo de *Goertzel*.
* ***GoertzelResultCollection*** - representa todos os resultados que a infra-estrutura produziu num dado momento, contem um *array* de resultados (*GoertzelResult*), quantos resultados estão presentes no *array* e quantos **blocos** foram utilizados para produzir os resultados.

Um **bloco** representa uma sequencia de amostras com o tamanho do máximo *N* presente ao longo de todas as gamas.

O *GoertzelController* precisa apenas de um *array* com as gamas de frequências que deve processar (*GoertzelFrequenciesBlock*) sendo a única parametrização necessária para o funcionamento da infra-estrutura.

.

### 4.3.2 Samples Manager

Este modulo da infra-estrutura tem como principal funcionalidade de salvaguardar as amostras que vão sendo fornecidas ao *GoertzelController*, para além de ir calculando a energia das amostras à medida que vão sendo fornecidas, evitando assim que seja necessário percorrer todas as amostras para calcular a sua energia.

Este módulo tem ainda como responsabilidade saber quando dar amostras aos filtros de *Goertzel*, para tal é necessário ter em *buffer* pelo menos *N* amostras, sendo o valor de *N* o máximo *N* de todas as gamas de frequências previamente calculados (CAP 3 TAB das gamas). Por fim o módulo ainda permite descartar blocos quando o controlador achar necessário faze-lo, avisando igualmente os filtros que foram blocos descartados.

### 4.3.3 Goertzel Filters

A infra-estrutura tira partido da paralelização do algoritmo através da criação de diferentes fios de execução (tarefas) para executar cada um dos filtros, como ilustra a Figura 2.



Figura - Diagrama de blocos do módulo Goertzel Filters.

O segundo módulo do controladoré responsável por filtrar o sinal para a sua gama de frequências e de produzir os resultados. Este filtro usa a mesma estratégia utilizada no módulo *Samples Manager* de ir fazendo trabalho à medida que seja possível*.* Uma particularidade destes filtros é que estes só invocam o *Goertzel* caso exista evidencias que alguma das frequências da gama que está a processar se encontra nas amostras, para tal este vai guardando a energia do sinal filtrado à medida que filtra as amostras, assim quando a condição para chamar o *Goertzel* (ter as *N* amostras) esteja cumprida é comparado o valor da energia do sinal (calculado pelo *Samples Manager*) com a energia do sinal filtrado (calculado no filtro), assim o *Goertzel* é apenas invocado quando a energia do sinal filtrado esteja sobre um limiar configurável. Estes filtros estão ainda preparados para descartar todo o trabalho (filtragem, calculo da energia) caso recebem essa ordem do módulo *Samples Manager.*

### 4.3.4 Results Controller

O *Results Controller* é o módulo responsável por gerir os resultados, esta gestão é necessária uma vez que uma das particularidades desta infra-estrutura é que os filtros podem produzir resultados em alturas diferentes, por exemplo enquanto que a frequência de 4186.01Hz necessita apenas de 179 amostras para ser possível saber se está presente no sinal ou não, a frequência 55Hz necessita de 2704 amostras (CAP3 TRATAMENTO DA RESOLUCAO\_DO\_ALGO) , assim foi utilizada uma técnica de *double buffering(INSERT\_REFERENCE)* de forma a que os filtros tenham sempre algum local onde preservar os seus resultados. Este módulo gera ainda *metadata* para ser utilizada pela aplicação que utilize esta infra-estrutura, nomeadamente quantas frequências foram encontradas e quantos blocos de amostras foram necessários para encontrar todas as frequências encontradas, com esta informação é possível por exemplo que uma aplicação saiba quanto tempo é que uma dada frequência esteve activa nas amostras passadas ao controlador.

### 4.3.5 Funcionamento e Características

A Figura 3 representa o *flowchart* do controlador:

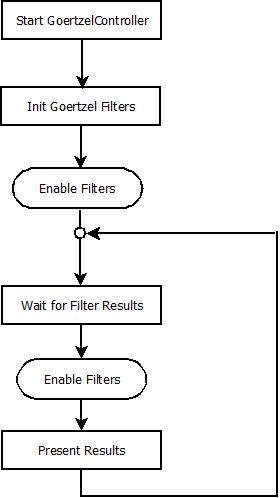


Figura - Flowchart do funcionamento do GoertzelController.

