

**MODELO ACÚSTICO DEL APARATO FONADOR  
PARA VOCAL MASculINAS EN ESPAÑOL**

**PROYECTO DE GRADO**

**ANA MARÍA PARDO**

**UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA**

**INGENIERÍA DE SONIDO**

**BOGOTÁ, D.C.**

**2007**



**MODELO ACÚSTICO DEL APARATO FONADOR  
PARA VOCAL MASculINAS EN ESPAÑOL**

**PROYECTO DE GRADO**

**ANA MARÍA PARDO**

**UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA**

**INGENIERÍA DE SONIDO**

**BOGOTÁ, D.C.**

**2007**

Nota de Aceptación

---

---

---

---

---

Presidente del Jurado

---

Jurado

---

Jurado

Bogotá (08, Mayo, 2007)

## INTRODUCCIÓN

Hoy en día el cáncer de la cavidad bucal, faringe y laringe representa 1.7 % de muertes por cáncer (6% en el hombre y 1.9% en la mujer). 5.5 % de cáncer de adulto (8.1 en el hombre 2.8 en la mujer) son producidos por cáncer de laringe. Estas personas pierden el órgano del habla. En Ginebra, es la 14ª causa de muerte en la mujer y 4ª en el hombre. Estas estadísticas, junto con las impresionantes imágenes de personas a quienes se les remueve la laringe llevaron a crear este proyecto.

El cuerpo humano ha sido de estudio del hombre desde sus inicios. Uno de los sistemas más complejos de este cuerpo es el aparato fonador. Por medio de este aparato deglutimos, respiramos, hablamos y cantamos. Además, tenemos la capacidad de variar en frecuencia, timbre e intensidad y todo gracias a un conjunto de músculos en la laringe, que permiten el paso del aire a través de las cuerdas vocales. ¿Será entonces posible modelar este aparato tan complejo?

Existen muchas formas en las que el ser humano a lo largo del tiempo ha intentado modelar el mecanismo de la laringe entre cuyas funciones está el habla. Hay maneras en que los científicos han intentado modelarlo; A través de las invenciones de la medicina, el análisis electrónico y acústico, y la síntesis, estos modelos se han logrado ilustrar y se buscan analizar en esta investigación. La mayoría de estos acercamientos consiguen aproximarse a la laringe, pero la humanidad no ha hecho posible un reemplazo real y tangible para un sistema tan complejo.

A través de esta investigación se va a modelar un dispositivo capaz de emular las vocales humanas, teniendo en cuenta las limitantes de una investigación previa que se hizo sobre el

tema. Se establecerán patrones de comportamiento espectral de la voz masculina en español que permitan dicho análisis.

Los pasos para poder conseguir esto se basan en la teoría de multi-cuadro propuesta por Yoshinori Shiga. Según esta, matemáticamente se puede conseguir una función que genere sonidos como los produce la laringe. Esta función a su vez permitirá generar un circuito acústico que permita exactamente esto. Primero se tienen que tomar muestras de audio de vocales y analizarlas a fin de poder ingresar los datos requeridos para aplicar dicha teoría. Matemáticamente se debe lograr una función aplicable a una función de transferencia. Finalmente esta función debe ser aplicable a un circuito eléctrico y a uno acústico que permita emular las vocales.

## **RESUMEN**

Mediante el uso de un acercamiento matemático complejo (Análisis Multi Cuadro MFA), y tomando como referencia algunas vocales producidas sin alterar la forma del tubo, este proyecto produce una función de transferencia capaz de reproducir vocales para todos aquellos hombres quienes han perdido su habilidad de hablar debido al cáncer de laringe. Adicionalmente, se presenta un modelo eléctrico y uno acústico para poder ayudar no sólo a estas personas sino también para permitir el mejoramiento de la forma en la que las comunicaciones son manejadas actualmente. El proceso matemático es basado en el análisis cepstral, y genera una programación completa que encuentra una serie de números que al ser insertados en una función generarán estas vocales. Este proceso no sólo va a representar un modelo acústico sino que también representará una parte fundamental en la síntesis de voces y los beneficios a que esto conlleva.

## **ABSTRACT**

Using a complex mathematical approach (Multi Frame Analysis), and taking as a reference some vowels produced without altering the shape of the tube, a transfer function capable of reproducing vowels for all those men who have actually lost their ability to speak due to larynx cancer is built within this project. Additionally, an electric and an acoustic model is presented in order to help not only these people but also to improve the form in which communications are held nowadays. The mathematical approach is based on the cepstral analysis, and generates a complete programming that finds a set of numbers that if inserted in a function will generate these vowels. This process will not only represent an acoustic model, but will also represent a very important feature for vocal synthesis, and their subsequent benefits.

## **AGRADECIMIENTOS**

El autor de esta investigación quiere agradecer a las siguientes personas: Yoshinori Shiga, por su increíble ayuda desde Edimburgo sin la cual este proyecto se hubiera aplazado infinitamente, Johan Nuñez y Luis Jorge Herrera por su colaboración a lo largo de estos 2 años, Manuel Torres por aguantarse la primera parte de este proyecto y aguantarme tanto tiempo, Juan Manuel Medina y Jorge Monroy por creer en mi, Gloria Echeverri, mi mamá, por presionarme a acabar rápido, José Luis Sánchez y Diego Junca, por subestimarme, Clara por ser la mejor abogada soltera, y al resto, por las cervezas compartidas. Danielito, por el tiempo del computador y por creer entender.

*Dedicado a  
La República Checa*

## TABLA DE CONTENIDO

<b>1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 ANTECEDENTES.....</b>	<b>1</b>
<b>1.2 DESCRIPCIÓN Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....</b>	<b>4</b>
<b>1.3 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>5</b>
<b>1.4 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>5</b>
1.4.1 OBJETIVO GENERAL.....	5
1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	5
<b>1.5 ALCANCES Y LIMITACIONES DEL PROYECTO.....</b>	<b>6</b>
1.5.1 ALCANCES.....	6
1.5.2 LIMITACIONES.....	6
<b>2. MARCO DE REFERENCIA.....</b>	<b>7</b>
<b>2.1 MARCO CONCEPTUAL.....</b>	<b>7</b>
<b>2.2 MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>13</b>
<b>3. METODOLOGÍA .....</b>	<b>19</b>
<b>3.1 ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>19</b>
<b>3.2 LÍNEA DE INVESTIGACIÓN DE USB / SUB-LÍNEA DE FACULTAD / CAMPO TEMÁTICO DEL PROGRAMA.....</b>	<b>19</b>
<b>3.3 TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN.....</b>	<b>19</b>
<b>3.4 POBLACIÓN Y MUESTRA.....</b>	<b>20</b>
<b>3.5 HIPÓTESIS.....</b>	<b>20</b>
<b>3.6 VARIABLES .....</b>	<b>21</b>
3.6.1 VARIABLES DEPENDIENTES.....	21
3.6.1 VARIABLES INDEPENDIENTES.....	21

<b>4. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....</b>	<b>22</b>
<b>5. DESARROLLO INGENIERIL.....</b>	<b>37</b>
<b>6. CONCLUSIONES.....</b>	<b>58</b>
<b>7. RECOMENDACIONES.....</b>	<b>60</b>
<b>APENDICES.....</b>	<b>i</b>
<b>APENDICE A - HOJA DE PREGUNTAS PARA LA APRECIACIÓN SUBJETIVA (AUDITIVA) DE LAS VOCALES EMULADAS.....</b>	<b>i</b>
<b>APENDICE B - VALORES DETERMINADOS PARA VT CALCS DE CADA VOCAL.....</b>	<b>ii</b>
<b>APENDICE C - PROGRAMA QUE RETORNA LOS COEFICIENTES CEPSTRALES DE LA VOCAL A PARA AMPLITUD Y FASE.....</b>	<b>iii</b>
<b>APENDICE D - PROGRAMACIÓN EN EXCEL PARA DETERMINAR LOS PICOS DE FRECUENCIAS .....</b>	<b>xx</b>
<b>APENDICE E - PROGRAMACIÓN PARA RETORNAR LOS VALORES DE FFT A LOS VALORES QUE PRODUCE MATLAB Y ASÍ POR MEDIO DE LA IFFT PRODUCIR LAS VOCALES.....</b>	<b>xxiii</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	

## 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

### 1.1 ANTECEDENTES

En 1773, el profesor de fisiología de la Universidad de Copenhague, Ch. G. Kratzenstein, produjo vocales humanas por medio de tubos de resonancia conectados a tubos de órganos.

Wolfgang von Kempelen creó una máquina capaz de hablar, con el propósito de convertirla en un modelo inicial a ser perfeccionado posteriormente. Esta máquina producía frases completas cortas, e incluía un fuelle que simulaba los pulmones, se operaba manualmente por medio del antebrazo derecho, junto con un contrapeso para simular la inhalación. También tenía una caja de viento manipulada por medio de los dedos de la mano derecha con palancas que simulaban la boca y la nariz. Toda la máquina tenía huecos para dejar salir el aire que al ser bloqueados, cambiaban el timbre de la voz. El flujo de aire estaba conducido hacia la boca por una caña oscilante y por un tubo de desviación; esto permitía incrementar la presión de aire en la cavidad bucal para producir sonidos sordos. Con la mano izquierda, se controlaban las propiedades de resonancia bloqueando algunos de los huecos. Así se formarían algunas vocales y consonantes con gran aproximación. Algunos sonidos no pudieron ser simulados mediante esta máquina como la D, G, K y T, debido a la rigidez de la abertura de la boca ya que no podía ser cerrada.

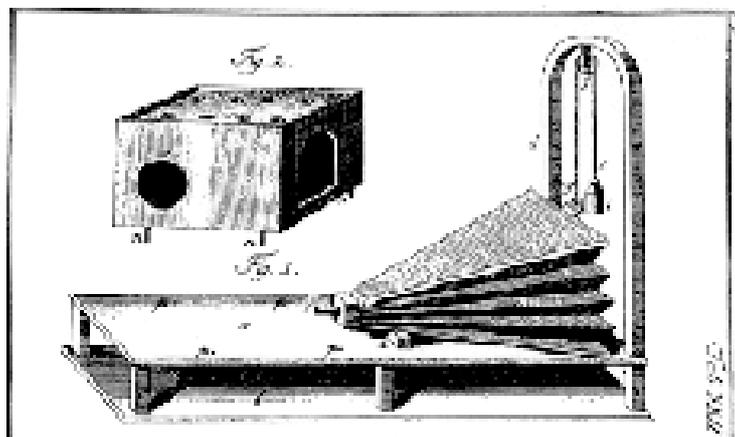


Figura 1.1 a) modelo de von Kempelen

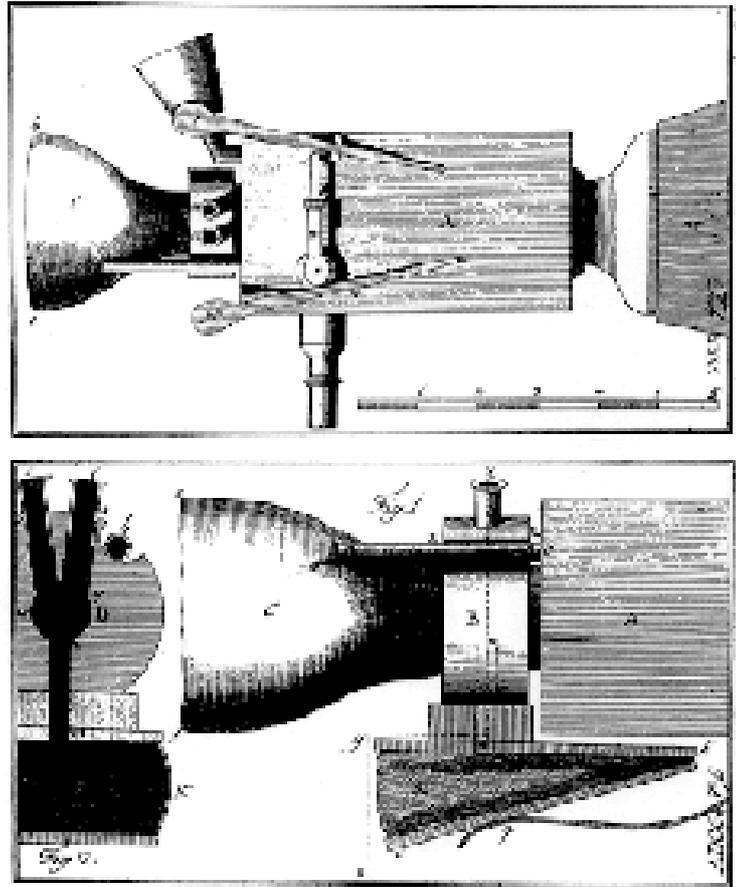


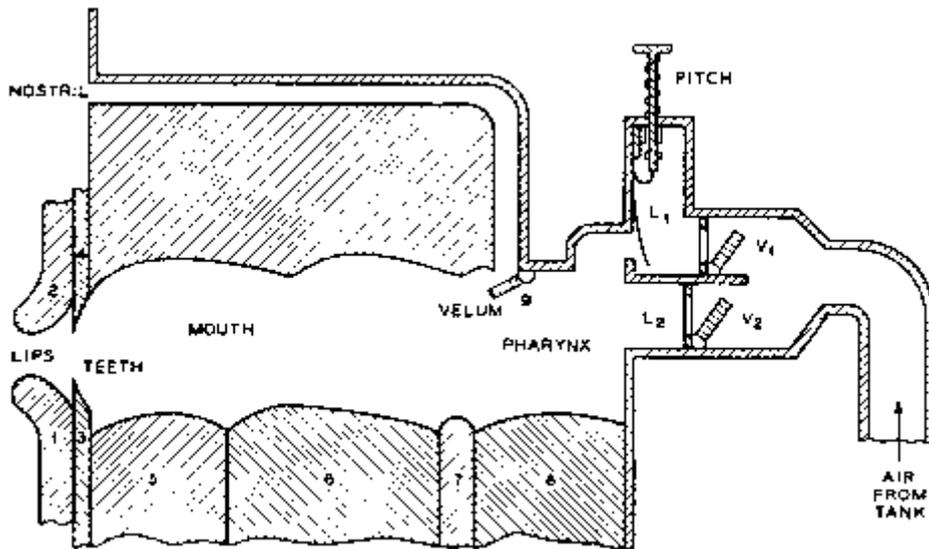
Figura 1.1 b) continuación del modelo de von Kempleler

Para simular las cuerdas vocales, se creó una caña de marfil, el largo efectivo de esta podía ser variado, pero no durante la producción del habla por lo que la máquina hablaba en un sólo tono. Dos de las palancas manipuladas por la mano derecha producían sonidos fricativos, la tercera palanca efectuaba la producción de la r, que soltaba un cable sobre la caña vibratoria. Hoy en día se conserva un original de la máquina de Von Kempelen en un Museo de Munich.

En 1835, Joseph Faber creó un dispositivo capaz de producir voz variando la frecuencia y emitiendo sonidos que antes eran imposibles. Esta máquina adicionalmente incluía un modelo de la cavidad faríngea y de la lengua. El fuelle era manipulado por medio de un pedal. La máquina se veía así:



En 1937, R. R. Riesz creó un dispositivo muy similar a los anteriores pero con un tracto vocal más parecido en forma al real.



En 1939, Homer Dudley, presentó en la feria mundial anual de Nueva York, un modelo llamado VODER. Este aparato utilizaba la energía eléctrica como parte del funcionamiento. Sólo hasta después de algunos años este VODER se transformó en el famoso VOCODER que simula la voz humana por medio de síntesis.

A partir de 1950, muchos modelos de producción del habla se crearon a partir de una fuente de señal eléctrica que se pasa a través de un filtro, los filtros servían para simular las propiedades de resonancia del tracto vocal. Dos acercamientos a un modelo físico capaz de emular fonemas se dieron. En el primero, se simuló la articulación y en el segundo, cada frecuencia formante.

A partir de 1970, todos los sistemas para producir voz, eran asociados a computadores. Los circuitos mediante los cuales se simulan ya no son reales sino también son simulados. Los computadores hicieron posible utilizar la síntesis del habla para propósitos prácticos.

En Colombia, no ha sido posible un acercamiento tangible y sólo se trata el tema teóricamente. Algunos estudiantes de ingeniería de sonido, han intentado por diferentes medios lograr un acercamiento, e inclusive, el autor de este proyecto, en una ocasión pasada, intentó modelarlo. Desafortunadamente, la falta de conocimiento previo en el tema, hizo que se cometieran muchos errores no sólo en dicho proyecto, sino en otros proyectos de estudiantes de la Universidad de San Buenaventura. Ninguna entidad nacional ha invertido su tiempo y dinero en este tipo de investigación.

Inicialmente, la necesidad surge como una simple curiosidad de cómo funciona el aparato fonador humano, hasta el punto de querer reemplazarlo. Especialmente a partir del fenómeno de cáncer de laringe, enfermedad en la que es necesario extraer la laringe, y por consiguiente el paciente pierde el habla. La laringe artificial existente no es más que un vibrador que vibra a una sola frecuencia y puede ser insertado internamente o puede ser utilizado externamente. Este aparato aunque devuelve el habla a las personas, no les permite tener versatilidad, ni variar en frecuencia.

## **1.2 DESCRIPCIÓN Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

La ciencia siempre ha buscado entender el funcionamiento del cuerpo humano y aplicar su funcionalidad a inventos externos. El aparato fonador no es menos complejo que muchos de los sistemas del cuerpo humano que se han querido emular. Se busca por medio de esta investigación, poder modelar un aparato acústico que permita emular las

vocales humanas masculinas, haciendo una analogía eléctrico/mecano/acústica de este sistema. Todo esto con el fin de saber si una máquina es capaz de reproducir las vocales humanas.

### **1.3 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN**

La importancia de esta investigación es teórica y práctica, ya que no solo se logrará establecer los patrones de las vocales masculinas sino que modelará un aparato capaz de reproducir dichas vocales sin necesidad de una reproducción humana. Debido a que los únicos que han sido capaces de emular voces humanas son los orientales, y debido a que en Colombia nunca se ha planteado una investigación de tal dimensión, esta resulta novedosa para un estudio de la voz humana mucho más profundo y para facilitar los sistemas de comunicación que utilizan muestras de voz, en vez de utilizar voces artificialmente generadas. Esta investigación será de gran interés para aquellos que trabajan con comunicaciones así como para los médicos que buscan nuevas alternativas para reemplazar la laringe, aunque el proyecto abarque no sólo este órgano. La originalidad del proyecto recae en el tema en sí, ya que los proyectos enfocados a ingeniería de sonido, muy pocas veces están relacionados con voces, y casi nunca involucran el funcionamiento biológico de un sistema humano. Establecer que tan factible es este proyecto, depende en gran parte de factores externos como equipo médico capacitado y financiación adecuada para equipos.

