

2 de Maio de 2011

O Maestro

Projecto e Seminário 2010/2011

Relatório Intercalar

*Instituto Superior de Engenharia de Lisboa*

Área Departamental de Engenharia de Electrónica e Telecomunicações e de Computadores

**Discentes:**  
Ana Correia, 31831

* Email : a31831@alunos.isel.pt
* Telefone: 918750435

Diogo Cardoso, 32466

* Email: a32466@alunos.isel.pt
* Telefone: 913288292

**Discentes:**  
Ana Correia, 31831

* Email : a31831@alunos.isel.pt
* Telefone: 918750435

Diogo Cardoso, 32466

* Email: a32466@alunos.isel.pt
* Telefone: 913288292

.

**Orientadores:**  
Pedro Sampaio

* Email : psampaio@cc.isel.ipl.pt

Artur Ferreira

* Email: arturj@ isel.pt

..................

Índice

[1. Introdução 4](#_Toc291761803)

[1.1 Objectivos e descrição do projecto 4](#_Toc291761804)

[1.2 Análise de Recursos 5](#_Toc291761805)

[1.3 Organização do documento 6](#_Toc291761806)

[2. Algoritmo de Goertzel 7](#_Toc291761807)

[2.1 Introdução 7](#_Toc291761808)

[2.2 Descrição 8](#_Toc291761809)

[2.3 Características 10](#_Toc291761810)

[3. Trabalho Desenvolvido 11](#_Toc291761811)

[3.1 Introdução 11](#_Toc291761812)

[3.2 Implementação do Algoritmo 11](#_Toc291761813)

[3.3 Instrumento de estudo 12](#_Toc291761814)

[3.4 Testes ao algoritmo de Goertzel 13](#_Toc291761815)

[3.4.1 Introdução 13](#_Toc291761816)

[3.4.2 Preparação 13](#_Toc291761817)

[3.4.3 Descrição e Resultados 13](#_Toc291761818)

[3.5 Tratamento da Resolução do Goertzel 14](#_Toc291761819)

[3.6 Controlador dos filtros Goertzel 16](#_Toc291761820)

[3.7 Tempos absolutos de Processamento 18](#_Toc291761821)

**Índice de figuras**

[Figura 1- Esquema de um Filtro de Goertzel. 8](file:///D:\FAC\LEIC\PS\working-copy\docs\relintercalar\relatóriointercalar3183132466V1.docx#_Toc290744153)

[Figura 2 - Máquina de Estados de um filtro Goertzel 10](file:///D:\FAC\LEIC\PS\working-copy\docs\relintercalar\relatóriointercalar3183132466V1.docx#_Toc290744154)

[Figura 3 - Diagrama de blocos do processamento de sinal. 11](file:///D:\FAC\LEIC\PS\working-copy\docs\relintercalar\relatóriointercalar3183132466V1.docx#_Toc290744155)

[Figura 4 - Funcionamento do Controller Goertzel 12](file:///D:\FAC\LEIC\PS\working-copy\docs\relintercalar\relatóriointercalar3183132466V1.docx#_Toc290744156)

# 1. Introdução

Este documento trata o relatório de progresso do projecto O Maestro. Aborda-se essencialmente a componente de processamento de sinal. Em relação ao estabelecido na proposta de projecto, verificou-se que o tempo de estudo e implementação necessários para realizar o algoritmo de Goertzel foi subdimensionado. Assim para ser possível implementá-lo e utilizá-lo para a detecção de frequência foi necessário despender mais tempo de desenvolvimento do que o previsto.

## 1.1 Objectivos e descrição do projecto

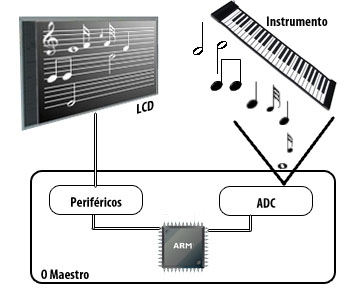
A figura seguinte ilustra a interacção entre os vários elementos presentes no projecto.