Como já foi referido esta infra-estrutura não funciona apenas com um fio de execução (INSERIR\_REF\_PA\_GOERTZEL\_FILTERS) mas sim com vários por isso é natural que esta apresente os resultados de forma assíncrona, assim para que uma aplicação obtenha resultados desta infra-estrutura é necessário registar um *callback* com um protótipo definido, representado na Listagem 1.

typedef void (\*GoertzelControllerCallback)(GoertzelResultCollection \* results);

Listagem - Protótipo do callback do GoertzelController.

Na Figura 3 essa característica também é visível uma vez que o controlador depois de esperar pelos resultados do *ResultsController* reactiva os filtros e antes de chamar o *callback* definido (*Present Results*).

A interface publica do controlador permite ainda acesso ao módulo *Samples Manager* de forma a que a infra-estrutura não esteja comprometida com a aquisição do sinal. Este acesso reduz-se a dois modos:

* *Single mode*, a aplicação irá fornecer ao controlador amostras singulares ao longo do tempo para este processar, neste modo o controlador toma conta de gerir toda a informação sobre a amostra e o bloco onde se encontra.
* *Burst mode*, a aplicação irá utilizar um ponteiro fornecido pelo controlador para guardar amostras, a aplicação neste caso é responsável por calcular a energia do sinal bem como toda a lógica necessária para evitar *buffer overflow*. (INSERT\_REFERENCE\_TO\_BUFFER\_OVERFLOW), após as amostras desse bloco estarem preenchidas o controlador deve ser avisado de forma a libertar acesso ao bloco para os filtros.

Independentemente do modo de utilização, a aplicação terá sempre de contactar o controlador à medida ou quando acabar de preencher o bloco, assim existe um ponto após a aquisição de sinal onde é possível manter sempre controlo no que diz respeito ao processamento de sinal.

Esta infra-estrutura foi desenhada para ser portável entre arquitecturas de alta ou baixa gama de processamento, assim não existe nenhum compromisso com memória dinâmica nem funções especificas com o sistema, apesar disso existe algum compromisso entre arquitecturas uma vez que para esta infra-estrutura funcionar plenamente é necessário ser possível de criar múltiplos fios de execução (Tarefas).

Outra característica da infra-estrutura é o facto de no inicio da aplicação ser calculado o valor da energia do ambiente, ou seja, por um tempo configurável nenhuma amostra é avaliada pelos filtros mas sim pelo próprio controlador de forma a detectar o ruído presente no ambiente. Assim é possível avaliar, sempre que um bloco de sinal é adquirido, se existe alguma nota presente no sinal, através da comparação entre a energia do sinal recolhida no arranque da infra-estrutura com a energia do bloco adquirido. A Figura 4 representa essa característica da infra-estrutura, apesar de estar desenhada para o modo *Single* o comportamento no modo *Burst* é idêntico.

## C:\Users\DVD\Desktop\SamplesModeFlowchart.jpeg

Figura - Flowchart to tratamento de ruído da infra-estrutura.

## 4.4 Arquitectura PC (Windows)

Toda a implementação da infra-estrutura *GoertzelController* foi realizada sobre a arquitectura de PC de modo a testar a funcionalidade do algoritmo *Goertzel* bem como para calcular o tempo de processamento (LINK\_TO\_TESTS).

Para fazer a aquisição de sinal foi utilizado a biblioteca de multimédia do Windows, onde é possível configurar a placa de som do sistema para colocar amostras num array. Posteriormente à recepção das amostras da placa de som, estas são passadas ao controlador através do modo *Single*.

Uma vez que a implementação é executada sob um sistema operativo, a implementação estática da infra-estrutura *GortezelController* é algo desvantajosa uma vez que não utiliza todos os recursos que poderia utilizar (e.g memoria dinâmica) , mas por outro lado como actualmente praticamente todos os PCs têm múltiplos cores a escalabilidade da infra-estrutura é uma grande vantagem no que diz respeito a tempos de processamento(TESTES) neste tipo de arquitecturas.

## 4.5 Arquitectura ARM7

Na INTRODUÇÃO/DESCRIÇÃO foram referidas as especificações do *yaab2294*, kit de desenvolvimento que foi usado para a elaboração deste projecto, as especificações deste hardware estão muito próximas das usadas no mercado (para este tipo de aplicações) tendo sido essa uma das razões para a escolha do hardware.