### **1.4 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN**

#### **1.4.1 OBJETIVO GENERAL:**

Modelar un dispositivo acústico capaz de emular las vocales producidas a través de voces masculinas como son producidas en español.

#### **1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:**

- ☞ Tomar muestras de voces masculinas produciendo vocales y analizar su espectro de frecuencias.
- ☞ Emular por medio de síntesis aditiva las frecuencias fundamentales y parciales de las tomas de audio promedio.

- ☞ Comprobar que la analogía eléctrica del aparato fonador ya existente tiene resultados similares a los emulados por síntesis.
- ☞ Proponer una analogía acústica del sistema

## **1.5 ALCANCES Y LIMITACIONES DEL PROYECTO**

### **1.5.1 ALCANCES:**

Esta investigación va a lograr construir un aparato eléctrico y acústico capaz de emular las vocales producidas por voces masculinas. Va a permitir futuras investigaciones a nivel nacional para reemplazar el aparato fonador por otros medios diferentes al de la laringe artificial. Va a caracterizar las vocales masculinas en español para otros futuros proyectos de emulación de frases por medio de computadores, sin que estas sean previamente grabadas y sin necesidad de una voz humana.

### **1.5.2 LIMITACIONES:**

Esta investigación tiene como limitante la falta de recursos ya que va a ser realizado por una sola persona y no se contó con ninguna entidad que apoyara el proyecto. Por otro lado la ausencia de un equipo médico puede limitar la investigación debido a que en una ocasión previa, se intentó realizar este proyecto y los diferentes problemas de ejecución de la voz hicieron que el proyecto no llegara a su final. Es necesario contar con voces anatómicamente limpias para evitar variantes en la ejecución de las vocales.

## 2. MARCO DE REFERENCIA

### 2.1 MARCO CONCEPTUAL

#### Aparato fonador

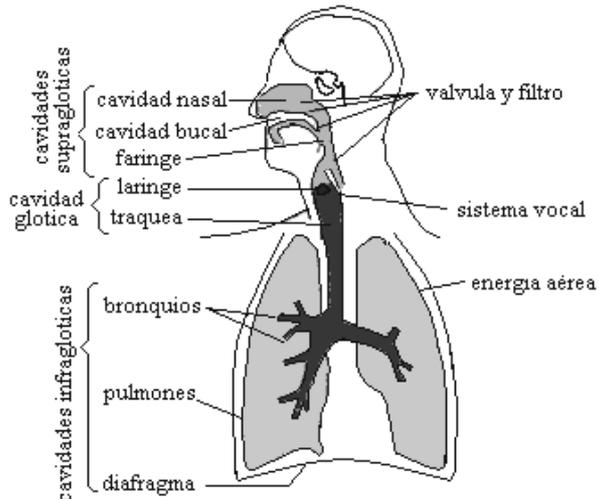


Figura 2.1 Aparato fonador

El conjunto de órganos que tienen como función permitir el habla en los seres humanos, se denomina aparato fonador. Este aparato está compuesto por varios órganos que comienzan desde los pulmones y termina en los labios, y estos son: diafragma, pulmones, traquea, laringe (con sus partes internas), faringe, cavidad bucal y cavidad nasal. Las funciones diferentes a las de producir el habla

tales como la deglución o la respiración no hacen parte del modelo que se pretende crear mediante este proyecto.

#### LPC (Estimación espectral por predicción lineal)

Esta es una técnica dada la posibilidad de tomar una señal con un número reducido de patrones para parametrizar la misma. Se basa en el principio que modela el tracto vocal como un filtro digital. Cada palabra tendría unas componentes que serían los coeficientes del filtro. Este sistema no registra la señal dada sino que la transforma en un filtro al que se le inyecta un tren de pulsos y la señal original se transforma en la señal de voz. El tren de impulsos es el que produce señales sonoras mientras que la fuente de ruido aleatorio producirá las señales no sonoras. Si se aplicara la transformada discreta de Fourier, las resonancias coincidirían, pero el espectro del sistema LPC es más suave en sus contornos.

### **MFA (Análisis Multi cuadro)**

MFA es un tipo de análisis de frecuencias de un sonido determinado en el que no sólo se analiza un sólo sonido con su frecuencia fundamental y sus frecuencias armónicas, sino en el que se analiza muchas frecuencias fundamentales del mismo sonido y sus diferentes frecuencias armónicas para evitar omitir detalles debidos a los “huecos” de frecuencias que se presentan generalmente entre una frecuencia fundamental y sus frecuencias armónicas. De esta forma es más fácil determinar una envolvente espectral en frecuencia. Así mismo se evitan problemas derivados de la interpolación matemática de dicha envolvente.

### **Dispositivo acústico**

El objetivo general de esta investigación habla de modelar un dispositivo acústico. Este consiste básicamente en un circuito compuesto por una serie de elementos de impedancia y movilidad acústicos que en conjunto permiten producir o transducir ondas sonoras. En este caso en particular, se busca generar vocales a partir de picos de frecuencia armónicos a la misma frecuencia como son planteados por el análisis multi-cuadro. A la salida de este circuito se deben generar estas vocales masculinas.

### **Síntesis Aditiva**

Síntesis aditiva es un método mediante el que se construyen formas de onda a partir de la combinación de ondas sinusoidales cuyas frecuencias y amplitudes son independientemente variables. Como lo que se busca en esta investigación es la función bajo la cual las vocales masculinas producidas en español son producidas, este método de síntesis permitirá de forma sencilla y siguiendo los parámetros deseados, crear sonidos de vocales, para eventualmente hallar matemáticamente la forma en la que estos son creados y buscar un patrón en su contenido de frecuencia (ver análisis cepstral). Otros tipos de síntesis pueden llegar a ser muy complejos y lograrán extraer otros datos de las ondas diferentes a los que busca la teoría del MFA.

### **Analogías electroacústicas**

Una analogía electroacústica, permite entender un sistema acústico complejo como un circuito eléctrico sencillo a partir de su función de transferencia, o ecuación diferencial.

Este principio de analogía se aplica a cualquier tipo de sistema acústico, mecánico o eléctrico, siempre y cuando sus ecuaciones diferenciales o funciones de transferencia sean idénticas (en la práctica lo más parecidas posible). Al obtener un circuito eléctrico que describa la funcionalidad del sistema acústico o viceversa, es posible A) Visualizar el comportamiento de un sistema complejo sin necesidad de resolver sus ecuaciones diferenciales. B) Obtener las ecuaciones diferenciales por simple inspección. Los elementos mecánicos acústicos deben permitir pasar de un circuito a otro, por lo que se debe mantener la identidad original de cada componente. Los circuitos equivalentes permiten un único elemento que describa parte del sistema mecánico. A estos elementos también se les conoce como elementos concentrados. En general, las variables del sistema pueden ser de dos tipos, una caída de tensión eléctrica, o un flujo representado por corriente eléctrica.

<i>Analogía</i>	<i>Sistema mecánico</i>	<i>Sistema acústico</i>
Impedancia	Caída $e(t) \rightarrow$ Fuerza $f(t)$ Flujo $i(t) \rightarrow$ Velocidad $u(t)$	Caída $e(t) \rightarrow$ Presión $p(t)$ Flujo $i(t) \rightarrow$ Velocidad volumétrica $U(t)$
Movilidad	Caída $e(t) \rightarrow$ Velocidad $u(t)$ Flujo $i(t) \rightarrow$ Fuerza $f(t)$	Caída $e(t) \rightarrow$ Velocidad volumétrica $U(t)$ Flujo $i(t) \rightarrow$ Presión $p(t)$

Tabla 2.1 Variables mecánicas y acústicas relacionadas a caídas, tal y como las representa el circuito equivalente mediante tensiones o intensidades

Las variables mecánicas y acústicas de la tabla 2.1 se relacionan mediante las siguientes ecuaciones:

$$p = \frac{f}{S},$$

$$U = uS$$

En donde, S es el área del fluido normal al movimiento en el sistema que se está modelando.

En esta investigación las analogías electroacústicas son de vital importancia ya que son las que van a permitir que se prediga el modelo acústico del sistema. Estas no permitirán, sin embargo, crear el sistema electrónico, pero el buen uso de esta información determinará el correcto funcionamiento del producto final.

### **Espectro de frecuencia**

Un espectro de frecuencia es una gráfica de la variación de las frecuencias en función de la variación de una masa que crece linealmente, esto es, la amplitud. Esto puede aplicarse a cualquier concepto asociado con frecuencia o movimientos ondulatorios como son los colores, las notas musicales, las ondas electromagnéticas de radio o TV e incluso la rotación regular de la tierra. En este caso en particular, el espectro de frecuencias es aplicado al audio de vocales. Se genera a partir de la Transformada Rápida de Fourier y tiene amplia gama de ventaneos dependiendo de la cantidad de tomas de audio que se produzcan y la cantidad de tiempo que la señal a analizar tenga. Cada una de estas funciones de ventaneo consiste en obtener métodos que puedan manifestar un buen desempeño tanto de superresolución como de alta resolución.

### **Análisis Cepstral**

Este es un método efectivo que reduce el contenido armónico complejo de vibraciones excitadas por un ruido de impulso. Simplifica una señal compleja e identifica la fuente de componentes relacionados por una pequeña diferencia en frecuencia. Consiste en el análisis de periodicidad de una señal en su espectro de frecuencia. Por medio del análisis de la transformación de Fourier de la transformada de Fourier, una señal permite ser manejable con datos reales. Las ventajas que este análisis tiene entre otras cosas incluye el hecho de que cada fuente de sonido presenta su propia banda de frecuencia bajo la cual los defectos son manifestados claramente. Hoy en día se aplica mucho el análisis cepstral para el reconocimiento de voz y permite un completo análisis de cada fuente sonora permitiendo determinar parámetros de cada una. Es un método que aunque es matemáticamente complejo, permite un fácil y completo análisis de cada sonido y su fuente. Permite una caracterización de una fuente o una forma. Como en esta investigación se busca caracterizar la forma de la envolvente del espectro de frecuencia, esta teoría resulta adecuada para ser aplicada.

## **Función de Transferencia**

Se denomina función de transferencia a una relación existente entre entrada y salida de un sistema. En términos generales, se puede establecer como el ratio entre la función de entrada a un sistema y la función de salida o viceversa. La función de transferencia determina implícitamente como un sistema dado modifica la señal de entrada para convertirla en la señal a la salida. Es por esto que la función de transferencia describe de forma completa el comportamiento de un circuito; la forma en la que este procesa la señal de entrada. Es más, hoy en día muchos circuitos son diseñados a partir de su función de transferencia para lograr los resultados deseados.

Debido a que las funciones de transferencia son funciones complejas, y dependen de la frecuencia, estas en su mayoría se pueden separar en dos partes; magnitud y fase.

En el caso particular de esta investigación, la función de transferencia es lo que determina el funcionamiento del sistema en sí. La función de transferencia que se haya es la que determina lo que se pretende en el circuito, que es crear a partir de una señal de entrada de una frecuencia fundamental y sus frecuencias armónicas con la misma energía para todas sus partes, vocales como son producidas en español por voces masculinas. La función de transferencia de esta investigación es la relación entre la entrada y la salida así:

$$H(j\omega) = \frac{\text{Señal}_{\text{entrada}}}{\text{Señal}_{\text{salida}}}$$

Una función de transferencia adicionalmente permite computar la respuesta en frecuencia del sistema o circuito para frecuencias positivas y negativas.

## **Sistema**

Un sistema es un conjunto de entidades que bien pueden ser reales o abstractas que se unen en un todo y cumplen una función en particular. Cada elemento está relacionado o interactúa con al menos otro componente para lograr dicho objetivo.

En esta investigación, el sistema es el conjunto de elementos ya sean acústicos o eléctricos que están definidos por una función de transferencia que define su funcionamiento. El sistema originalmente se deduce matemáticamente y luego pasa a ser un circuito. Cada vocal tiene su función de transferencia y por esto todos los sistemas incluidos en este proyecto, uno por cada vocal, independientemente de sus componentes, reflejan esa función de transferencia.

### Señal de entrada

La señal de entrada es aquello que se busca modificar por medio de un sistema. Es lo que se asume antes de que el sistema comience a funcionar. En el caso particular de este proyecto de grado, la señal de entrada que se asume es una señal audible con todas sus frecuencias armónicas y fundamentales con el mismo nivel de energía. Es muy difícil tratar de medir la señal real de aire que llega de la traquea al aparato fonador, por eso, al sólo conocer la señal de salida (vocales) se asume dicha señal de entrada. La señal de entrada se ve como en la figura 2.2.

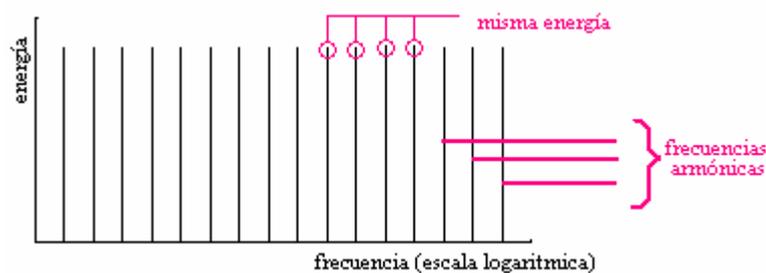


Figura 2.2 Señal de entrada del sistema

### Señal de salida

La señal de salida es el resultado que se espera en un sistema determinado dada una señal de entrada. La señal de salida en este proyecto es conocida y se puede determinar auditivamente. Esta corresponde a una señal de una vocal como es producida por hombres en español.

## Diagrama de bloques

Un diagrama de bloques es una representación pictórica de un sistema en el que se ilustra la relación existente entre componentes. Resulta de gran ayuda en la creación de sistemas ya que identifica todos los elementos en una fase inicial y ayuda a asegurar que el sistema contiene todo lo necesario para su lograr su objetivo. Este ayuda a identificar la entrada y salida del sistema, relacionar componentes dentro del mismo, establecer partes críticas, identificar redundancias y establecer límites.

Debido a que lo que esta investigación pretende es la creación de un sistema en la forma de un circuito (ya sea acústico o eléctrico), un diagrama de bloques es necesario para visualizar el proceso de conversión de la señal de entrada a la vocal determinada.

## 2.3 MARCO TEÓRICO

### Funcionamiento del aparato fonador

El funcionamiento del aparato fonador comienza con la laringe. Este aparato consiste de varios cartílagos y músculos que hacen posible la vibración de las cuerdas vocales. La estructura cartilaginosa de la laringe se compone de tres grandes cartílagos que son el cartílago tiroideo, el cartílago cricoides y la epiglotis. (Ver figuras 2.1 y 2.3) El cartílago tiroideo es aquel que conocemos como manzana de Adán. Este cartílago en sus extremos, está conectado de tal forma que siempre mantiene la laringe abierta. El cartílago cricoides sigue después del primer anillo de la traquea, y en sus extremidades tiene aritenoides. Finalmente la epiglotis es un cartílago que se desplaza para permitir la degulsión ubicado delante del cartílago tiroides.

Los órganos móviles más importantes de la laringe son los aritenoides. Estos se apartan o se acercan deslizándose por la superficie cricoides (del cartílago cricoides)

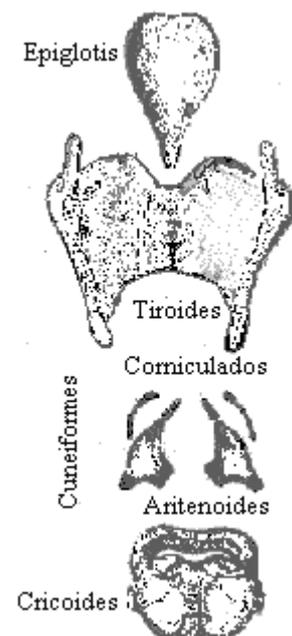


Figura 2.3 Órganos fibrocartilagosos que componen la laringe

El tubo interior de la laringe está dividido por las cuerdas vocales verdaderas y las cuerdas vocales falsas. Las cuerdas vocales verdaderas están compuestas por el músculo vocal y el ligamento vocal. Van desde los cartílagos aritenoides hasta el ángulo de tiroideos. Estas cuerdas están ligadas a las aritenoides para permitir su movimiento. (Ver figura 2.3). Cuando la laringe deja pasar el aire sin emitir sonido alguno, la posición de las cuerdas vocales es separada una de la otra, en forma triangular, y alineadas con los aritenoides. Cuando las cuerdas vocales se juntan, comienza la vibración de estas como resultado del aire que sale por expiración.

Las cuerdas vocales falsas van desde la epiglotis hasta el ángulo del cartílago tiroideos (manzana de Adán). Estas cuerdas reducen el diámetro de la glotis, que es la abertura en la que la laringe y la faringe se unen, durante el proceso de deglución. Estas se encuentran localizadas encima de las cuerdas vocales verdaderas.

Para que el sonido se emita por medio de la laringe, es necesario que el aire salga de los pulmones y que las cuerdas vocales entren en contacto una con la otra. El tono se manipula voluntariamente por medio de movimientos de los cartílagos aritenoides. Las diferencias entre tonos altos y bajos se dan por una variación en el área de contacto de las cuerdas vocales.

Para generar frecuencias bajas, el área de contacto es grande. El aire entra por abajo y va abriendo paso por el cierre de la cuerda que empieza a vibrar con el contacto del aire. Después, las cuerdas continúan con su movimiento vibratorio alejadas una de la otra. Finalmente las cuerdas se van cerrando de abajo hacia arriba hasta que cesa la vibración.

Por otro lado, para emitir frecuencias altas, el área de contacto entre cuerdas vocales es mucho menos y constituye la parte superior del área generalmente utilizada por las frecuencias más bajas. El aire pasa y las cuerdas se separan aún más.

### **La fonación**

El proceso de fonación humana, comienza cuando la glotis, que es el espacio que existe entre cuerdas vocales, se cierra al paso del aire. Los pulmones envían un flujo de aire con presión cada vez mayor. A esta presión se le denomina presión subglótica. Esta

presión genera que las cuerdas vocales, que se encuentran juntas, generen mayor cierre. La presión del aire aumenta hasta que el aire puede pasar por en medio de las cuerdas, generando que estas vibren. Una vez el primer flujo de aire pasa, se genera una succión que cierra nuevamente las cuerdas vocales. El aire entonces vuelve a pasar abriendo las cuerdas nuevamente. Este proceso repetitivo, genera golpes de aire que son los que determinan la frecuencia fundamental de cada voz. Esta frecuencia también depende en gran parte del tamaño de la laringe, y es por eso que las voces masculinas tienen una frecuencia más grave que la de las voces femeninas (la laringe femenina es mucho menor en tamaño que la masculina). La tensión generada por las cuerdas vocales también depende de la frecuencia fundamental.