Figura - Funcionamento do Maestro

*O Maestro* será um sistema dedicado sobre a arquitectura *Advance Risk Machine* (*ARM7TDMI)* [[1](#ARM11)] que tratará de obter notas musicais produzidas por determinado instrumento e apresentá-las sob a forma de uma pauta musical. Para a captação do som 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 ():

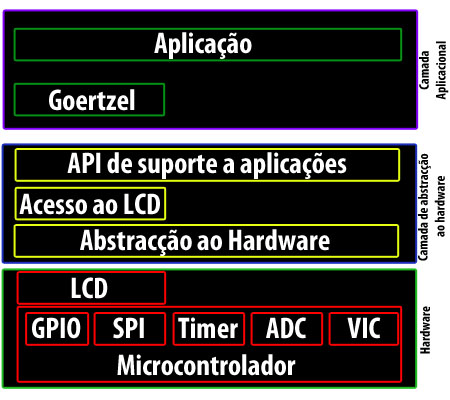
1. Hardware, responsável por interagir directamente com os periféricos internos e externos do microcontrolador.
2. Abstracção ao hardware, responsável por definir a ponte entre a camada aplicacional e o hardware.
3. Aplicacional, responsável pelo controlo do *input* e *output* do utilizador, gestão da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

Figura - Arquitectura de Software do Projecto

## 1.2 Análise de Recursos

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

.

Para a implementação do projecto foram levantados os seguintes requisitos:

* Microcontrolador baseado na arquitectura ARM7TDMI - LPC2294 da NXP [[3](#Kei11)].
* LCD RGB gráfico (320x240 *pixels*) com *touch screen*.
* Ferramentas open-source da GNU para desenvolvimento sobre a arquitectura ARM7TDMI.
* Conversor analógico-digital para captação de sinal.

## 1.3 Organização do documento

Este documento está dividido em 4 secções. A presente secção de cariz introdutório trata de expor a descrição, os objectivos finais e os recursos necessários à elaboração do projecto.

Na secção 2 irá constar a descrição do algoritmo de *Goertzel* [[2](#1)] e as motivações para a escolha deste como algoritmo de processamento de sinal.

Na secção 3 será apresentado todo o trabalho realizado até ao momento, nomeadamente a implementação do algoritmo de *Goertzel*, a resolução para problemas detectados na testes realizados sobre o algoritmo.

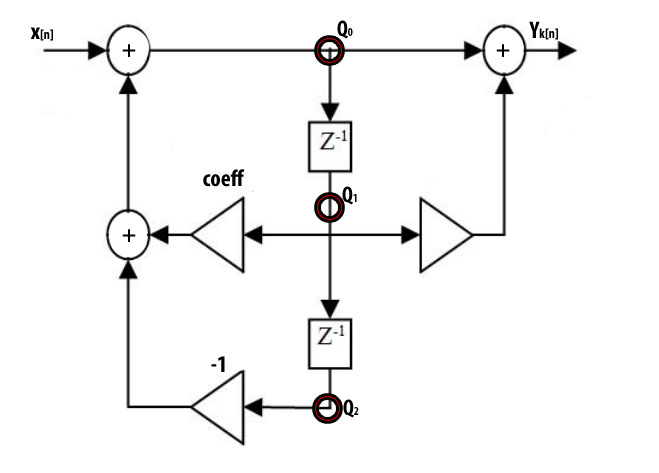
Por fim a secção 4 irá conter as conclusões do trabalho realizado bem como o trabalho futuro do projecto.

# 2. Algoritmo de Goertzel

## 2.1 Introdução

O algoritmo de Goertzel foi criado por Gerald Goertzel em 1958. Este permite calcular a transformada discreta de Fourier (DFT – Discrete Fourier Transform) usando 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.