### 4.5.1 Aquisição de sinal

A aquisição de sinal foi realizada com o ADC a 8800Hz, este gera uma interrupção sempre que tem uma amostra pronta, o tratamento desta trata de guardar o valor da amostra adquirida num *array* fornecido pela infra-estrutura *GoertzelController* e de calcular a contribuição da amostra para a energia total do bloco.

### 4.5.2 Sistema Operativo

Uma das grandes diferenças entre executar a infra-estrutura implementada num PC e num ARM é o simples facto do PC ter um sistema operativo em execução a virtualizar o hardware e como a infra-estrutura foi desenhada para correr sob alguma abstracção (nomeadamente de tarefas) foi necessário encontrar um sistema operativo para portar a infra-estrutura para o *ARM*. Existem muitos sistemas operativos *open-source* para a arquitectura *ARM*, para a realização deste projecto foram abordados três:

* ***eCos*** (ADD\_REF) - um dos maiores sistemas operativos no mercado, conhecido por estar disponível para várias arquitecturas e *targets* diferentes.
* ***FreeRTOS*(**ADD**\_**REF**)** - um sistema bastante mais pequeno que o *eCos*, mas igualmente com alguma presença no mercado.
* **TNKernel**(ADD\_REF) - o sistema mais pequeno de todos, praticamente só trás consigo mecanismos de sincronização e de escalonamento de tarefas.

O único que seria necessário fazer o *port* seria o *eCos*, uma vez que para os outros dois existem já versões para o processador que se usou no projecto. Na escolha do sistema operativo foi tido em conta a latência do tratamento de interrupções, uma vez que era importante que fosse o mais rápido possível para não perder amostras, o tempo de comutação de uma tarefa, já que a infra-estrutura funciona com múltiplas tarefas em simultâneo é importante que este tempo seja baixo, por fim a implementação dos sincronizadores, uma vez que é importante saber se os sincronizadores desligam as interrupções de forma a obter exclusão para secções criticas, pela mesma razão referida em cima.  
 Com os critérios definidos, foram avaliados os três sistemas escolhidos, o *eCos* foi excluído quase de imediato devido aos seus elevados tempos de comutação (LINK\_PARA\_TESTES), tanto o *TNKernel* e *FreeRTOS* desligam as interrupções em chamadas a secções criticas inviabilizando-os. A solução ideal seria um sistema operativo que apenas desliga-se as interrupções quando fosse mesmo necessário (e.g. *context switch*). Optou-se então por fazer um sistema operativo que cumprisse todos os requisitos necessários.

#### 4.5.2.1. Micro Operating System (mos)

O *mos* foi criado no âmbito deste projecto de forma a cumprir todos os requisitos necessários para correr a infra-estrutura, este é baseado numa versão em C++ do núcleo *uthreads* leccionado nas aulas de Programação Concorrente. Em comparação com os sistemas operativos referidos neste capitulo (*FreeRTOS* e *TNKernel*) o *mos* oferece alguma virtualização de periféricos básicos no mundo dos embebidos (*e.g. SPI*, *UART*, *TIMER*, etc). Apesar de ter sido criado para cumprir os requisitos da infra-estrutura de processamento de sinal, o *mos* é completamente independente e adjacente a esse facto.

O mos está dividido em três partes:

* *Kernel* - o núcleo do sistema operativo, trata de todo o sistema multi-tarefa bem como o tratamento de interrupções.
* *Port* - todo o código comprometido com o hardware, este módulo está dividido em arquitectura, onde contém todo o código comum à arquitectura e *target* onde se encontra as *drivers e startups* especificas de um processador/*board*.
* System - a virtualização do hardware, aqui são definidas contractos que cada *Port* deverá cumprir e/ou implementar para o funcionamento do sistema.