Johannes Müller (1848), realizó algunos experimentos con laringes de cadáveres en los que extraía la laringe y enviaba un flujo de aire a través de y descubrió que el sonido que provenía de la laringe era diferente al producido por la voz humana. Para producir dicho sonido, era necesario agregarle a la laringe un tubo igual en tamaño y forma al tubo que lleva el flujo de aire de la laringe hasta los labios.

### **Primeros acercamientos para modelar el aparato fonador**

A partir de los experimentos de Müller, surgió la idea de que las cavidades vacías del cuerpo humano (resonadores) modificaban la frecuencia de la voz como un filtro. Entonces el sonido producido por la laringe, se modifica en estas cavidades como la nariz, boca, frente y pómulos.

La forma en la que dichos resonadores modifican la voz es como se muestra en el gráfico. Aquí se puede observar que la frecuencia fundamental con sus armónicos es modificada por una función de transferencia determinada. La gráfica resultante, es muy similar a la gráfica que según Saltzman, Tuller y Kelso generan las vocales producidas por los humanos. La primera gráfica, simularía la voz masculina producida desde la laringe, la segunda sería la frecuencia que por tamaño de la boca y nariz, va a ser emitida y la tercera grafica muestra la producción de la vocal. Es importante recalcar que la boca y la laringe pueden variar su volumen cambiando así la frecuencia a emitir.

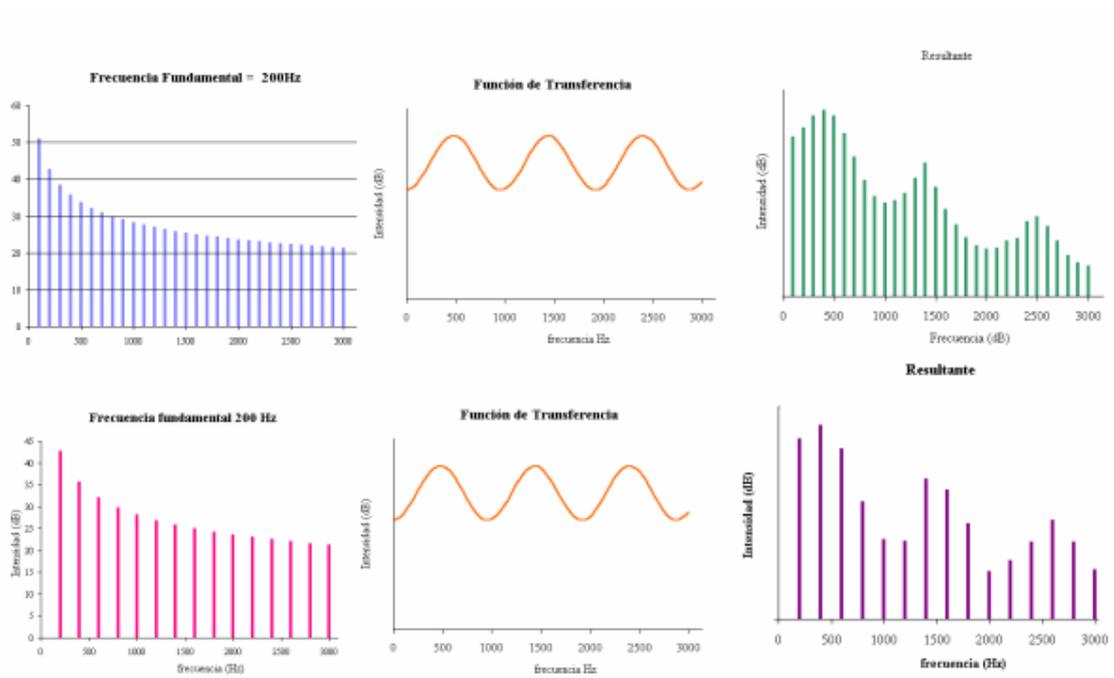


Figura 2.3 Modelo teórico del funcionamiento de la voz para dos frecuencias a) 100 Hz y b) 200 Hz

De esa capacidad de los órganos en el tracto vocal, es que se genera la gran variedad de frecuencias que pueden ser emitidas por los seres humanos.

El filtro que modifica la voz, es un filtro acústico que varía en el tiempo y se denomina el tracto vocal supralaringeo. Este filtro consiste en la boca y la nariz, principalmente. Todo el tracto vocal, que funciona como un sistema resonador acústico combinado con las pérdidas debidas a la radiación de los labios, determina la forma detallada de la función de transferencia del filtro.

### Otros modelo por medio de síntesis de la voz humana

Debido a la gran facilidad que tienen los órganos del tracto vocal para moverse o para modificar su tamaño, Pratt genero una interfase gráfica en la que se varían los siguientes parámetros:

Interaritenoides (glotis): Variable que modifica el ancho del cierre glótico (espacio entre las cuerdas vocales)

Cricoaritenoides (glotis): Tensión de los pliegues vocales.

Levator Palatini (velo): Puerto velo-faríngeo hacia las cavidades nasales.

Genioglossus (lengua): mueve la lengua hacia el hueso de la mandíbula o hacia el frente del paladar superior.

Styloglossus (lengua): Mueve la lengua hacia atrás y hacia arriba

Hyoglossus (lengua): Mueve la lengua hacia atrás y hacia abajo

Mylohyoide (boca): Controla la apertura o cierre de la mandíbula.

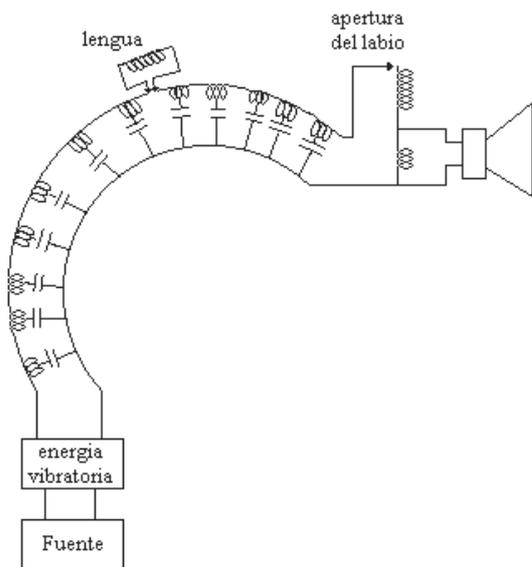


Figura 2.5 Esquema electrónico de H. K. Dunn modelando la vocal u humana

Masseter (boca): Controla el movimiento hacia arriba o abajo de la mandíbula.

ObicularisOris (boca): Músculo de la boca que hace la salida de aire más redonda u ovalada.

Pulmones: Controla la cantidad de aire que entra al sistema.

Cambiando los valores de estos parámetros, el programa arroja sonidos aparentemente producidos. Para acceder a este programa, es necesario tener conocimientos de programación en c, ya que es por medio de este código que es posible cambiar dichos parámetros.

En 1955 ya existían modelos eléctricos para el aparato fonador. H. K. Dunn creó un modelo haciendo una analogía. En este modelo, un fuente de energía vibratoria reemplaza las cuerdas vocales y una línea eléctrica llena de secciones de filtros pasa bajos reemplaza el paso del aire. Para la lengua, una bobina, ya que puede variar su inductancia de acuerdo con el grado de apertura. Desafortunadamente, este modelo no presenta valores tangibles de inductores o capacitores. En el extremo este modelo presenta otra bobina que varía de acuerdo a la apertura de los labios. La figura muestra el esquema del circuito que modela la u del tracto vocal.

### La Laringe Artificial

La laringe artificial es un dispositivo que busca reemplazar la laringe en caso de larinsectomía (proceso mediante el cual se extrae la laringe especialmente debido a

cáncer de laringe). Puede ser interna o externa. Una laringe artificial electrónica utiliza una batería que alimenta un circuito eléctrico que genera un tono vibratorio. El tono está diseñado para tener un rango de frecuencias cercano al rango humano promedio y se ajusta a preferencia del usuario. La laringe artificial interna se inserta en la parte inferior del cartílago tiroideo y genera vibración hacia la cavidad vacía en donde se encontraría la laringe. Desafortunadamente este tipo de dispositivo es muy costoso en el mercado y es por eso que no es muy popular. La laringe artificial intra-oral introduce el sonido directamente en la boca, ya sea a través de un tubo pequeño conectado a una laringe externa, o por medio del plato superior.

Generalmente este dispositivo genera interferencia con la articulación, y la saliva puede dañar el mecanismo. La laringe artificial externa es un dispositivo que vibra en una frecuencia que se puede modificar con una perilla. La extra oral tiene una cabeza vibratoria que se empuja hacia los tejidos del cuello para transferir la energía a la garganta, por donde entra a la cavidad oral. Sin embargo, las frecuencias a las que este dispositivo vibra son muy limitadas. Este dispositivo se coloca justo en la parte superior del cartílago tiroideo. La persona procede a hablar, y los músculos del cuerpo se contraen para generar el habla y es la laringe artificial quien le da esa frecuencia fundamental al proceso de fonación.

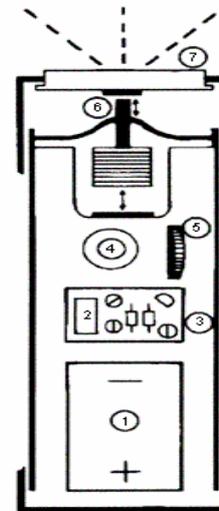


Figura 2.6 esquema de una laringe artificial, 1) batería, 2) circuito temporizador, 3) control de tonos, 4) Switch de encendido y apagado, 5) Volumen. 6) transductor electro-magnético, 7) membrana rígida.

### **3. METODOLOGÍA**

#### **3.1 ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN.**

Esta investigación es empírico-analítica. Debido a que esta investigación busca modelar un sistema humano por medios físicos y analiza la forma en la que el sistema fonador del ser humano funciona para aplicar este conocimiento en un dispositivo físico tangible, es considerada empírico-analítica. Además, buscará transformar a largo plazo, los modelos de voces utilizados hoy en día para las comunicaciones.

#### **3.2 LÍNEA DE INVESTIGACIÓN DE USB / SUB-LÍNEA DE FACULTAD / CAMPO TEMÁTICO DEL PROGRAMA**

Acústica. Este proyecto de investigación pretende analizar un sistema humano, cuantificarlo y modelarlo físicamente. Estos pasos y fines son los que la línea de acústica aplica.

#### **3.3 TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN**

Para alcanzar los objetivos específicos, se van a identificar los parámetros más relevantes a tener en cuenta para el análisis de la voz como pueden ser la forma de onda o el espectro de frecuencias. Se recolectará selectivamente información acerca del funcionamiento del aparato fonador para así tener las bases suficientes para poder analizarlo.

Por otro lado se recolectará muestras de audio de las vocales en español a, e, i, o, y u de varias voces masculinas, independientemente que estas sean generadas por un ser humano o por un emulador ya existente. Tomando en cuenta edad, y, si es posible, el estado físico de su aparato fonador. Se comparará las formas de onda y las frecuencias armónicas junto con la cantidad de energía empleada y descartará las pistas que presenten anomalías. Se va a tratar de buscar un patrón de todas las pistas y buscar emularlas mediante síntesis aditiva. Si esto da resultado, se continuará con la segunda parte.

En la segunda parte de la investigación se buscará analizar el aparato fonador como si este fuera un circuito eléctrico y se tratará de que este arroje los mismos resultados del análisis de voces previamente hecho, en primera instancia por medio de un software especializado para modelar circuitos eléctricos y finalmente físicamente. De lograrse este paso, sólo faltaría la parte final del proyecto.

En esta última parte, se busca realizar una analogía con ese circuito eléctrico a un sistema mecano-acústico. Para evitar desperdicio de recursos, se modelará en un software que simule circuitos mecánicos.

### **3.4 POBLACIÓN Y MUESTRA**

Debido a que es necesario tomar una población para realizar las muestras de audio de las vocales masculinas para poder establecer los patrones de sus espectros vocales, y debido a la falta de un médico experto que permita evaluar el estado de cada uno de los aparatos fonadores, la población se va a reducir a voces masculinas jóvenes sin problemas físicos emuladas por un sistema existente. El software elegido es el VTCALCS, que es un sistema que permite variar 8 parámetros de la voz y presenta un modelo presentado por Merlmelstein y aprobado hace más de 10 años.

### **3.5 HIPÓTESIS**

La creación de un modelo para el aparato fonador que reproduzca vocales en español, es un proyecto mediante el cual se va a poder cambiar la forma en la que las comunicaciones funcionan y va a representar un primer paso para la creación de un reemplazo tangible para la laringe de los pacientes larinsectomizados quienes pierden el habla.

### **3.6 VARIABLES**

#### **3.6.1 VARIABLES DEPENDIENTES**

- Voces masculinas seleccionadas para ser analizadas
- Ventaneo de FFT para análisis
- Programa para emular las vocales por síntesis aditiva
- Programa para emular el circuito eléctrico
- Programa para emular el circuito mecánico

#### **3.6.2 VARIABLES INDEPENDIENTES**

- Materiales para la construcción del dispositivo acústico
- Tipo de grabación

#### 4. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Este proyecto buscaba modelar un circuito acústico mediante el cual se pudiera modelar el tracto vocal para producir vocales tal y como son producidas por hombres en español. Dicho modelo parte del proceso presentado en la gráfica 4.1 en la que se muestra lo que la función de transferencia del tracto vocal, debe hacer.

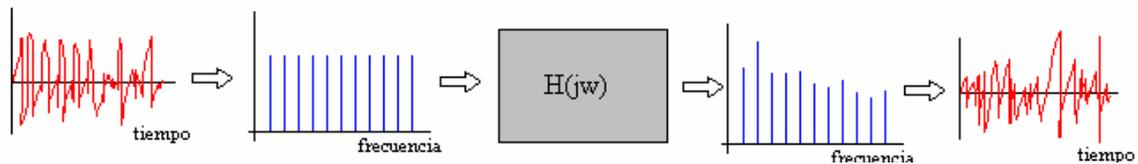


Figura 4.1 Proceso por el cual debe pasar una señal para convertirse en una vocal, con el modelo numérico que esta tesis plantea.

Esta función de transferencia y su correcto funcionamiento es quien determina la

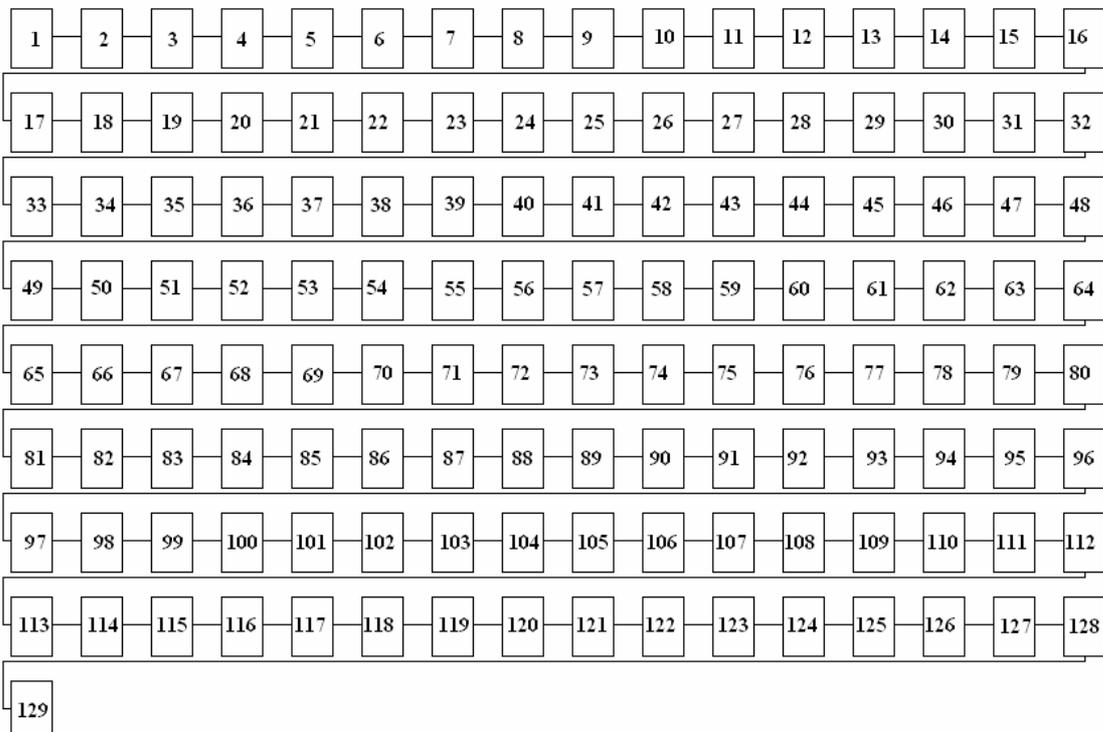


Figura 4.2 Diagrama de Bloque del modelo acústico/eléctrico del aparato fonador que plantea esta investigación

efectividad o inefectividad de este modelo. Electrónica y Acústicamente, el modelo se planteó como una cadena de pequeños circuitos sumados en serie como se puede ver en la figura 4.2

Cada una de estos pequeños bloques es a su vez un circuito ya bien sea acústico, o eléctrico. Cada uno corresponde a los números obtenidos a través de la programación en MATLAB de la función de transferencia según la teoría del multi-cuadro presentada por Yoshi Shiga (2005), según la ecuación:

$$H(j\Omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_a[n] \cos n\Omega$$

Los resultados para cada coeficiente  $c_a$  varían en cada vocal. Estos son los resultados de los 129 coeficientes que modelan cada una una vocal.