Figura - Esquema de um filtro de Goertzel

A ilustra um filtro de Goertzel.

## 2.2 Descrição

O algoritmo de Goertzel[[**1**](#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 é possível verificar quanto é que a frequência contribuiu 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[[**3**](#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 do resultado da equação (2).

A partir da Figura 3 pode deduzir-se a seguinte equação:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (3) |

A equação representa o estado intermédio à medida que as n amostras "circulam" pelo filtro. Esta retrata que 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 .

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (4) |

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 (5). 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 (6):

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (5) |
|  |  | (6) |

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

## 2.3 Características

O algoritmo optimizado de Goertzel não usa operações complexas, além disso a sua complexidade aritmética é reduzida necessitando apenas de multiplicações e adições, sendo *N* o valor de elementos por amostra.

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.

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

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

A resolução de um algoritmo de captação de frequências é o intervalo entre duas frequências detectáveis, ou seja, se tivermos duas frequências *a* e *b*, a diferença entre elas deve ser menor que o valor da resolução (8).

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | para *b > a* | (8) |

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. Trabalho Desenvolvido

## 3.1 Introdução

Após o estudo e análise do algoritmo de Goertzel escolheu-se a linguagem C como ferramenta de implementação. A escolha desta deveu-se mais uma vez ao factor de portabilidade de código.

## 3.2 Implementação do Algoritmo

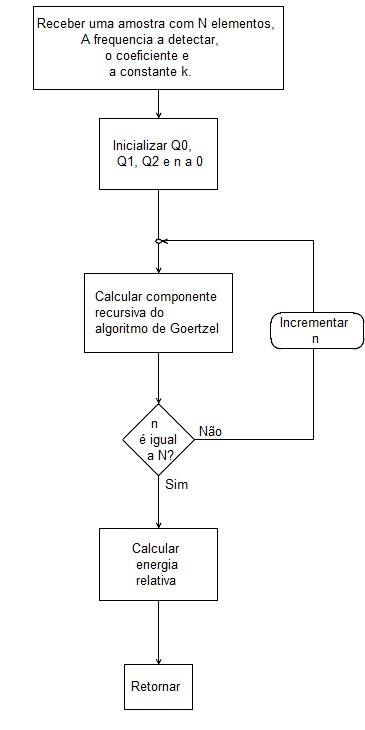
A representa a máquina de estados da implementação do algoritmo de Goertzel:

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

Como referido anteriormente (Equação e Figura 3) este algoritmo é recursivo 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 de *32 bit* e outra com valores decimais a *64 bit*.

## 3.3 Instrumento de estudo

Para testar e analisar o algoritmo de Goertzel foi necessário escolher um instrumento. Nesta escolha teve-se em conta os seguintes critérios:

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

Com estes critérios escolheu-se o **piano** como instrumento de teste e as suas frequências encontram-se na Tabela 1.

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 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 - Frequências e diferenças entre frequências(D.C.A) de um piano.

## 3.4 Testes ao algoritmo de Goertzel

### 3.4.1 Introdução

Após a implementação do algoritmo de Goertzel foi necessário testá-lo em diversos factores, nomeadamente o funcionamento básico do algoritmo sobretudo como é que programaticamente se sabe que existe uma frequência presente num determinado sinal. Na sequência dos testes iniciais foram detectados outros problemas não previstos até ao momento, concretamente o comportamento do algoritmo de *Goertzel* quando se está a detectar duas frequências tais que a diferença entre as mesmas é reduzida.

### 3.4.2 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 calculo das amostras da sinusóide é efectuado de acordo com a equação )

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

### 3.4.3 Descrição e Resultados

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, criou-se uma sinusóide com várias frequências, instanciou-se um filtro de Goertzel para cada frequência e entregou-se a sinusóide a cada um dos filtros. A mostra os resultados obtidos neste teste.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Frequências(Hz) | Percentagem do sinal(%) | Encontrada |
| 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 com uma sinusoide com multiplas frequências.