Todos os requisitos da infra-estrutura referidos anteriormente foram cumpridos no kernel do sistema:

* *Tempo de comutação de tarefas reduzido*, este requisito foi implementado sob o *context switch* do sistema, este apenas salvaguarda a informação necessária para que a tarefa possa ser resposta futuramente.
* *Tempo de latência das interrupções baixa*, para diminuir o tempo de latência foi implementado um esquema semelhante ao do *eCos* cuja principal característica é delegar o processamento (que não seja crucial) da interrupção para um tarefa definida pelo sistema, que correrá já com as interrupções ligadas. Outra solução teria sido fazer o tratamento das interrupções dentro do contexto da tarefa que estava a executar previamente ao pedido de interrupção, mas esta solução trás é mais propicia a erros nomeadamente a *buffer overflow.*
* *Sincronização sem desligar as interrupções,* para resolver este requisito foi criado um *lock* de sistema, este *lock* é um simples contador que quando está diferente de zero significa que está adquirido por alguma tarefa. O contador não é mais que uma "*flag*" reentrante que informa o sistema de tratamento de interrupções que não deve alterar nenhuma variável do sistema (*e.g* não deve trocar de tarefas), levando a que o sistema esteja sempre sensível a interrupções.

### 4.5.3 *Port* da infra-estrutura para *ARM*

Após a implementação do sistema operativo *mos* e da aquisição de sinal o *port* da infra-estrutura reduziu-se a alterar as criações das tarefas para usar a API do *mos* à do *windows*.

Uma vez que a infra-estrutura utiliza aritmética com *floating-point* foi utilizada a biblioteca da *tool-chain* que sabe realizar tais operações por software. O problema da utilização desta biblioteca é que acrescentou um peso considerável ao processamento de sinal (INSERT\_TESTS\_OF\_OPERATIONS), uma vez que as operações realizadas nos filtros e no *Goertzel* são multiplicações e adições de *doubles.*   
 Após a implementação foram realizadas testes à infra-estrutura (INSERT\_TESTS\_AGAIN) e reparou-se que a infra-estrutura demorava cerca de 17 segundos para processar um bloco de 1 segundo (8800 amostras). Este facto é contra um dos objectivos do trabalho, latência mínima entre a acção de tocar o instrumento e a reflexão dessa na pauta.

A solução encontrada foi abandonar a precisão *floating-point* e usar inteiros a 64bits, para não perder toda os valores decimais utilizados foram multiplicados por uma constante. No final foi possível reduzir o tempo até XX (INSERT\_REF).

# 5. Testes e Resultados

No âmbito do projecto foram realizados vários testes sob o código produzido, esses testes consistiram nomeadamente em dois tipos de testes:

* **Testes temporais** - testes verificar o tempo que demora a dada funcionalidade a executar.
* **Testes teóricos** - testes realizados com valores teóricos, utilizados nomeadamente para aprovar a implementação do algoritmo e da infra-estrutura.

Neste capitulo irá estar presente vários testes dos tipos referidos anteriormente em diferente *targets*, nomeadamente sob a arquitectura *PC* e *ARM*. Os testes ainda estão divididos entre testes ao algoritmo de Goertzel, à infra-estrutura realizada, de forma a validar ambos e ao sistema operativo realizado no âmbito do projecto.

## 5.1. Testes ao algoritmo de Goertzel

Após a implementação do algoritmo de *Goertzel* foi necessário testá-lo em factores como o funcionamento básico do algoritmo, nomeadamente, como é que programaticamente se identifica a existência de uma frequência presente num determinado sinal, bem como quanto tempo demora a processar N amostras. Estes testes foram realizados com a versão com decimais do algoritmo e é de salientar que não realizada qualquer tipo de filtragem do sinal, nem foram efectuados testes funcionais uma vez que o algoritmo nunca irá funcionar como meio isolado.

### 5.1.1. Preparação

Para estes testes foi realizado um módulo de criação de sinusóides, no qual estas são criadas com os seguintes requisitos:

* Frequência de Amostragem(*Fs*) = 8800 kHz
* Amplitude(*A*) = 1000
* Frequência (*fo*) é passada como parâmetro

O cálculo das amostras da sinusóide é efectuado de acordo com a equação )

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | () |

### 

### 5.1.2. Teste teórico

Os testes iniciais consistiram em a criar várias sinusóides com diferentes frequências, passá-las a um filtro de *Goertzel* e verificar se as frequências estavam presentes.