ca					
a	A	E	I	O	U
1	-5.356	-14,086	-8,119	-21,403	-8,213
2	2,724	1,684	0,887	2,368	3,595
3	2,638	1,668	0,841	2,373	3,445
4	2,502	1,631	0,775	2,374	3,213
5	2,324	1,564	0,705	2,359	2,922
6	2,112	1,457	0,646	2,313	2,598
7	1,874	1,306	0,611	2,221	2,266
8	1,618	1,113	0,606	2,069	1,945
9	1,349	0,892	0,632	1,851	1,648
10	1,07	0,659	0,681	1,568	1,378
11	0,788	0,439	0,741	1,23	1,137
12	-0,512	0,255	0,798	0,86	0,922
13	-0,248	0,128	0,84	0,491	0,731
14	-0,016	0,068	0,859	0,159	0,565
15	-0,173	0,077	0,851	-0,103	0,425
16	-0,305	0,146	0,821	-0,268	0,316
17	-0,372	0,259	0,775	-0,327	-0,242
18	-0,376	-0,392	0,722	-0,286	0,199
19	-0,325	0,519	0,672	-0,171	0,184
20	-0,239	0,619	0,627	-0,02	0,185
21	-0,141	0,675	0,588	0,12	0,186
22	-0,057	0,679	0,551	0,208	0,172
23	-0,01	0,63	0,509	0,213	0,131
24	-0,014	0,534	0,453	0,124	0,057

ca					
a	A	E	I	O	U
65	0,1	-0,081	-0,061	-0,189	-0,372
66	0,059	-0,071	-0,15	-0,241	-0,376
67	0,021	-0,064	-0,224	-0,251	-0,345
68	-0,004	-0,053	-0,274	-0,222	-0,283
69	-0,009	-0,031	-0,292	-0,165	-0,201
70	0,009	0,005	-0,28	-0,096	-0,115
71	0,049	0,055	-0,243	-0,03	-0,041
72	0,105	0,112	-0,192	0,021	0,006
73	0,17	0,169	-0,138	0,051	0,018
74	0,232	0,014	-0,092	0,062	-0,005
75	0,28	0,236	-0,059	0,061	-0,054
76	0,306	0,23	-0,043	0,057	-0,116
77	0,304	0,196	-0,041	0,061	-0,175
78	0,273	0,14	-0,047	0,08	-0,217
79	0,218	0,07	-0,056	0,112	-0,231
80	0,146	0,001	-0,063	0,155	-0,216
81	0,068	-0,055	-0,063	-0,198	-0,175
82	-0,008	0,014	-0,058	-0,23	-0,116
83	-0,071	-0,094	-0,051	-0,243	-0,053
84	-0,117	-0,073	-0,046	0,23	0,002
85	-0,144	-0,031	-0,05	0,192	0,042
86	-0,154	-0,021	-0,064	0,134	0,063
87	-0,152	0,072	-0,09	0,068	0,065
88	-0,144	0,113	-0,125	0,005	0,054

25	-0,073	0,404	0,379	-0,049	-0,047
26	-0,177	0,257	0,287	-0,276	-0,165
27	-0,306	0,107	0,182	-0,513	-0,277
28	-0,432	-0,029	0,074	-0,714	-0,359
29	-0,528	-0,14	-0,025	-0,839	-0,391
30	-0,57	-0,218	-0,1	-0,864	-0,359
31	-0,544	-0,259	-0,143	-0,786	-0,263
32	-0,451	-0,266	-0,147	-0,62	-0,117
33	-0,302	-0,243	-0,115	-0,401	0,058
34	-0,121	-0,2	-0,054	-0,17	0,23
35	0,065	-0,147	0,022	0,031	0,37
36	0,225	-0,096	0,098	0,173	0,453
37	0,338	-0,059	0,162	0,24	0,468
38	0,389	-0,043	0,203	0,236	0,417
39	0,375	-0,052	0,217	0,18	0,313
40	0,306	-0,086	0,205	0,099	0,182
41	0,199	-0,137	0,174	0,022	0,053
42	0,075	-0,196	0,132	-0,029	-0,051
43	-0,044	-0,25	0,087	-0,044	-0,109
44	-0,141	0,037	0,047	-0,024	-0,117
45	-0,206	-0,294	0,014	-0,015	-0,08
46	-0,237	-0,27	0,014	-0,054	-0,014
47	-0,24	-0,216	0,038	0,073	0,063
48	-0,222	-0,141	0,066	0,061	0,128
49	-0,196	0,037	-0,098	0,013	0,168
50	-0,169	0,022	-0,137	-0,06	0,175
51	-0,149	0,08	-0,178	-0,14	0,151
52	0,136	0,108	-0,215	-0,206	-0,105
53	0,129	0,102	-0,238	-0,238	-0,051
54	0,121	0,065	-0,241	-0,225	-0,001
55	0,107	0,007	-0,217	-0,167	-0,036
56	-0,082	-0,06	-0,167	-0,074	0,057
57	-0,046	-0,123	-0,096	0,033	0,065
58	0,236	-0,17	-0,015	0,13	0,071
59	0,051	-0,195	0,062	0,194	-0,083
60	0,098	-0,197	0,121	0,211	-0,11
61	0,135	-0,18	0,15	0,177	-0,154
62	0,154	-0,153	0,142	0,101	-0,214
63	0,154	-0,123	0,099	0,349	-0,279
64	0,134	-0,098	0,027	-0,104	-0,336

89	-0,137	0,139	-0,162	-0,042	0,039
90	-0,134	0,147	-0,195	-0,066	0,026
91	-0,137	0,14	-0,216	-0,062	0,021
92	-0,144	0,125	-0,219	0,331	0,022
93	-0,153	0,109	-0,202	0,01	0,028
94	-0,157	0,097	-0,167	0,059	0,033
95	-0,153	0,093	-0,119	0,103	0,03
96	-0,14	0,097	-0,067	0,132	0,015
97	-0,117	0,107	-0,018	0,139	-0,013
98	-0,088	0,118	0,018	0,123	-0,051
99	-0,058	0,123	0,039	0,045	-0,093
100	-0,034	0,121	0,041	0,041	-0,129
101	-0,02	0,108	0,027	-0,014	-0,152
102	-0,019	0,086	0,002	-0,063	-0,153
103	-0,031	0,059	-0,027	-0,104	-0,133
104	-0,053	0,033	-0,055	0,014	-0,094
105	-0,077	0,012	-0,077	0,014	-0,043
106	-0,099	0,001	-0,09	0,014	0,006
107	-0,11	0,002	-0,095	-0,152	0,045
108	-0,107	0,013	-0,094	-0,148	0,064
109	-0,088	0,03	-0,089	-0,148	0,058
110	-0,057	0,049	-0,084	-0,152	0,029
111	-0,017	0,064	-0,081	-0,158	-0,017
112	0,025	0,071	-0,08	-0,162	-0,069
113	0,061	0,067	-0,079	-0,161	-0,116
114	0,088	0,053	-0,075	-0,15	-0,146
115	0,1	0,037	-0,064	-0,127	-0,155
116	0,099	0,007	-0,046	-0,091	-0,14
117	0,086	-0,015	-0,018	-0,047	-0,106
118	0,064	-0,029	0,015	-0,154	-0,06
119	0,037	0,032	0,05	0,041	-0,013
120	0,008	0,037	0,081	0,068	0,026
121	-0,02	0,001	0,115	0,075	0,051
122	-0,045	0,028	0,103	0,06	0,06
123	-0,066	-0,058	0,087	0,025	-0,059
124	-0,081	-0,081	-0,052	-0,022	-0,054
125	-0,085	-0,09	-0,004	-0,067	-0,056
126	-0,073	0,077	-0,049	-0,152	0,079
127	-0,039	0,037	-0,095	-0,095	0,13
128	0,025	0,037	-0,123	-0,048	0,216
129	0,125	0,137	-0,12	0,051	0,337

Tabla 4.1 Resultados de los coeficientes ca para cada vocal.

El circuito resultante empieza como se ve en la figura 4.3

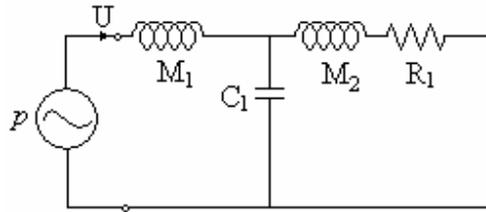


Figura 4.3, primer cuadro del circuito eléctrico análogo del aparato fonador

y sus valores numéricos son:

	<i>A</i>	<i>E</i>	<i>I</i>	<i>O</i>	<i>U</i>
$M_1 =$	0.553 H				
$M_2 =$	0.553 H				
$C_1 =$	1.398 F	1.399 F	1.398 F	1.399 F	1.397 F
$R_1 =$	13,54Ω	35,61Ω	20,53Ω	54,11Ω	20,76Ω
$p =$	-1 cos(t)				

**Tabla 4.2** Valores según la vocal de los primeros componentes en el circuito análogo eléctrico del aparato fonador

Su analogía acústica tipo impedancia se ve así:

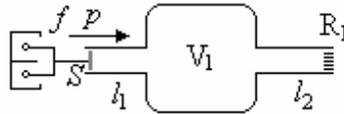


Figura 4.4 analogía tipo impedancia del circuito del primer cuadro del aparato fonador y por consiguiente, modelo del aparato fonador en la entrada

Sus valores son consecuentemente,

	<i>A</i>	<i>E</i>	<i>I</i>	<i>O</i>	<i>U</i>
$l_1 =$	0.01 m	0.01 m	0.01 m	0.01 m	0.01 m
$l_2 =$	0.01 m	0.01 m	0.01 m	0.01 m	0.01 m
$V =$	$10^{-5} \text{ m}^3$	$10^{-5} \text{ m}^3$	$10^{-5} \text{ m}^3$	$10^{-5} \text{ m}^3$	$10^{-5} \text{ m}^3$
$R_1 =$	13,54 Ns/m <sup>5</sup>	35,61 Ns/m <sup>5</sup>	20,53 Ns/m <sup>5</sup>	54,11 Ns/m <sup>5</sup>	20,76 Ns/m <sup>5</sup>
$S =$	$((0.17)^2/2) \cdot \pi = 0.0226 \text{ m}^2$	0.0226 m <sup>2</sup>	0.0226 m <sup>2</sup>	0.0226 m <sup>2</sup>	0.0226 m <sup>2</sup>
$f =$	$p \cdot S = 0.0226 \cos(t)$	0.0226 cos(t)	0.0226 cos(t)	0.0226 cos(t)	0.0226 cos(t)

**Tabla 4.3** Valores según la vocal de los primeros componentes en el circuito análogo acústico tipo movilidad del aparato fonador

El resto del circuito se compone de partes similares y lo único que varía son los valores de resistencias el modelo del segundo componente del circuito es:

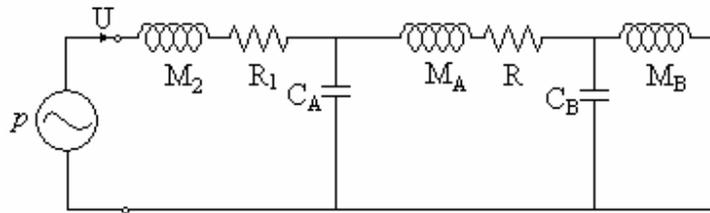


Figura 4.5 Modelo eléctrico del aparato fonador, sumados el primer circuito y estos 128 restantes, se producen las vocales como predice el modelo de Yoshinori Shiga

Los componentes que realmente varían a lo largo de este circuito y sus 128 partes son los valores de las resistencias la fuente y los valores de condensadores aunque el cambio en este último es tan pequeño que puede considerarse despreciable. Para obtener estos valores es necesario basarse en los valores obtenidos de ca para cada una de las vocales y por medio de una modificación de parámetros sencilla se obtienen los siguientes valores:

C #	R	R1
2	4,59	2,30
3	4,45	2,22
4	4,22	2,11
5	3,92	1,96
6	3,56	1,78
7	3,16	1,58
8	2,73	1,36
9	2,27	1,14
10	1,80	0,90
11	1,33	0,66
12	0,86	0,43
13	0,42	0,21
14	0,03	0,01
15	0,29	0,15
16	0,51	0,26
17	0,63	0,31
18	0,63	0,32
19	0,55	0,27

C #	R	R1
34	0,20	0,10
35	0,11	0,05
36	0,38	0,19
37	0,57	0,28
38	0,66	0,33
39	0,63	0,32
40	0,52	0,26
41	0,34	0,17
42	0,13	0,06
43	0,07	0,04
44	0,24	0,12
45	0,35	0,17
46	0,40	0,20
47	0,40	0,20
48	0,37	0,19
49	0,33	0,17
50	0,28	0,14
51	0,25	0,13

C #	R	R1
66	0,10	0,05
67	0,04	0,02
68	0,01	0,00
69	0,02	0,01
70	0,02	0,01
71	0,08	0,04
72	0,18	0,09
73	0,29	0,14
74	0,39	0,20
75	0,47	0,24
76	0,52	0,26
77	0,51	0,26
78	0,46	0,23
79	0,37	0,18
80	0,25	0,12
81	0,11	0,06
82	0,01	0,01
83	0,12	0,06

C #	R	R1
98	0,15	0,07
99	0,10	0,05
100	0,06	0,03
101	0,03	0,02
102	0,03	0,02
103	0,05	0,03
104	0,09	0,04
105	0,13	0,06
106	0,17	0,08
107	0,19	0,09
108	0,18	0,09
109	0,15	0,07
110	0,10	0,05
111	0,03	0,01
112	0,04	0,02
113	0,10	0,05
114	0,15	0,07
115	0,17	0,08

20	0,40	0,20	52	0,23	0,11	84	0,20	0,10	116	0,17	0,08
21	0,24	0,12	53	0,22	0,11	85	0,24	0,12	117	0,14	0,07
22	0,10	0,05	54	0,20	0,10	86	0,26	0,13	118	0,11	0,05
23	0,02	0,01	55	0,18	0,09	87	0,26	0,13	119	0,06	0,03
24	0,02	0,01	56	0,14	0,07	88	0,24	0,12	120	0,01	0,01
25	0,12	0,06	57	0,08	0,04	89	0,23	0,12	121	0,03	0,02
26	0,30	0,15	58	0,40	0,20	90	0,23	0,11	122	0,08	0,04
27	0,52	0,26	59	0,09	0,04	91	0,23	0,12	123	0,11	0,06
28	0,73	0,36	60	0,17	0,08	92	0,24	0,12	124	0,14	0,07
29	0,89	0,44	61	0,23	0,11	93	0,26	0,13	125	0,14	0,07
30	0,96	0,48	62	0,26	0,13	94	0,26	0,13	126	0,12	0,06
31	0,92	0,46	63	0,26	0,13	95	0,26	0,13	127	0,07	0,03
32	0,76	0,38	64	0,23	0,11	96	0,24	0,12	128	0,04	0,02
33	0,51	0,25	65	0,17	0,08	97	0,20	0,10	129	0,21	0,11

Tabla 4.4 Valores de los componentes que varían de una parte a otra del circuito eléctrico del aparato fonador de la vocal A

C #	R	R1
2	2,84	1,42
3	2,81	1,41
4	2,75	1,37
5	2,64	1,32
6	2,46	1,23
7	2,20	1,10
8	1,88	0,94
9	1,50	0,75
10	1,11	0,56
11	0,74	0,37
12	0,43	0,21
13	0,22	0,11
14	0,11	0,06
15	0,13	0,06
16	0,25	0,12
17	0,44	0,22
18	0,66	0,33
19	0,87	0,44
20	1,04	0,52
21	1,14	0,57
22	1,14	0,57
23	1,06	0,53
24	0,90	0,45

C #	R	R1
34	0,34	0,17
35	0,25	0,12
36	0,16	0,08
37	0,10	0,05
38	0,07	0,04
39	0,09	0,04
40	0,14	0,07
41	0,23	0,12
42	0,33	0,17
43	0,42	0,21
44	0,06	0,03
45	0,50	0,25
46	0,46	0,23
47	0,36	0,18
48	0,24	0,12
49	0,06	0,03
50	0,04	0,02
51	0,13	0,07
52	0,18	0,09
53	0,17	0,09
54	0,11	0,05
55	0,01	0,01
56	0,10	0,05

C #	R	R1
66	0,12	0,06
67	0,11	0,05
68	0,09	0,04
69	0,05	0,03
70	0,01	0,00
71	0,09	0,05
72	0,19	0,09
73	0,28	0,14
74	0,02	0,01
75	0,40	0,20
76	0,39	0,19
77	0,33	0,17
78	0,24	0,12
79	0,12	0,06
80	0,00	0,00
81	0,09	0,05
82	0,02	0,01
83	0,16	0,08
84	0,12	0,06
85	0,05	0,03
86	0,04	0,02
87	0,12	0,06
88	0,19	0,10

C #	R	R1
98	0,20	0,10
99	0,21	0,10
100	0,20	0,10
101	0,18	0,09
102	0,14	0,07
103	0,10	0,05
104	0,06	0,03
105	0,02	0,01
106	0,00	0,00
107	0,00	0,00
108	0,02	0,01
109	0,05	0,03
110	0,08	0,04
111	0,11	0,05
112	0,12	0,06
113	0,11	0,06
114	0,09	0,04
115	0,06	0,03
116	0,01	0,01
117	0,03	0,01
118	0,05	0,02
119	0,05	0,03
120	0,06	0,03

25	0,68	0,34	57	0,21	0,10	89	0,23	0,12	121	0,00	0,00
26	0,43	0,22	58	0,29	0,14	90	0,25	0,12	122	0,05	0,02
27	0,18	0,09	59	0,33	0,16	91	0,24	0,12	123	0,10	0,05
28	0,05	0,02	60	0,33	0,17	92	0,21	0,11	124	0,14	0,07
29	0,24	0,12	61	0,30	0,15	93	0,18	0,09	125	0,15	0,08
30	0,37	0,18	62	0,26	0,13	94	0,16	0,08	126	0,13	0,06
31	0,44	0,22	63	0,21	0,10	95	0,16	0,08	127	0,06	0,03
32	0,45	0,22	64	0,17	0,08	96	0,16	0,08	128	0,06	0,03
33	0,41	0,20	65	0,14	0,07	97	0,18	0,09	129	0,23	0,12

Tabla 4.5 Valores de los componentes que varían de una parte a otra del circuito eléctrico del aparato fonador de la vocal E

C #	R	R1
2	1,49	0,75
3	1,42	0,71
4	1,31	0,65
5	1,19	0,59
6	1,09	0,54
7	1,03	0,51
8	1,02	0,51
9	1,07	0,53
10	1,15	0,57
11	1,25	0,62
12	1,34	0,67
13	1,42	0,71
14	1,45	0,72
15	1,43	0,72
16	1,38	0,69
17	1,31	0,65
18	1,22	0,61
19	1,13	0,57
20	1,06	0,53
21	0,99	0,50
22	0,93	0,46
23	0,86	0,43
24	0,76	0,38
25	0,64	0,32
26	0,48	0,24
27	0,31	0,15
28	0,12	0,06
29	0,04	0,02
30	0,17	0,08
31	0,24	0,12