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

Como se pode verificar nos resultados obtidos as frequências foram encontradas mas durante o teste detectaram-se problemas com a resolução do algoritmo (), uma vez que ao testar o algoritmo com frequências com um intervalo curto este retornava que frequências não presentes na sinusóide o estavam.

Por fim foi ainda verificado que ao utilizar valores inteiros a 32 bits, os resultados são próximos dos resultados teóricos do algoritmo Goertzel.

## 3.5 Tratamento da Resolução do Goertzel

Como foi referido na conclusão dos testes do algoritmo de Goertzel, as frequências cujo intervalo entre elas seja curto, o Goertzel considera falsamente que existem no sinal. Esta diferença entre valores de frequências designa-se por resolução em frequência sendo calculada com a equação (7).

Por exemplo, para os valores de e temos um isso significa que caso se queira detectar uma frequência com o valor de 440Hz 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 básicas 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 Tabela 1.

Como ilustrado na , as diferenças entre as frequências são crescentes e enquanto que a resolução anteriormente calculada era adequado para as frequências superiores a 3000 Hz não o era para as frequências inferiores 740 Hz sendo necessário fazer algum ajuste de modo a que a resolução nunca seja superior à diferença de qualquer frequência.

A solução mais intuitiva seria aumentar o divisor da equação , 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 de forma a 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 34 posições uma vez que, .

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.  
De seguida construi-se uma infra-estrutura que com os dados recolhidos da aplicação utilitária geri-se os filtros de Goertzel.

## 3.6 Controlador dos filtros Goertzel

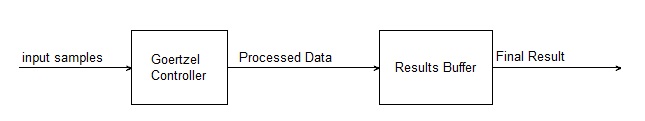
A representa o pipeline de processamento de sinal utilizando o algoritmo de Goertzel, este tem apenas dois processos de manipulação de dados, o primeiro Goertzel Controller é responsável por analisar o sinal e referir que frequências estão presentes e o segundo, Results Buffer que será onde os resultados serão momentaneamente guardados de maneira a que seja possível estender futuramente as operações de processamento.

Figura - Diagrama de blocos do processamento de sinal.

Uma vez que o algoritmo de Goertzel é paralelizável criou-se uma infra-estrutura que tirasse partido dessa característica, de modo a controlar os seus filtros e armazenar os resultados como ilustra a Figura 6.

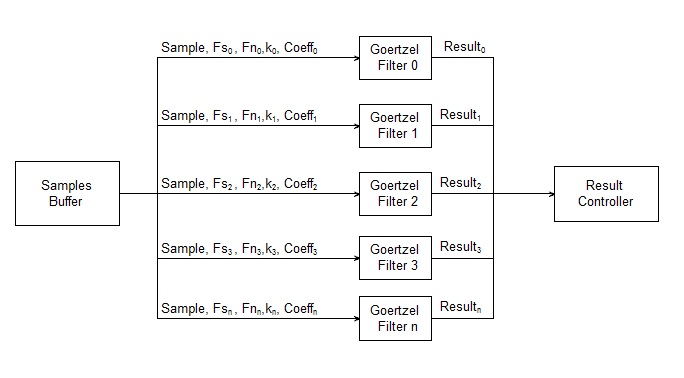


Figura - Funcionamento do Goertzel Controller.

O *Goertzel Controller* tem como objectivo gerir filtros de Goertzel, de tal maneira que sejam processadas múltiplas frequências simultaneamente. Este também é responsável por gerir o tempo de vida de uma amostra, ou seja, quando todas as frequências tenham sido verificadas sobre uma dada amostra, esta não será mais necessária podendo portanto ser eliminada. Por fim o *Goertzel Controller* controla ainda quando é que os resultados estarão disponíveis, esta operação é crucial para que não sejam propagados resultados incompletos.