Após se verificar que o algoritmo estava devidamente implementado, uma vez que produziu resultados válidos para os testes iniciais, gerou-se um sinal composto por sinusóides de várias frequências (descritas na Tabela 9) e entregou-se ao algoritmo de *Goertzel* de forma a obter resultados. A mostra os resultados obtidos neste teste.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Frequências(Hz) | Percentagem do sinal (%) | Percentagem Válida (>10%) |
| 55 | 21.8 | Sim |
| 110 | 22 | Sim |
| 440 | 15.1 | Sim |
| 880 | 15.6 | Sim |
| 1760 | 15.9 | Sim |
| 3520 | 16 | Sim |

Tabela - Resultados do teste teórico ao algoritmo de *Goertzel*   
com sinais compostos por múltiplas sinusoides

A **Percentagem do Sinal** representa a contribuição da frequência para o sinal.

Como se pode verificar nos resultados obtidos todas as frequências foram detectadas porem nota-se que existe alguma divisão da energia do sinal pelas diferentes frequências, mas durante o teste detectaram-se problemas com a resolução do algoritmo (tal como apresentado no subcapítulo ), uma vez que ao testar o algoritmo com frequências com um intervalo curto(*e.g.* primeira oitava do piano) este retornava a indicação da presença de frequências que na realidade não estavam presentes.

### 5.1.3. Teste temporal

Um dos aspectos mais importantes na escolha de um algoritmo de processamento de sinal é o seu tempo de processamento. Para averiguar esses tempos foram realizados alguns testes que determinam quanto tempo demoraria o *Goertzel* a calcular se alguma das 88 frequências está presente numa dada amostra; apresentam-se os respectivos resultados na .

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| N | Tempo Total(ns) | Tempo Relativo(ns) | Arquitectura | Processador-MHz |
| 200 | 6022000000 | 602200 | x86 | I5-2400 |
| 200 | 3260000000 | 326000 | x64 | I7-1600 |
| 200 | 2792000000 | 279200 | x64 | I5-2800 |
| 200 | a inserir | a inserir | ARM7 | LPC2294-60 |
| 2000 | 54117000000 | 5411700 | x86 | I5-2400 |
| 2000 | 30967000000 | 3096700 | x64 | I7-1600 |
| 2000 | 24585000000 | 2458500 | x64 | I5-2800 |
| 2000 | a inserir | a inserir | ARM7 | LPC2294-60 |

Tabela - Resultado do calculo do tempo de processamento do algoritmo de *Goertzel*.

O **tempo total** representa o tempo de execução do teste; o **tempo relativo** representa quanto tempo demora o algoritmo de Goertzel a iterar cada uma das 88 frequências de tal forma a testar se esta está presente ou não; a frequência de amostragem utilizada para estes testes foi de 8800 Hz.

Os testes consistiram maioritariamente em dar várias amostras à implementação do algoritmo e esperar pelos resultados da detecção de frequência.

Os testes foram executados em várias arquitecturas com diferentes processadores de tal forma a que fosse possível visualizar como é que o algoritmo se comportava com diferentes capacidades de processamento, como é visível na Tabela 10 .

## 5.2 Testes à infra-estrutura *GoerzelController*

Os testes à infra-estrutura foram realizados igualmente em duas arquitecturas diferentes de forma a aprovar a sua implementação, os testes apresentados neste subcapitulo sobre a arquitectura PC correm sobre o sistema operativo windows (INSERT\_REF\_TO\_ARQ\_PC) e sobre a arquitectura ARM correram sobre o *mos* (INSERT\_REF\_TO\_MOS).

### 5.2.1 Preparação

Ao contrário dos testes realizados ao algoritmo de *Goertzel* os testes à infra-estrutura são muito mais amplos, uma vez que, com a infra-estrutura vêm resolvido todos os problemas detectados na fase processamento de sinal (INSERT\_REF\_TO\_CAP3) sendo necessário testar as soluções adoptadas.

A preparação segue os mesmos princípios descritos na preparação para o algoritmo de Goertzel mas como foram realizados testes funcionais foi necessário preparar a placa de som no *Windows* e o *ADC* no *mos* de forma a que fosse possível obter amostras de som reais.

### 5.2.2. Teste teórico

As frequências utilizadas para o teste teórico da infra-estrutura foram as mesmas usadas no teste teórico do algoritmo de Goertzel os resultados estão apresentados na Tabela 11.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Frequências(Hz) | Percentagem do sinal (%) | Percentagem Válida (>10%) |
| 55 | 50 | Sim |
| 110 | 49 | Sim |
| 440 | 67 | Sim |
| 880 | 21 | Sim |
| 1760 | 72 | Sim |
| 3520 | 79 | Sim |

Tabela - Resultados do teste teórico à infra-estrutura com múltiplas frequências.