C #	R	R1
34	0,09	0,05
35	0,04	0,02
36	0,17	0,08
37	0,27	0,14
38	0,34	0,17
39	0,37	0,18
40	0,35	0,17
41	0,29	0,15
42	0,22	0,11
43	0,15	0,07
44	0,08	0,04
45	0,02	0,01
46	0,02	0,01
47	0,06	0,03
48	0,11	0,06
49	0,17	0,08
50	0,23	0,12
51	0,30	0,15
52	0,36	0,18
53	0,40	0,20
54	0,41	0,20
55	0,37	0,18
56	0,28	0,14
57	0,16	0,08
58	0,03	0,01
59	0,10	0,05
60	0,20	0,10
61	0,25	0,13
62	0,24	0,12
63	0,17	0,08

C #	R	R1
66	0,25	0,13
67	0,38	0,19
68	0,46	0,23
69	0,49	0,25
70	0,47	0,24
71	0,41	0,20
72	0,32	0,16
73	0,23	0,12
74	0,16	0,08
75	0,10	0,05
76	0,07	0,04
77	0,07	0,03
78	0,08	0,04
79	0,09	0,05
80	0,11	0,05
81	0,11	0,05
82	0,10	0,05
83	0,09	0,04
84	0,08	0,04
85	0,08	0,04
86	0,11	0,05
87	0,15	0,08
88	0,21	0,11
89	0,27	0,14
90	0,33	0,16
91	0,36	0,18
92	0,37	0,18
93	0,34	0,17
94	0,28	0,14
95	0,20	0,10

C #	R	R1
98	0,03	0,02
99	0,07	0,03
100	0,07	0,03
101	0,05	0,02
102	0,00	0,00
103	0,05	0,02
104	0,09	0,05
105	0,13	0,06
106	0,15	0,08
107	0,16	0,08
108	0,16	0,08
109	0,15	0,07
110	0,14	0,07
111	0,14	0,07
112	0,13	0,07
113	0,13	0,07
114	0,13	0,06
115	0,11	0,05
116	0,08	0,04
117	0,03	0,02
118	0,03	0,01
119	0,08	0,04
120	0,14	0,07
121	0,19	0,10
122	0,17	0,09
123	0,15	0,07
124	0,09	0,04
125	0,01	0,00
126	0,08	0,04
127	0,16	0,08

<b>32</b>	0,25	0,12	<b>64</b>	0,05	0,02	<b>96</b>	0,11	0,06	<b>128</b>	0,21	0,10
<b>33</b>	0,19	0,10	<b>65</b>	0,10	0,05	<b>97</b>	0,03	0,02	<b>129</b>	0,20	0,10

Tabla 4.6 Valores de los componentes que varían de una parte a otra del circuito eléctrico del aparato fonador de la vocal I

C #	R	R1	C #	R	R1	C #	R	R1	C #	R	R1
<b>2</b>	3,99	2,00	<b>34</b>	0,29	0,14	<b>66</b>	0,41	0,20	<b>98</b>	0,21	0,10
<b>3</b>	4,00	2,00	<b>35</b>	0,05	0,03	<b>67</b>	0,42	0,21	<b>99</b>	0,08	0,04
<b>4</b>	4,00	2,00	<b>36</b>	0,29	0,15	<b>68</b>	0,37	0,19	<b>100</b>	0,07	0,03
<b>5</b>	3,98	1,99	<b>37</b>	0,40	0,20	<b>69</b>	0,28	0,14	<b>101</b>	0,02	0,01
<b>6</b>	3,90	1,95	<b>38</b>	0,40	0,20	<b>70</b>	0,16	0,08	<b>102</b>	0,11	0,05
<b>7</b>	3,74	1,87	<b>39</b>	0,30	0,15	<b>71</b>	0,05	0,03	<b>103</b>	0,18	0,09
<b>8</b>	3,49	1,74	<b>40</b>	0,17	0,08	<b>72</b>	0,04	0,02	<b>104</b>	0,02	0,01
<b>9</b>	3,12	1,56	<b>41</b>	0,04	0,02	<b>73</b>	0,09	0,04	<b>105</b>	0,02	0,01
<b>10</b>	2,64	1,32	<b>42</b>	0,05	0,02	<b>74</b>	0,10	0,05	<b>106</b>	0,02	0,01
<b>11</b>	2,07	1,04	<b>43</b>	0,07	0,04	<b>75</b>	0,10	0,05	<b>107</b>	0,26	0,13
<b>12</b>	1,45	0,72	<b>44</b>	0,04	0,02	<b>76</b>	0,10	0,05	<b>108</b>	0,25	0,12
<b>13</b>	0,83	0,41	<b>45</b>	0,03	0,01	<b>77</b>	0,10	0,05	<b>109</b>	0,25	0,12
<b>14</b>	0,27	0,13	<b>46</b>	0,09	0,05	<b>78</b>	0,13	0,07	<b>110</b>	0,26	0,13
<b>15</b>	0,17	0,09	<b>47</b>	0,12	0,06	<b>79</b>	0,19	0,09	<b>111</b>	0,27	0,13
<b>16</b>	0,45	0,23	<b>48</b>	0,10	0,05	<b>80</b>	0,26	0,13	<b>112</b>	0,27	0,14
<b>17</b>	0,55	0,28	<b>49</b>	0,02	0,01	<b>81</b>	0,33	0,17	<b>113</b>	0,27	0,14
<b>18</b>	0,48	0,24	<b>50</b>	0,10	0,05	<b>82</b>	0,39	0,19	<b>114</b>	0,25	0,13
<b>19</b>	0,29	0,14	<b>51</b>	0,24	0,12	<b>83</b>	0,41	0,20	<b>115</b>	0,21	0,11
<b>20</b>	0,03	0,02	<b>52</b>	0,35	0,17	<b>84</b>	0,39	0,19	<b>116</b>	0,15	0,08
<b>21</b>	0,20	0,10	<b>53</b>	0,40	0,20	<b>85</b>	0,32	0,16	<b>117</b>	0,08	0,04
<b>22</b>	0,35	0,18	<b>54</b>	0,38	0,19	<b>86</b>	0,23	0,11	<b>118</b>	0,26	0,13
<b>23</b>	0,36	0,18	<b>55</b>	0,28	0,14	<b>87</b>	0,11	0,06	<b>119</b>	0,07	0,03
<b>24</b>	0,21	0,10	<b>56</b>	0,12	0,06	<b>88</b>	0,01	0,00	<b>120</b>	0,11	0,06
<b>25</b>	0,08	0,04	<b>57</b>	0,06	0,03	<b>89</b>	0,07	0,04	<b>121</b>	0,13	0,06
<b>26</b>	0,47	0,23	<b>58</b>	0,22	0,11	<b>90</b>	0,11	0,06	<b>122</b>	0,10	0,05
<b>27</b>	0,86	0,43	<b>59</b>	0,33	0,16	<b>91</b>	0,10	0,05	<b>123</b>	0,04	0,02
<b>28</b>	1,20	0,60	<b>60</b>	0,36	0,18	<b>92</b>	0,01	0,02	<b>124</b>	0,04	0,02
<b>29</b>	1,41	0,71	<b>61</b>	0,30	0,15	<b>93</b>	0,02	0,01	<b>125</b>	0,11	0,06
<b>30</b>	1,46	0,73	<b>62</b>	0,17	0,09	<b>94</b>	0,10	0,05	<b>126</b>	0,26	0,13
<b>31</b>	1,32	0,66	<b>63</b>	0,59	0,29	<b>95</b>	0,17	0,09	<b>127</b>	0,16	0,08
<b>32</b>	1,04	0,52	<b>64</b>	0,18	0,09	<b>96</b>	0,22	0,11	<b>128</b>	0,08	0,04
<b>33</b>	0,68	0,34	<b>65</b>	0,32	0,16	<b>97</b>	0,23	0,12	<b>129</b>	0,09	0,04

Tabla 4.7 Valores de los componentes que varían de una parte a otra del circuito eléctrico del aparato fonador de la vocal O

C #	R	R1									
2	6,06	3,03	34	0,39	0,19	66	0,63	0,32	98	0,09	0,04
3	5,81	2,90	35	0,62	0,31	67	0,58	0,29	99	0,16	0,08
4	5,42	2,71	36	0,76	0,38	68	0,48	0,24	100	0,22	0,11
5	4,92	2,46	37	0,79	0,39	69	0,34	0,17	101	0,26	0,13
6	4,38	2,19	38	0,70	0,35	70	0,19	0,10	102	0,26	0,13
7	3,82	1,91	39	0,53	0,26	71	0,07	0,03	103	0,22	0,11
8	3,28	1,64	40	0,31	0,15	72	0,01	0,01	104	0,16	0,08
9	2,78	1,39	41	0,09	0,04	73	0,03	0,02	105	0,07	0,04
10	2,32	1,16	42	0,09	0,04	74	0,01	0,00	106	0,01	0,01
11	1,92	0,96	43	0,18	0,09	75	0,09	0,05	107	0,08	0,04
12	1,55	0,78	44	0,20	0,10	76	0,20	0,10	108	0,11	0,05
13	1,23	0,62	45	0,13	0,07	77	0,29	0,15	109	0,10	0,05
14	0,95	0,48	46	0,02	0,01	78	0,37	0,18	110	0,05	0,02
15	0,72	0,36	47	0,11	0,05	79	0,39	0,19	111	0,03	0,01
16	0,53	0,27	48	0,22	0,11	80	0,36	0,18	112	0,12	0,06
17	0,41	0,20	49	0,28	0,14	81	0,29	0,15	113	0,20	0,10
18	0,34	0,17	50	0,29	0,15	82	0,20	0,10	114	0,25	0,12
19	0,31	0,16	51	0,25	0,13	83	0,09	0,04	115	0,26	0,13
20	0,31	0,16	52	0,18	0,09	84	0,00	0,00	116	0,24	0,12
21	0,31	0,16	53	0,09	0,04	85	0,07	0,04	117	0,18	0,09
22	0,29	0,14	54	0,00	0,00	86	0,11	0,05	118	0,10	0,05
23	0,22	0,11	55	0,06	0,03	87	0,11	0,05	119	0,02	0,01
24	0,10	0,05	56	0,10	0,05	88	0,09	0,05	120	0,04	0,02
25	0,08	0,04	57	0,11	0,05	89	0,07	0,03	121	0,09	0,04
26	0,28	0,14	58	0,12	0,06	90	0,04	0,02	122	0,10	0,05
27	0,47	0,23	59	0,14	0,07	91	0,04	0,02	123	0,10	0,05
28	0,61	0,30	60	0,19	0,09	92	0,04	0,02	124	0,09	0,05
29	0,66	0,33	61	0,26	0,13	93	0,05	0,02	125	0,09	0,05
30	0,61	0,30	62	0,36	0,18	94	0,06	0,03	126	0,13	0,07
31	0,44	0,22	63	0,47	0,24	95	0,05	0,03	127	0,22	0,11
32	0,20	0,10	64	0,57	0,28	96	0,03	0,01	128	0,36	0,18
33	0,10	0,05	65	0,63	0,31	97	0,02	0,01	129	0,57	0,28

Tabla 4.8 Valores de los componentes que varían de una parte a otra del circuito eléctrico del aparato fonador de la vocal U

Adicionalmente las fuentes cambian con una pequeña variación como lo describe la siguiente ecuación

$$\text{Circuito}(n) = \cos(n\Omega)$$

Por lo que el componente de fuente en el circuito será  $\cos(32n)$  y así sucesivamente.

Igualmente el circuito acústico análogo tipo impedancia, que se asemeja al circuito eléctrico, resulta de estos valores y esta compuesto de 128 partes que varían en su resistencia y fuente exactamente de la misma manera como varía el circuito eléctrico. Este circuito se ve así:

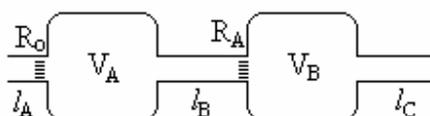


Figura 4.6 Modelo acústico del aparato fonador base, 128 componentes idénticos y con variaciones en las resistencias producen

Las componentes que varían son igualmente la fuente, y los valores de resistencia.

### Resultados

Como no es posible modelar estos circuitos para verificar su funcionamiento, es necesario remontarse a la función de transferencia quien es en últimas una forma matemática que describe que pasa con una señal una vez entra a dado circuito. Numéricamente, y según la programación en MATLAB estos son los resultados:

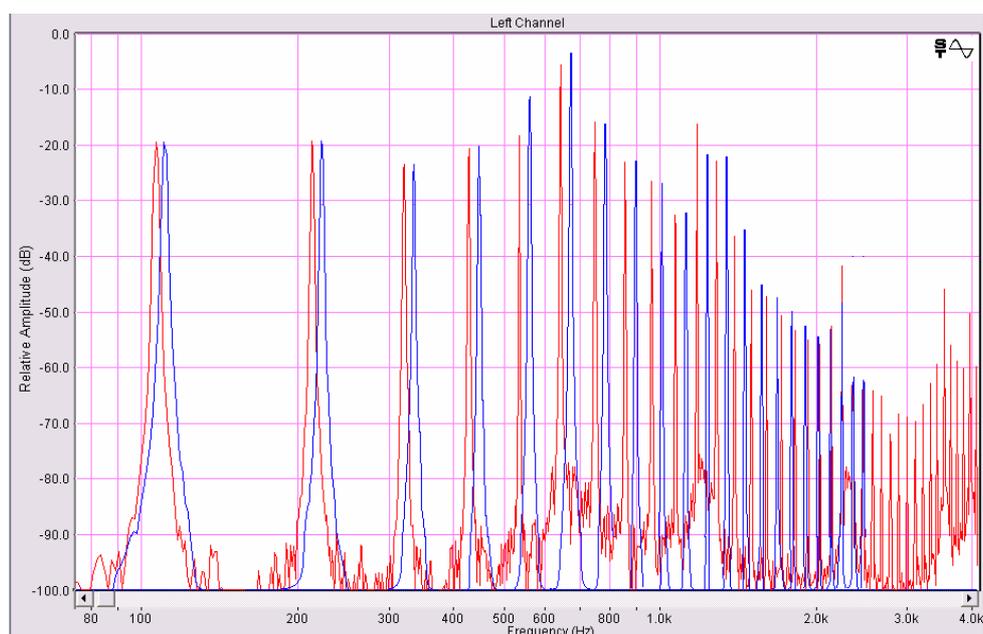


Figura 4.7, resultados de la vocal “a” producida en Matlab contra la vocal en frecuencia más cercana producida por VTCalcs

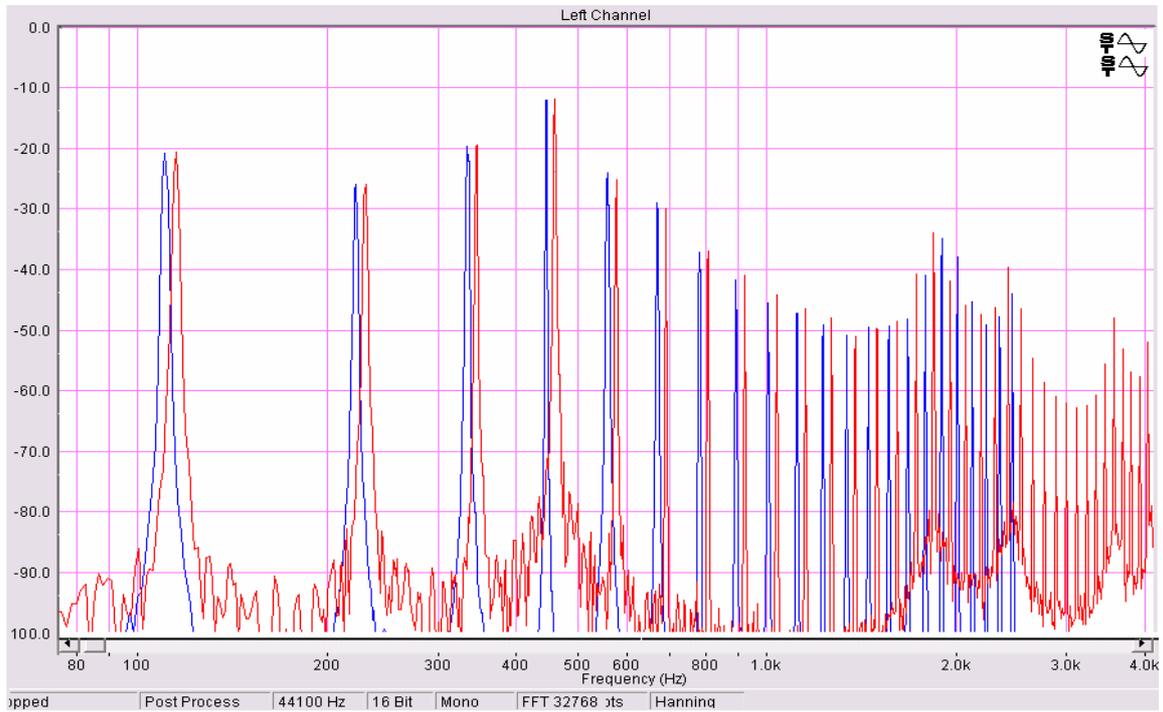


Figura 4.8. Resultados de la vocal “e” producida en Matlab contra la vocal en frecuencia más cercana producida por VTCals

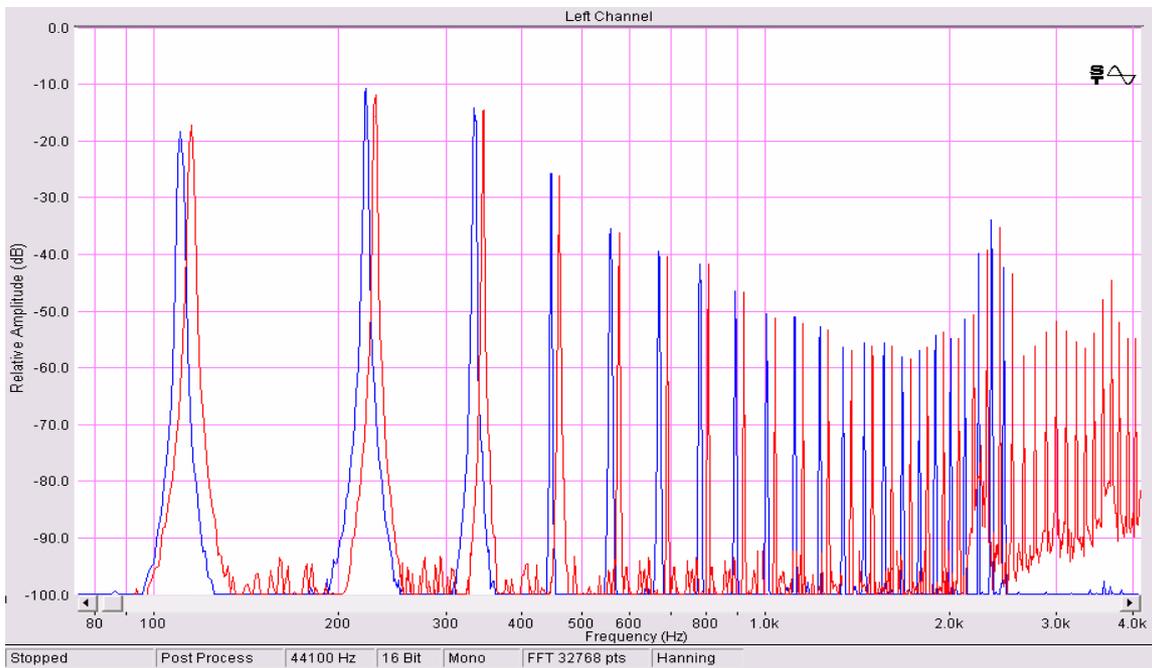


Figura 4.9. Resultados de la vocal “i” producida en Matlab contra la vocal en frecuencia más cercana producida por VTCals