## 3.7 Tempos absolutos de Processamento

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 realizadas algumas aplicações utilitárias que determinassem 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(GHz) |
| 200 | 6022000000 | 602200 | x86 | I5 2.4 |
| 200 | 3260000000 | 326000 | x64 | I7 1.6 |
| 200 | 2792000000 | 279200 | x64 | I5 2.8 |
| 2000 | 54117000000 | 5411700 | x86 | I5 2.4 |
| 2000 | 30967000000 | 3096700 | x64 | I7 1.6 |
| 2000 | 24585000000 | 2458500 | x64 | I5 2.8 |

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 uma amostra 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.

# 4. Conclusões

## 4.1 Goertzel vs Transformada de Fourier (FFT)

Quando é necessário resolver um problema que envolva detecção de frequências, normalmente, a primeira abordagem a tomar é usar a *Fast Fourier Transform* (FFT). Tanto a *FFT* como o algoritmo de Goertzel operam sobre vectores de *N* amostras. A *FFT* e o algoritmo de *Goertzel* diferenciam-se pelo facto de a *FFT* conseguir de uma só vez detectar várias frequências porque produz um vector com *N* coeficientes espectrais, enquanto que para cada filtro de Goertzel apenas é possível detectar a presença de uma frequência. Esta 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.

A escolha do algoritmo de *Goertzel* sob a *FFT* deve-se ao facto de esta necessitar uma quantidade substancial de memória, detectar todas as frequências numa dada largura de banda, ter uma elevada complexidade aritmética tornando-a mais lenta e pelo uso de valores decimais é menos portável do que o algoritmo de *Goertzel*.

## 4.2 Portabilidade

Durante toda a fase de desenvolvimento o objectivo principal sempre foi a portabilidade do código escrito, apesar de ter sido implementado e testado duas versões do Goertzel, um com valores inteiros a 32 bit e uma com valores decimais a 64 bit e os resultados tenham sido satisfatórios, a portabilidade fica sempre comprometida com a precisão do dispositivo de captação das frequências.

## 4.3 Trabalho Futuro

Futuramente irá-se familiarizar-se com o *hardware* de tal forma a que sejam construídas as camadas de abstracção ao hardware, apenas depois deste passo se irá portar a infra-estrutura criada para o novo *target.* Após o porte da infra-estrutura resta apenas a criação da aplicação que será *O Maestro*.

# 5. Referências

x

|  |  |
| --- | --- |
| [1] | ARM. The Architecture for the Digital World. [Online]. <http://www.arm.com> |
| [2] | R. Schafer A. Oppenheim, *Discrete-Time Signal Processing 2nd edition*.: Prentice Hall , 1999. |
| [3] | Keil. LPC2294 User Manual. [Online]. <http://www.keil.com/dd/docs/datashts/philips/user_manual_lpc2119_2129_2194_2292_2294.pdf> |
| [4] | Andrew G. Dempster, Izzet Kale Robert Beck, "Finite-Precision Goertzel Filters Used for Signal," vol. VOL. 48, no. IEEE TRANSACTIONS ON CIRCUITS AND SYSTEMS—II: ANALOG AND DIGITAL SIGNAL PROCESSING, 2001. |
| [5] | Kevin Banks. The Goertzel Algorithm. [Online]. <http://www.eetimes.com/design/embedded/4024443/The-Goertzel-Algorithm> |
| [6] | R. Schafer A. Oppenheim, *Discrete-Time Signal Processing 2nd edition*.: Prentice Hall, 1999. |
| [7] | Gene Small. Detecting CTCSS tones with Goertzel's algorithm. [Online]. <http://www.eetimes.com/design/embedded/4025660/Detecting-CTCSS-tones-> |

x

# 