As diferenças nos resultados são visíveis, todas as percentagens das frequências aumentaram consideravelmente, isto deve-se ao facto de haver uma filtragem do sinal antes de ser processado pelo algoritmo de Goertzel, assim a energia da contribuição da frequência para o sinal é comparada com a energia das amostras filtradas e como estas estão filtradas para cada gama, todas as outras frequências que não estejam presentes nessa gama, não estarão "visíveis", não contribuindo assim para o valor da energia filtrada, levando a que a diferença entre a energia total(energia filtrada) e a energia de contribuição da frequência seja menor.

Algo que se pode observar na Tabela 11 é que a frequência 880Hz tem uma percentagem consideravelmente mais baixa em comparação com todas as outras, isso deve-se ao facto de ser uma frequência de corte na gama onde se encontra.

Outra diferença foi o facto de em frequências com intervalo curto não existiu qualquer resultado falso, isto prova que todo o tratamento realizado para resolver a resolução do Goertzel foi propicio.

### 5.2.3. Teste temporal

Ao contrário do teste temporal realizado para o algoritmo de *Goertzel*, o teste da infra-estrutura não pode ser apenas entregar amostras à infra-estruturas e medir o tempo que esta demora a processar. Isto deve-se necessariamente à forma como a infra-estrutura trabalha as amostras.

Foi necessário então fazer vários testes modulados ao funcionamento da infra-estrutura, para testar e comparar quanto tempo demora o processamento de uma ou várias notas, tendo em atenção se estas se encontram na mesma gama ou não.  
A Tabela 12 mostra os resultados de testes singulares (amostras que só contenham uma frequência).

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| ***Gama(Hz)*** | Tempo processamento(ns) PC(aprox.) | Tempo processamento(ns) ARM(aprox.) | Frequência utilizada (Hz) |
| **27,5 - 61,7354** | 795000 | a inserir | 55 |
| **65,4064 - 146,832** | 670000 | a inserir | 103.826 |
| **155,563 - 349,228** | 655000 | a inserir | 329.628 |
| **369,994 - 830,609** | 193500 | a inserir | 587.33 |
| **880 - 1975,53** | 148200 | a inserir | 1567.98 |
| **2093 - 4186,01** | 127900 | a inserir | 4186.01 |

Tabela - Tempos relativos de processamento da infra-estrutura.

Na Tabela 12 nota-se imediatamente a discrepância de valores entre as primeiras gamas e as ultimas, isso deve-se à divisão por software da frequência de amostragem (). É interessante comparar os valores entre a Tabela 10 e a Tabela 12 já que a infra-estrutura conseguiu (para gamas altas) ser mais eficiente do que a implementação do algoritmo isso deve-se ao facto da infra-estrutura não processar sempre as amostras, além disso uma vez que esta sabe descartar silêncio () o processamento em "*long running*" torna-se mais eficiente tanto a nível de memória como a nível de velocidade de execução.

A segunda fase dos testes temporais consistiu em construir um sinal com várias frequências de diferentes gamas e medir o seu tempo, os resultados encontram-se na Tabela 13.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Frequencias (Hz)** | **Tempo processamento(ns) PC(aprox.)** | **Tempo processamento(ns) ARM(aprox.)** |
| **55**, **329.628**, **4186.01** | 792000 | a inserir |
| **329.628, 783.991**, **1244.51**, **4186.01** | 343000 | a inserir |
| **65.4064, 329.628, 783.991**, **1244.51**, **4186.01** | 792230 | a inserir |

Tabela - Resultado de testes temporais com várias frequências no sinal.

A Tabela 13 demonstra que a escolha de tornar a infra-estrutura *GoertzelController* multi-tarefa foi correcta, uma vez que como se pode observar os valores de processamento de várias frequências são praticamente o mesmo que levaria a processar a nota com gama mais baixa presente.

## 5.3 Testes temporais do *Micro Operating System*

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Sistema Operativo | Tempo de comutação(µs) | Latência de interrupções |
| FreeRTOS | 6,9 |  |
| TNKernel | 10,385 |  |
| eCos | >200 |  |
| mos | 6 |  |