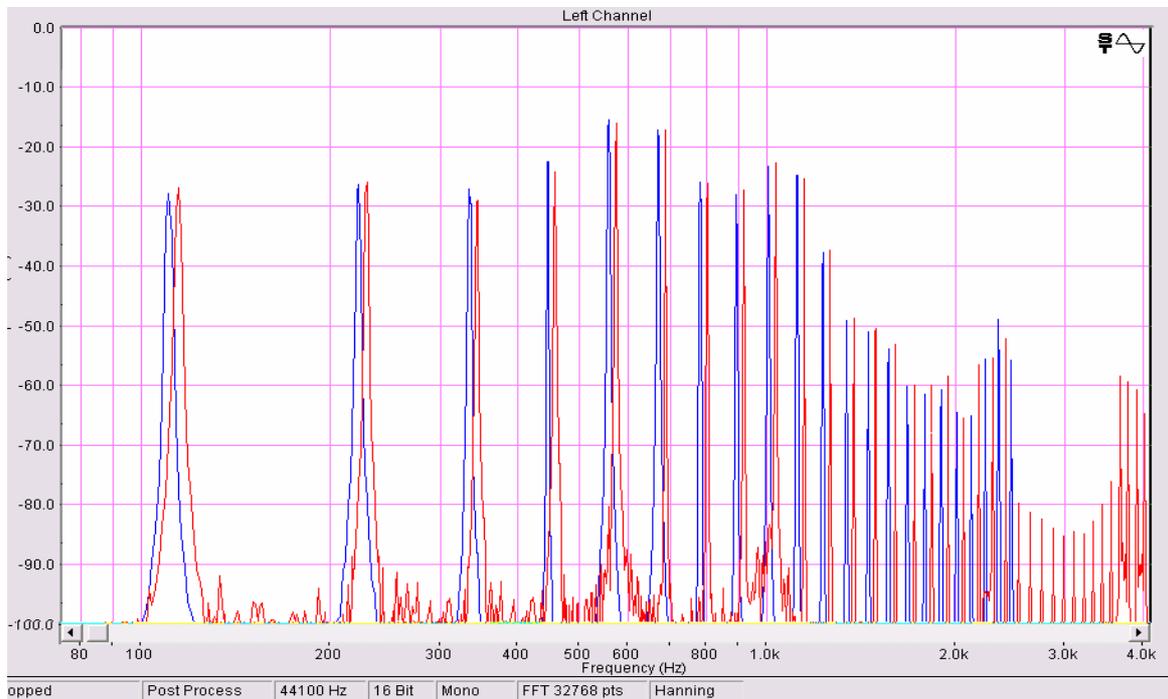


Figura 4.10. Resultados de la vocal “o” producida en Matlab contra la vocal en frecuencia más cercana producida por VTCalcs

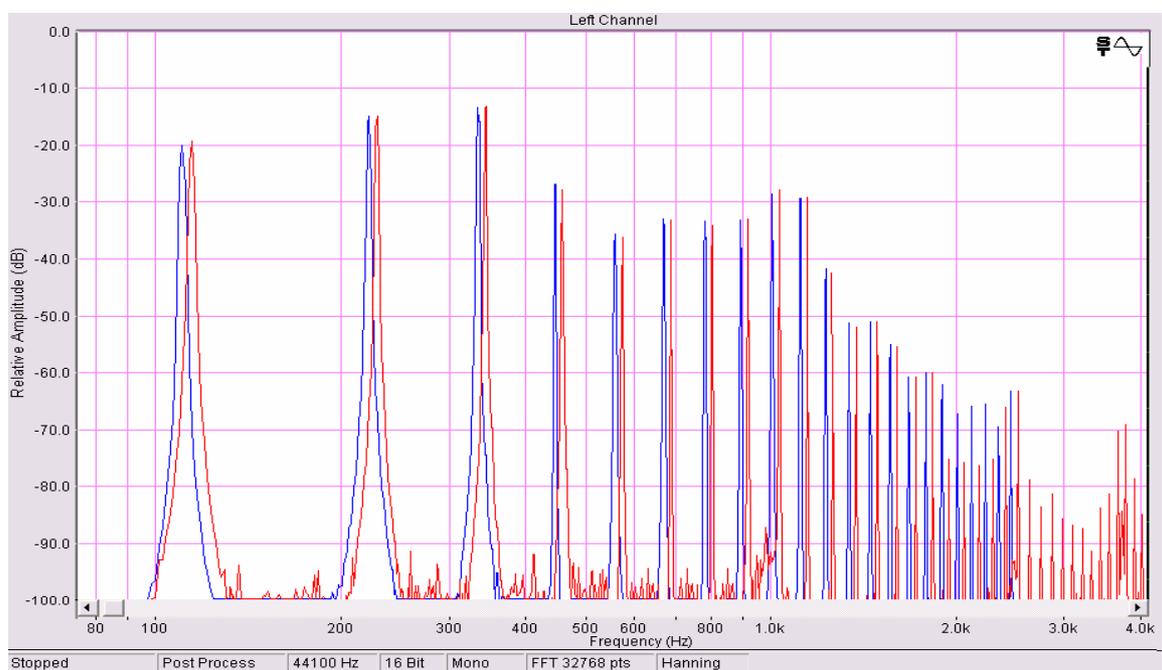


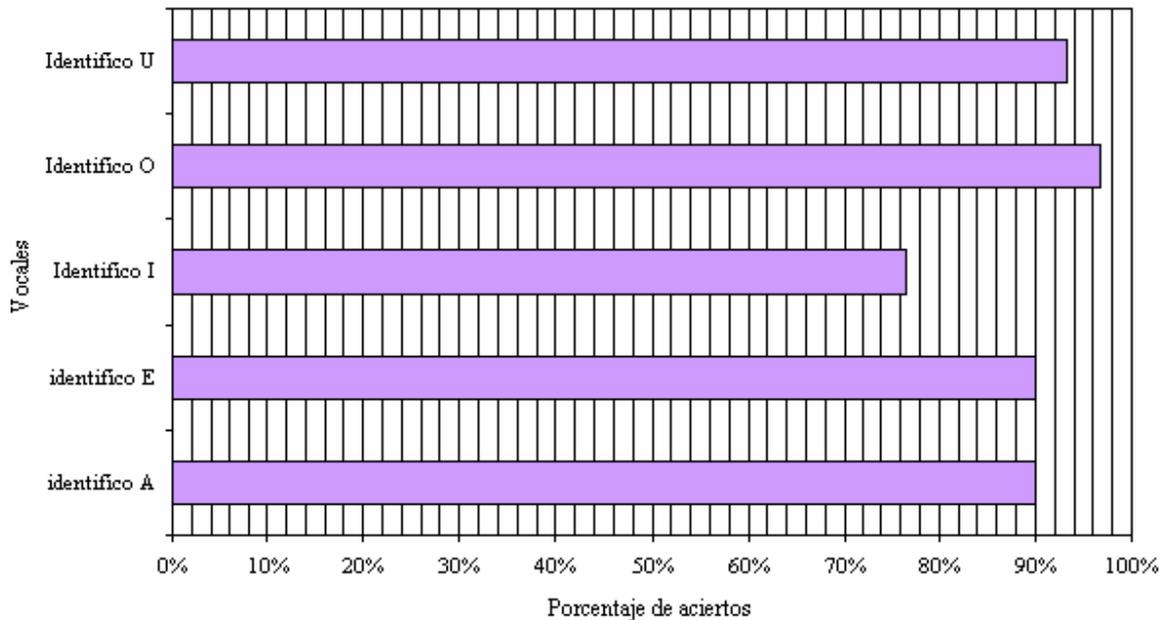
Figura 4.11. Resultados de la vocal “u” producida en Matlab contra la vocal en frecuencia más cercana producida por VTCalcs

Adicionalmente es necesario comprobar auditivamente la funcionalidad de dichos resultados. Auditivamente las vocales son nítidas en su totalidad y no generan duda alguna de su forma. Se probaron los resultados con 30 personas quienes llenaron el formato que se encuentra en el Apéndice A y estos fueron los resultados:

<i>Persona</i>	<i>identifico A</i>	<i>identifico E</i>	<i>Identifico I</i>	<i>Identifico O</i>	<i>Identifico U</i>
1	✓	✓	✓	✓	✓
2	✓	✓	✓	✓	✓
3	✓	✓	✓	✓	✓
4	✓	✓	x	✓	✓
5	✓	x	✓	✓	✓
6	✓	✓	✓	✓	✓
7	✓	✓	✓	✓	✓
8	✓	✓	x	✓	✓
9	✓	✓	✓	✓	✓
10	✓	✓	✓	✓	✓
11	✓	✓	✓	✓	✓
12	x	✓	✓	✓	✓
13	✓	✓	✓	✓	✓
14	✓	✓	x	✓	✓
15	✓	✓	✓	x	x
16	✓	✓	x	✓	✓
17	✓	✓	✓	✓	✓
18	✓	x	✓	✓	✓
19	✓	✓	✓	✓	✓
20	x	✓	✓	✓	x
21	✓	x	x	✓	✓
22	✓	✓	✓	✓	✓
23	✓	✓	✓	✓	✓
24	✓	✓	✓	✓	✓
25	✓	✓	✓	✓	✓
26	✓	✓	✓	✓	✓
27	x	✓	x	✓	✓
28	✓	✓	✓	✓	✓
29	✓	✓	✓	✓	✓
30	✓	✓	x	✓	✓

**Tabla 4.9** Resultados auditivos de las vocales emuladas

### *Resultados Auditivos*



Grafica 4.1 Resultados auditivos de las vocales producidas por medio de MATLAB después de hallar la función de transferencia

Basándonos en los resultados auditivos, se podría decir que auditivamente se comprobó la efectividad de las vocales producidas mediante el programa en MATLAB y que si el circuito pudiera generar dichos sonidos, este también produciría resultados auditivos como los presentados acá con su función de transferencia.

Para comprobar la efectividad del circuito sería necesario tener un emulador de circuitos capaz de producir sonido a su salida y no se encontró. La analogía de la misma forma no tiene forma alguna de probar su efectividad si tenemos en cuenta que los valores acá descritos no pueden ser oídos. La única salida sería producir el dispositivo físicamente y esto hasta el momento es imposible debido a la cantidad de variables con respecto a resistencias y materiales para insertarse en una laringe humana. Por lo tanto, los resultados matemáticos hasta ahora propuestos deben bastar.

La hipótesis de esta investigación planteaba que la creación de un modelo para el aparato fonador que reproduzca vocales en español, es un proyecto mediante el cual se va a poder cambiar la forma en la que las comunicaciones funcionan y va a representar un primer paso para la creación de un reemplazo tangible para la laringe de los pacientes larinsectomizados quienes pierden el habla. A pesar de todos los esfuerzos, las diferentes personas dispuestas a ayudar y el tiempo dedicado, podemos decir que este producto no representa un gran avance debido a su increíble complejidad lo que hace que no sea viable, en relación al sistema fonador en general. En primer lugar, no permite variar de una vocal a la otra con facilidad y menos al ser insertado en un sistema humano como el aparato fonador. Sin embargo, es posible que esta forma de generar vocales sí contribuya a la producción de frases por medio de síntesis y así mejorar la calidad de las comunicaciones hoy en día.

Los objetivos fueron cumplidos a cabalidad. Se tomaron muestras de voces masculinas produciendo vocales aunque no fueron precisamente tomadas de humanos, pero sí se analizaron sus espectros de frecuencias. Se emularon por medio de síntesis aditiva las frecuencias fundamentales y parciales de las tomas de audio promedio, basándose en la teoría de Shiga de MFA. Se comprobó que la analogía eléctrica del aparato fonador tenía resultados similares a los emulados por síntesis, aunque nunca se pudo evaluar el circuito en sí, más si su respuesta basándonos en su función de transferencia. También se propuso una analogía acústica del sistema. Finalmente, se modeló un dispositivo acústico capaz de emular las vocales producidas a través de voces masculinas como son producidas en español, lo que hace que los objetivos fueran cumplidos completamente.

Podemos concluir que los resultados a pesar de ser satisfactorios, no se pueden aplicar a un sistema humano real, pero si permiten ser utilizados para comunicaciones y síntesis en general. Se recomienda entre otras cosas, comprender la teoría bajo la cual este proyecto fue posible para poder aplicarla a futuros proyectos de investigación.

## 5. DESARROLLO INGENIERÍL

A pesar de los esfuerzos realizados no se encontró en ninguna publicación ya realizada, una función de transferencia para el tracto vocal. Sin embargo, muchos de los autores describen el procedimiento que es necesario seguir para obtener dicha función de transferencia. Shiga (2003) describe la forma en la que se puede determinar la función de transferencia utilizando el análisis multi-cuadros descrito a continuación.

La función de transferencia de un sonido en especial, es determinada por la forma de la envolvente de su espectro en frecuencia. Sin embargo, las primeras frecuencias armónicas están muy separadas unas de otras por lo que esto puede llegar a presentar problemas. Si se pudiera obtener la curva exacta de función de transferencia y asumiendo pulsos periódicos a la entrada, la salida produciría el sonido deseado. Fig (5.1)

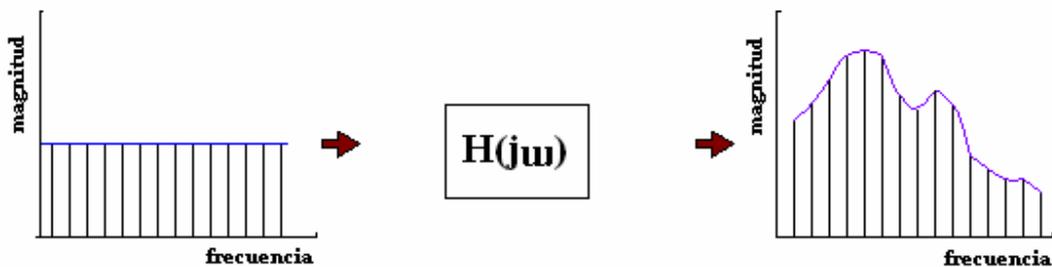


Figura 5.1 filtro del tracto vocal que representa tanto el tracto vocal como la radiación producida por algunas consonantes.

Según esta teoría (Owens 1993), y tomando como referencia el análisis cepstral Oppenheim, se asume la entrada al sistema, ya que no puede ser observada y se filtra para lograr que estos pulsos periódicos se conviertan en una vocal.

La envolvente espectral de un sonido producido por la voz se obtiene removiendo la estructura armónica y buscando la periodicidad del espectro de frecuencia de aquellas

frecuencias en las que la energía es máxima, o sea las frecuencias fundamentales. Los picos armónicos reflejan la función de transferencia del tracto vocal.

Como se mencionó anteriormente, la función de transferencia del tracto vocal puede generar errores de interpretación debido a que la distancia que existe entre frecuencias armónicas durante los primeros armónicos es bastante grande y esto puede ser confuso. Para este problema Shiga (2005) propone el análisis multi cuadros. Mediante este análisis, todos los fragmentos de sonidos producidos por la voz, son generados utilizando el mismo tubo así el sonido varié en frecuencia. Por eso es necesario medir la similitud del tracto vocal mientras se graban las muestras producidas. Si se observa la figura 5.2, se puede ver la envolvente del espectro de frecuencia para una sola toma de voz en una sola frecuencia. La envolvente puede presentar errores especialmente entre las primeras frecuencias armónicas. La figura 5.3 muestra el mismo espectro con 3 frecuencias fundamentales adicionales con sus frecuencias armónicas respectivas y la resultante envolvente de frecuencia. Como se puede observar, la segunda envolvente en el espectro de frecuencia es más detallada y más cercana a la realidad que la primera.

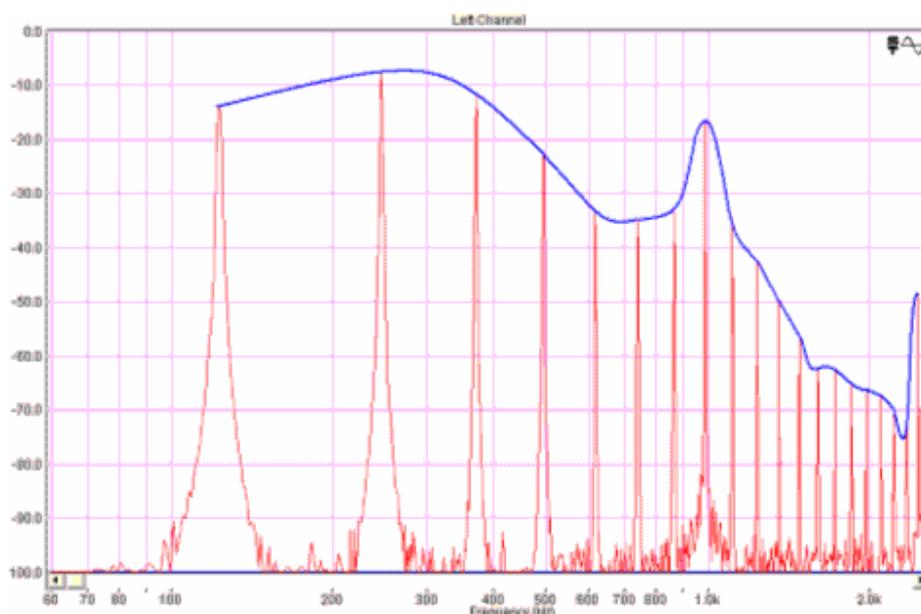


Figura 5.2 - Envolvente espectral de la vocal A utilizando un solo cuadro.

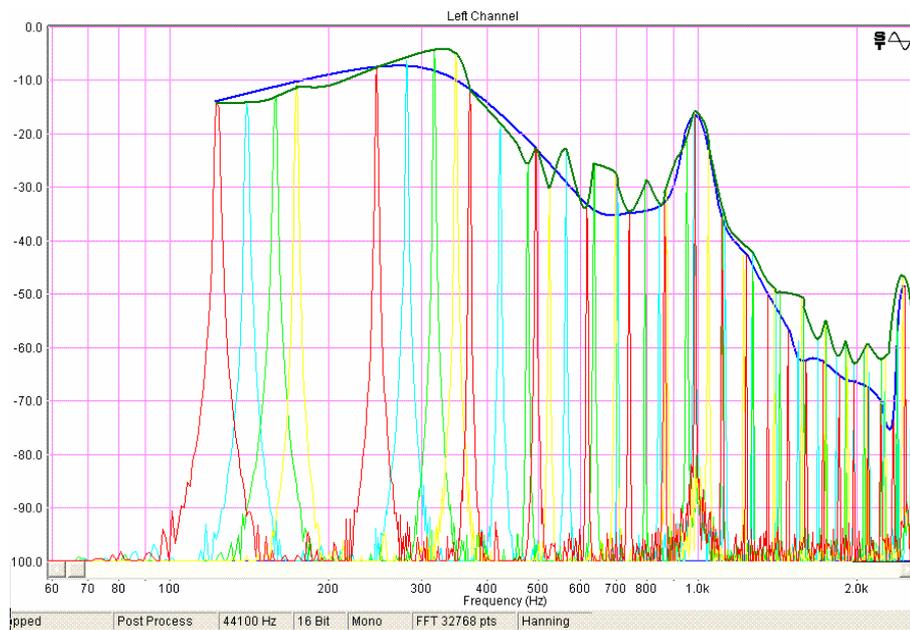


Figura 5.3 – Envolvente espectral que compara la envolvente con un solo cuadro (azul) vs. la envolvente utilizando 3 cuadros.

Las razones por las que se utiliza el análisis multi cuadro (MFA) son: Primero, con una sola frecuencia, el ancho de banda se restringe a menos de la mitad del periodo fundamental, y esto genera una envolvente espectral con resolución en frecuencia bastante limitada. Con el MFA virtualmente se aumenta produciendo que el intervalo de muestreo se disminuya. Segundo, la envolvente espectral es distorsionada por el aliasing cepstral para cada frecuencia de muestreo de forma diferente. Aumentando virtualmente el número de frecuencias armónicas, se resuelve este problema. Finalmente, la promediación de envolventes interpoladas para muchas frecuencias, pero utilizando la misma estructura del tubo del aparato fonador, generan una curva suavizada excesivamente lo que hace que se pierdan información detallada. El MFA estima la envolvente más aproximada a la respuesta del filtro aplicando más cuadros en vez de observarlos separadamente como en el método convencional.

Por todas estas razones se considera apropiado el sistema de MFA para determinar la función de transferencia del tracto vocal para cada una de las vocales producidas en español por voces masculinas.

Se presenta otro problema y es entonces como determinar la función de transferencia del tracto vocal, si no se cuenta con los recursos económicos para realizar un estudio utilizando el Articulógrafo Electromagnético que permite con muy poco ruido, determinar la distancia de algunos puntos en la laringe, verificando así que la forma del tubo no cambie al cambiar la frecuencia de la frase mientras se graba la frase. Tampoco se cuenta con los recursos para un estudio de rayos X que muestran la forma del aparato fonador delineado con un colorante.

Todos estos problemas fueron solucionados mediante un software llamado VT CALCS (Ghosh, 1999) bajo la plataforma de MATLAB que genera además de otras cosas, un modelo para el tracto vocal según su movimiento articulatorio y es generado por síntesis. La protección del programa no permite determinar cual es la función de transferencia que se utiliza pero se puede deducir por la estructura del mismo, que funciona bajo el principio

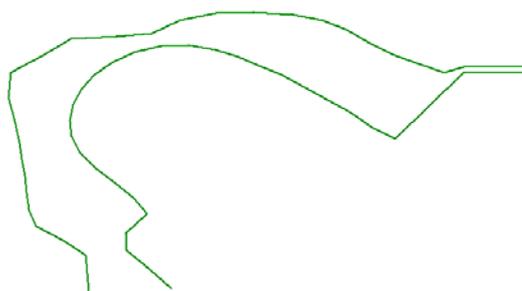


Figura 5.4 – Modelo del tracto vocal del programa VT Demo de la vocal u

articulatorio descrito por Mermelstein (1972). Este programa, permite observar la estructura del aparato fonador mientras genera los sonidos, que bien pueden ser grabados en cualquier software de grabación de audio. Dentro de las demostraciones que este programa tiene, se presentan las vocales, que aunque no se dan los parámetros que estas tienen. El

tubo del tracto vocal, sin embargo, si cambia su forma y es posible la verificación visual de estos parámetros.

Para determinar cuales son los valores del tubo para cada vocal, se toma una foto de la estructura del tracto vocal (Figura 5.4), y mediante ensayo y error se busca establecer los parámetros bajo los cuales la forma del tubo quede igual o muy similar a la generada por la demostración del programa. Los parámetros que este modelo articulatorio maneja son la mandíbula, posición de la lengua, forma de la lengua, punto más alto o mas bajo de la

lengua, labios, labio inferior, estiramiento horizontal del labio forma, altura de la laringe y frecuencia, (Merlmelestein, 1973). Estos parámetros varían desde -3.0 hasta 3.0 cada punto decimal. Finalmente se verifica auditivamente que la posición del tubo indicada por los parámetros corresponda a la vocal que se pretende analizar.

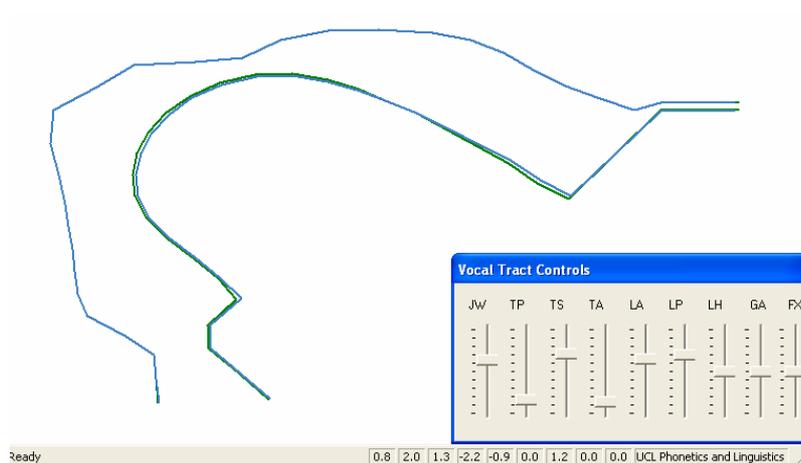


Figura 5.5 - Modelo del tracto vocal del programa VT Demo de la vocal u (Verde) con el modelo generado modificando los parámetros del tracto vocal hasta producir la u (azul) con la tabla de valores correspondientes

En la figura 5.5 se puede observar la similitud entre los parámetros de la foto (verde) con los parámetros que con ensayo y error se logró establecer (Azul). Auditivamente ambas funciones suenan como una u sintetizada, y esto va a permitir generar a vocal deseada, con los parámetros deseados, sin alterar la estructura del tubo.

Se establecen los parámetros para cada una de las vocales y se graba variando en frecuencia de -3.0 a 3.0 según el modelo, que en realidad son alrededor de 9 Hz por cada 0.5 de cambio. (Los parámetros de las vocales pueden ser encontrados en el Apéndice B). Una vez estos parámetros son grabados, se analizan espectralmente. El espectro de frecuencia de estos parámetros. Con un ventaneo Hanning y un tamaño de FFT de 32768, que genera una resolución espectral de 1.3 Hz, se observan todas las vocales en diferentes frecuencias. Se toman los picos de cada una de las muestras y se grafican estos picos.

Es necesario recordar que la amplitud que establece el SPECTRALAB, que es el programa que se utilizó para realizar el análisis espectral, es una amplitud relativa, por lo que es necesario convertir estos valores a valores de energía, primero tomando la amplitud mayor de la muestra y restando esta a cada una de las frecuencias, y posteriormente convirtiendo estos valores a valores de energía mediante la siguiente ecuación,

$$Energía = 10^{\left(\frac{dB}{10}\right)} \quad (\text{Eq 5.1})$$

La figura 6.6 muestra la envolvente espectral para la vocal o, cuando se superponen todas las frecuencias. Los datos después son introducidos en MATLAB y mediante la función CFTools, se establece una función capaz de representar la curva de los valores ya descritos en la envolvente.

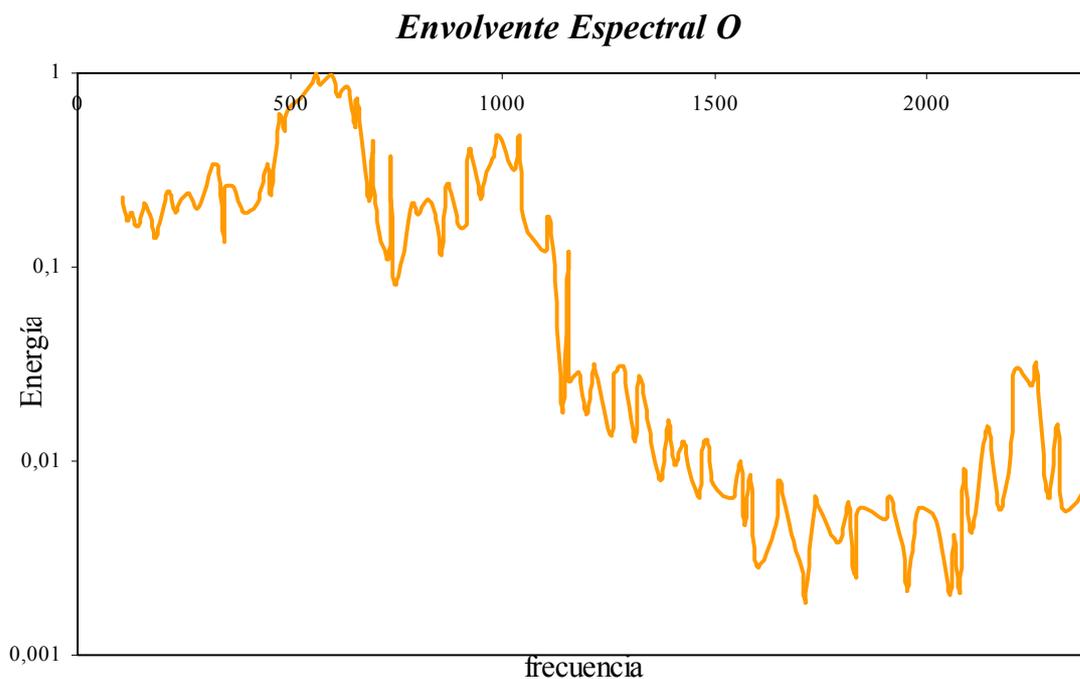


Figura 5.6 Envlovente espectral matemáticamente calculada de la vocal o en 10 cuadros

Establecer que tipo de curva se debe utilizar puede ser riesgoso, porque de esta curva se debe establecer el circuito eléctrico que represente la envolvente espectral y este mismo como función de transferencia, debe ser capaz de generar las vocales en cualquier

frecuencia. Para establecer la curva, es necesario tomar los siguientes factores en cuenta: primero, el ajuste que se establece con una función racional, resulta más sencillo para generar el circuito eléctrico, pero su forma no se acerca mucho a lo que requiere el sistema, a menos de que los valores de frecuencia sean normalizados, y esto a su vez requiere que los valores de frecuencia sean normalizados antes de entrar al filtro del tracto vocal, y retornen a su estado natural después de ser filtrados por el tracto vocal. Esto puede dañar mucho la señal, pero puede resultar para realizar la curva necesaria. Segundo, la curva puede ser modelada por Fourier, cosa que generaría un acercamiento bastante bueno, pero se transformaría en un proceso muy engorroso al generar el circuito que se quiere realizar por medio de síntesis electrónica.

Entonces se decidió realizar un análisis cepstral que permitiera generar las vocales basándose en el MFA (Shiga 2005). Para eso, y para evitar errores de cálculo fue necesario tomar cada una de las muestras de cada vocal y tomar los valores pico de cada armónico mediante una programación medianamente sencilla en Microsoft Excel que por medio de percentiles permite saber el valor de cada armónico. (Ver Anexo C)

El análisis multicuadro (Shiga 2003, 2005) comienza partiendo de la transformada de Fourier ( $X(e^{j\omega})$ ) de la forma de onda de cada vocal, su logaritmo natural esta entonces dado por

$$\hat{X}(e^{j\Omega}) = \ln X(e^{j\Omega}) = \ln |X(e^{j\Omega})| + j \arg(X(e^{j\Omega})) \quad (\text{Eq 5.2})$$

En donde,  $\ln |X(e^{j\Omega})|$ , representa la amplitud de la señal y es  $\arg(X(e^{j\Omega}))$  la fase sin desplegar. Además  $X(e^{j\Omega})$ , se puede a su vez definirse como la transformada del cepstrum complejo así,

$$\begin{aligned} \hat{X}(e^{j\Omega}) &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} \hat{x}[n] e^{-jn\Omega} \\ \hat{X}(e^{j\Omega}) &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} \hat{x}[n] (\cos n\Omega - j \sin n\Omega) \\ \hat{X}(e^{j\Omega}) &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} \hat{x}[n] \cos n\Omega - j \sum_{n=-\infty}^{\infty} \hat{x}[n] \sin n\Omega \end{aligned} \quad (\text{Eq 5.3})$$

Teniendo en cuenta las propiedades del cepstrum, se obtienen las siguientes ecuaciones basadas en las ecuaciones anteriores.

$$\ln|\hat{X}(e^{j\Omega})| = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_a[n] \cos n\Omega \quad (\text{Eq 5.4})$$

$$\arg X(e^{j\Omega}) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_p[n] \sin n\Omega \quad (\text{Eq 5.5})$$

en donde,  $c_a$  representa la parte par de la función y  $c_p$  la parte impar. Entonces

$$c_a[n] = \frac{\hat{x}[n] + \hat{x}[-n]}{2} \quad (\text{Eq 5.5})$$

$$c_p[n] = \frac{\hat{x}[n] - \hat{x}[-n]}{2} \quad (\text{Eq 5.6})$$

Se toman las muestras de cada vocal y se representan matemáticamente así:

$a_k^L$ , la amplitud de cada armónico L ( $L = 1, 2, 3, \dots, N_k$ ), en cada cuadro k ( $k = 1, 2, 3, \dots, m$ )

$f_k^L$ , la frecuencia de cada armónico L, en cada cuadro k.

p es el número del cepstrum.

El procedimiento a seguir entonces es el siguiente:

1. Se asume  $c_a$  como una vector con p términos 0 para valor inicial

$$c_a = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{Eq 5.7})$$

2. Se halla  $d_k$  (offset, para estimar el error) con la siguiente ecuación:

$$d_k = \frac{u_k' W_k (a_k - P_k c_a)}{u_k' W_k u_k} \quad (\text{Eq 5.8})$$

en donde,  $W_k$  es una matriz ( $N_k \times N_k$ ), que toma las frecuencias ponderadas  $\omega(f_k^L)$

$$W_k = \begin{bmatrix} \omega(f_k^1) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \omega(f_k^2) & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \omega(f_k^{N_k}) \end{bmatrix} \quad (\text{Eq 5.9})$$

$\omega(f_k^L)$  es una distribución Gaussiana con desviación estándar de 4KHz, para cada una de las frecuencias, y  $u_k$  es un vector de  $N_k$  términos así:

$$u_k = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \quad (\text{Eq 5.10})$$

y  $P_k$  es una matriz de  $(N_k \times p+1)$  con los siguientes elementos

$$P_k = \begin{bmatrix} 1 & 2 \cos \Omega_k^1 & 2 \cos 2\Omega_k^1 & \cdots & 2 \cos p\Omega_k^1 \\ 1 & 2 \cos \Omega_k^2 & 2 \cos 2\Omega_k^2 & \cdots & 2 \cos p\Omega_k^2 \\ 1 & 2 \cos \Omega_k^3 & 2 \cos 2\Omega_k^3 & \cdots & 2 \cos p\Omega_k^3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 2 \cos \Omega_k^{N_k} & 2 \cos 2\Omega_k^{N_k} & \cdots & 2 \cos p\Omega_k^{N_k} \end{bmatrix} \quad (\text{Eq 5.11})$$

en donde

$$\Omega_k^L = 2\pi T_s f_k^L \quad (\text{Eq 5.12})$$

y  $T_s$  es el periodo de muestreo

3. Se calcula  $D_a$ , distorsión armónica calculada por medio de los mínimos cuadrado, y termina el proceso si  $D_a$  converge

$$D_a = \sum_{k=1}^M \rho_k \left[ (y_k - P_k c_a)' W_k (y_k - P_k c_a) + \lambda_a c_a' R c_a \right] \quad (\text{Eq 5.13})$$

En donde,  $\rho_k$  es un criterio de compensación de densidad armónica entre cuadros para así evaluar cada cuadro independientemente del número de armónicos, que este pueda presentar.

$$\rho_k = TsF_o^k \quad (\text{Eq 5.14})$$

El vector  $y_k$  muestra la amplitud armónica ajustada con el offset ya establecido  $d_k$ .

$$y_k = a_k - d_k u_k \quad (\text{Eq 5.15})$$

$\lambda_a$  es un coeficiente para suavizar la curva, que se estableció como

$$\lambda_a = 1 \times 10^{-3} \quad (\text{Eq 5.16})$$

y finalmente, R es una matriz (p+1) x (p+1) de penalización equivalente a

$$R = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 2^2 & \dots & 0 \\ \vdots & 0 & 0 & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & p^2 \end{bmatrix} \quad (\text{Eq 5.17})$$

4. Se encuentra un nuevo  $c_a$ , resolviendo la siguiente ecuación:

$$\left( \sum_{k=1}^M \rho_k [P_k' W_k P_k + \lambda_a R] \right) c_a = \sum_{k=1}^M \rho_k P_k' W_k y_k \quad (\text{Eq 5.18})$$

5. Se retorna al punto 2

El punto de convergencia que se estableció fue de 0.0001. En el Apéndice C se encuentra toda la programación en lenguaje MATLAB de la primera vocal en donde se ve el número de repeticiones necesarias para que Da convergiera.

Una vez se obtienen los coeficientes  $c_a$ , es necesario tomar la fase de cada uno de los puntos observados anteriormente y seguir el siguiente procedimiento.

Para determinar un cepstrum que aproxime las fases de los armónicos de M cuadros, se utiliza el método de mínimos cuadrados. Sea  $\theta_k^l$  la fase observada del l-ésimo armónico para cada cuadro k.

1. Se inicializa  $\vartheta_{ref}(f_k^l)$  utilizando la siguiente ecuación:

$$\vartheta_{ref}(f_k^l) = -2 \sum_{n=1}^p \tilde{c}_a[n] \sin n\Omega_k^l \quad (\text{Eq 5.19})$$

En donde  $\tilde{c}_a[n]$  es el número del cepstrum adquirido en el procedimiento de la amplitud descrito anteriormente, p es el número de cepstrum y  $\Omega$  es la frecuencia en radianes.

2. Se encuentra  $\tau_k$ (para todos los k) utilizando las siguientes ecuaciones:

$$\tau_k = T_r n_k \quad (\text{Eq 5.20})$$

En donde  $T_r$  es un número mucho menor al periodo de muestreo  $T_s$ . (Por lo menos 1000 veces menor)

$$n_k = \frac{\arg \max}{-\frac{T_o}{2T_r} < n \leq \frac{T_o}{2T_r}} R'_k(n) \quad (\text{Eq 5.21})$$

y

$$R'_k(n) = \frac{1}{\pi} \sum_{l=1}^{N_k} \exp(a_k^l + \tilde{y}_k^l) \cos[2\pi f_k^l T_r n + \theta_k^l - \vartheta_{ref}(f_k^l)] \quad (\text{Eq 5.22})$$

3. Se calcula  $D_p$  usando la siguiente ecuación y se termina el procedimiento en caso de que  $D_p$  converja (para ver criterio de convergencia ver Apéndice C)

$$\frac{1}{2} D_p = \sum_{k=1}^M \rho_k [(g_k - Q_k c_p) W_k (g_k - Q_k c_p) + \lambda_p c_p' R c_p] \quad (\text{Eq 5.23})$$

En donde  $v_k$  es un vector de  $N_k$  dimensiones que consiste de fases armónicas  $v_k^l$  como sus elementos y es expresada así

$$\mathcal{G}_k = \begin{bmatrix} \mathcal{G}_k^1 \\ \mathcal{G}_k^2 \\ \mathcal{G}_k^3 \\ \vdots \\ \mathcal{G}_k^{N_k} \end{bmatrix} \quad (\text{Eq 5.24})$$

$Q_p$ , es una matriz  $N_k \times p$ , así

$$Q_k = (-2) \cdot \begin{bmatrix} \sin \Omega_k^1 & \sin 2\Omega_k^1 & \cdots & \sin p\Omega_k^1 \\ \sin \Omega_k^2 & \sin 2\Omega_k^2 & \cdots & \sin p\Omega_k^2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sin \Omega_k^{N_k} & \sin 2\Omega_k^{N_k} & \cdots & \sin p\Omega_k^{N_k} \end{bmatrix} \quad (\text{Eq 5.25})$$

$c_p$  es una vector de  $p$  términos con los coeficientes cepstrales, así:

$$c_p = \begin{bmatrix} \tilde{c}p[1] \\ \tilde{c}p[2] \\ \tilde{c}p[3] \\ \vdots \\ \tilde{c}p[p] \end{bmatrix} \quad (\text{Eq 5.26})$$

y  $\lambda_p$  es un criterio para suavizar la curva y puede ser igual a  $\lambda_a$ .

4. Se encuentran los valores de  $c_p$  resolviendo la siguiente ecuación:

$$\left( \sum_{k=1}^M \rho_k [Q_k' W_k Q_k + \lambda_p R] \right) c_p = \sum_{k=1}^M \rho_k Q_k' W_k \mathcal{G}_k \quad (\text{Eq 5.27})$$

5. Se encuentra  $v_{\text{ref}}(f_k^l)$  usando la siguiente ecuación.

$$\mathcal{G}_{\text{ref}}(f) = \arg \left[ \frac{\sum_k \rho_k \sum_{l=1}^{N_k} G(f_k^l - f) \exp j(\theta_k^l - 2\pi f_k^l \tau_k)}{\sum_k \rho_k \sum_{l=1}^{N_k} G(f_k^l - f)} \right] \quad (\text{Eq 5.28})$$

En donde  $G(f)$  indica una ventana de promedio móvil.

6. Se retorna al punto 2

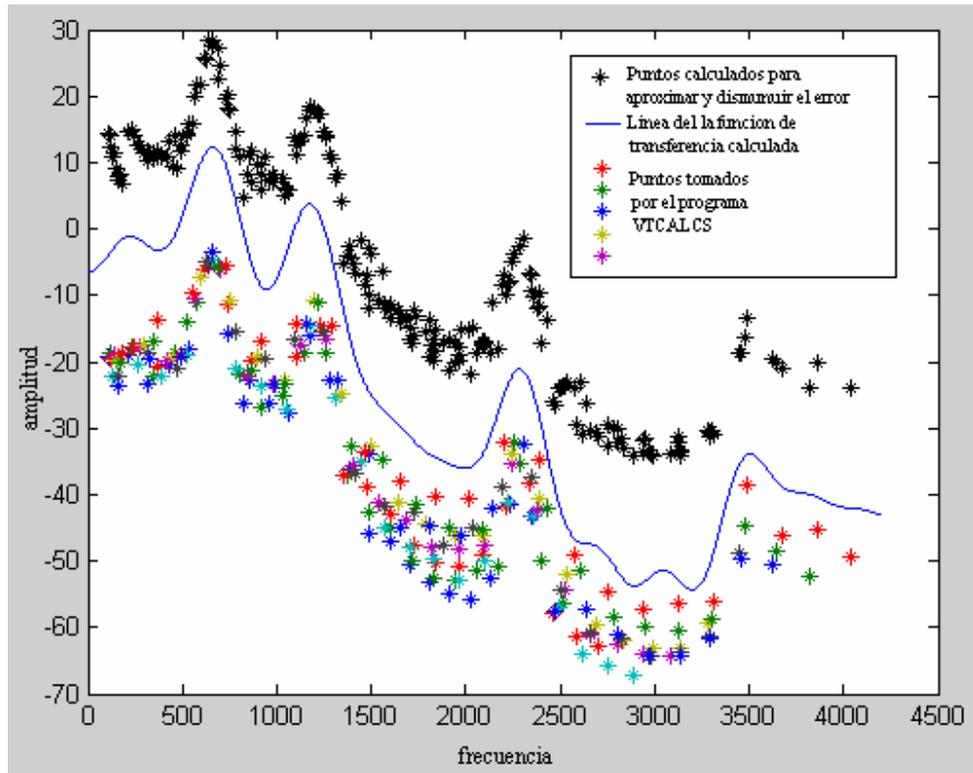


Figura 5.7 Gráfica de resultados arrojados por la programación en MATLAB asistida por Yoshinori Shiga

La figura 5.7 muestra los resultados que el programa muestra para generar la función de transferencia del tractor vocal. Aquí es obvio que los resultados tienen un corrimiento debido a las diferencias existentes entre la forma de presentar los resultados por SpectraLAB y MATLAB. En este caso para igualar los resultados es necesario recurrir a un corrimiento por ensayo y error para lograr la forma exacta de los resultados. Igualmente, los resultados no deben afectarse por el corrimiento debido a que las diferencias en la forma de onda de mantienen de una frecuencia a otra.

La programación de las ecuaciones para determinar la función de transferencia del tracto vocal puede llegar a ser bastante compleja. El proceso fue tedioso y hasta el mismo Yoshinori Shiga intervino en la programación de dichas ecuaciones para lograr resultados óptimos. Desafortunadamente el modelo bajo el cual tome las grabaciones (VTCALCS) presentaba problemas de fase, ya que este es un tema que hasta ahora Yoshinori Shiga (2005) logra resolver, por lo que la realización de la programación para la fase de cada una de las vocales fue en vano, y no se tomó en cuenta para los resultados finales.

Después de lograr encontrar  $Xe^{j\omega}$  (la función de transferencia del tracto vocal) era necesario probar si aquella programación generaba los resultados esperados. Aquí se llegó a un nuevo inconveniente: La ecuación que utiliza SpectraLAB para realizar la FFT es muy diferente a la que realiza MATLAB por lo que los resultados generados son diferentes. Fue por eso necesario realizar un nuevo cálculo para que los resultados finales fueran iguales a los que genera MATLAB para que al hacer la Transformada inversa de Fourier, se pudieran cuantificar los resultados. (Ver ANEXO D)

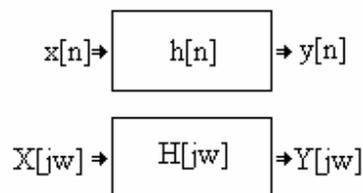


Figura 5.8 Modelo de un sistema con entrada  $x$ , salida  $y$ , y función de transferencia  $h$ .

En la figura 5.8 podemos ver que hemos obtenido tras estos complejos cálculos. Asumiendo la entrada como una señal que tiene todas sus frecuencias armónicas con la misma energía,  $X[j\omega]$  se debería ver como en la figura 5.9. Esto es diferente a un ruido blanco, ya que tiene frecuencias armónicas y una frecuencia fundamental. Esto es lo que se asume a la entrada. La función de transferencia es el resultado de tan ardua labor en cuanto a la programación en MATLAB y visualmente se ve como en la figura 5.10. En el gráfico

se puede observar como algunos de los valores presentaron una desviación grande con respecto a la curva. Esto se da debido a el programa que generó las vocales, más no por el modelo para establecer la función de transferencia.

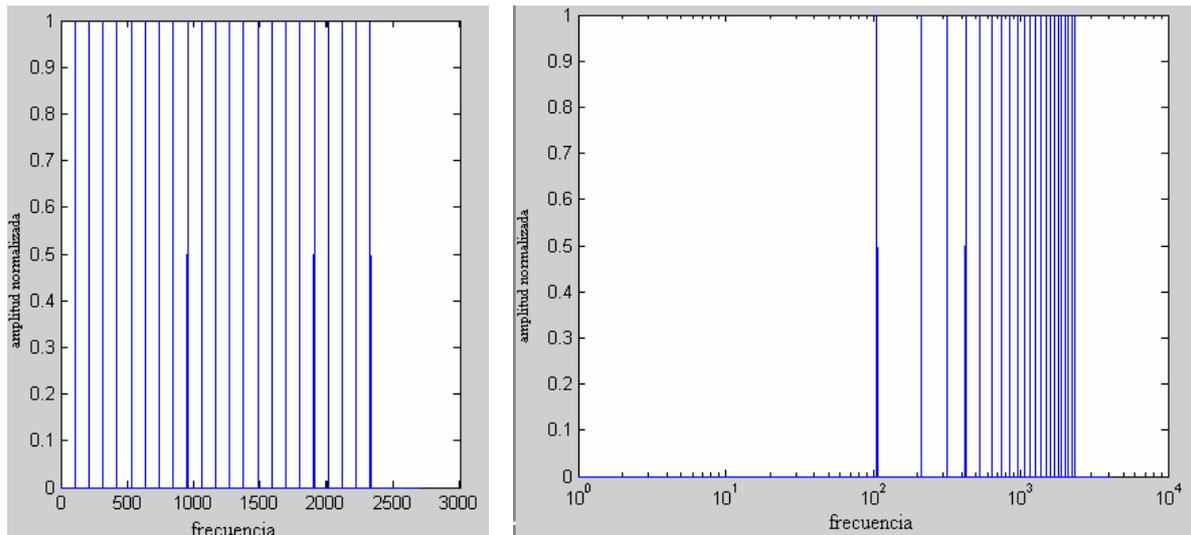


Figura 5.9 Entrada del sistema (en el dominio de la frecuencia), en a) una gráfica lineal y b) una gráfica logarítmica

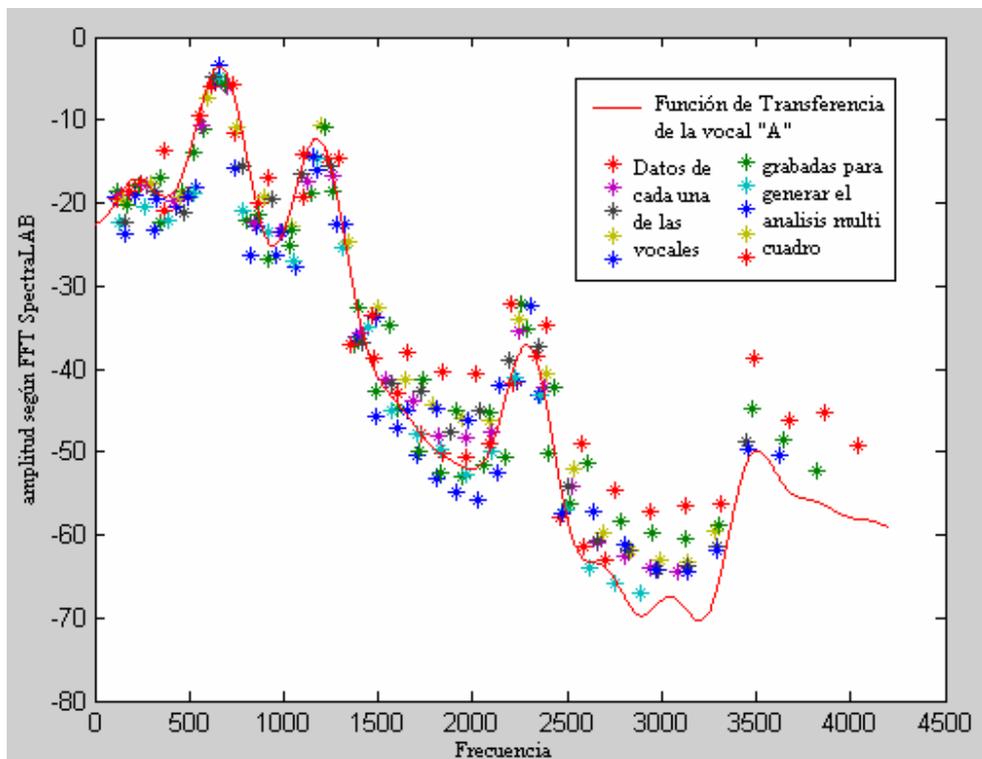


Figura 5.10 Función de transferencia para la vocal A y el equivalente a  $H[j\omega]$  en el dominio de la frecuencia.

Esta función de transferencia  $H[j\omega]$  va a filtrar la forma de onda  $X[j\omega]$  y por medio de una multiplicación sencilla, va a generar a la salida la vocal que conocemos como “a” en este caso en particular. Si este proceso resulta cierto a la salida obtendremos una señal que si retornamos al dominio del tiempo, va a sonar como la vocal original utilizada. (Ver Apéndice E para programación). A continuación se observa la señal una vez filtrada y su conversión al dominio del tiempo. Los resultados son muy satisfactorios para el buen desarrollo de este proyecto.

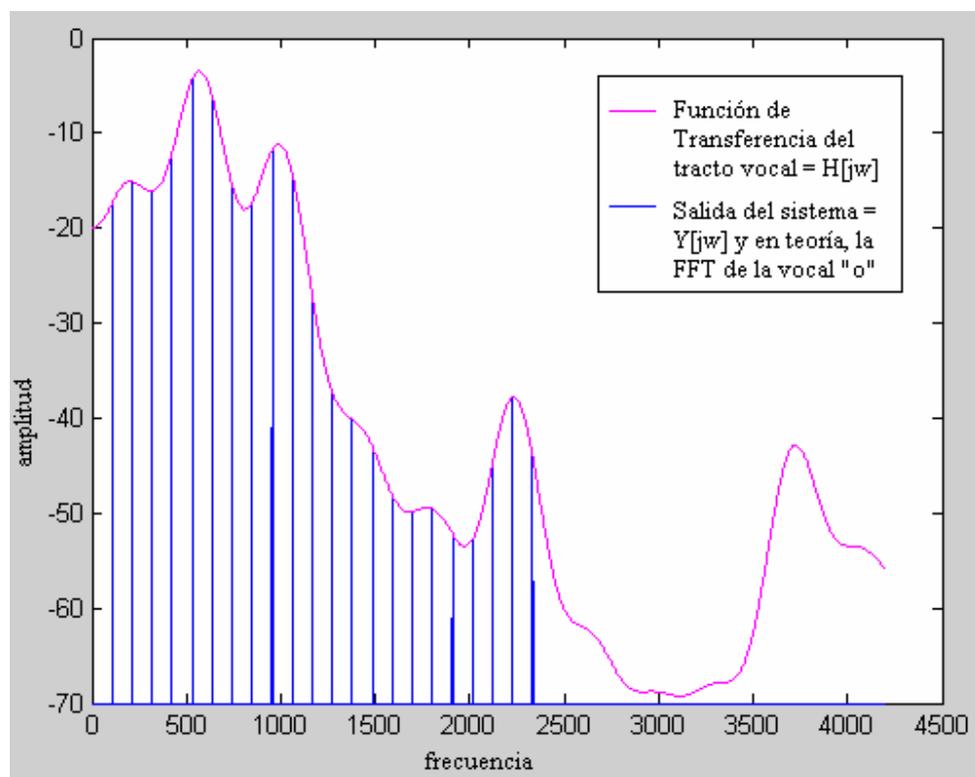


Figura 5.11 Gráfica que muestra los resultados de la programación y finalmente la salida al sistema  $Y[j\omega]$  (en el dominio de la frecuencia.)

En la figura 5.11 podemos observar claramente como se ve lo que se plantea al principio de este capítulo y es como debe ser la salida del sistema dadas las condiciones de entrada y después de establecer cual es la función de transferencia. La figura muestra el resultado en el dominio de la frecuencia. Lo único que resta es transformar dicha función al dominio del tiempo haciendo las modificaciones debidas para que la IFFT de este resultado  $Y[j\omega]$  sea

real y no entre en conflicto con el resto de la programación en Matlab (Vease Apéndice E). Para esto es necesario tomar la definición que Matlab mismo da para la IFFT.

EL Manual de ayuda MATLAB dice: “IFFT prueba a X para ver si los vectores en X a lo largo de la dimensión activa son conjugados simétricos. Si lo son, la computación es más rápida y la salida es real. Un vector de N elementos es conjugado simétrico si  $x(i) = \text{conj}(x(N-i+1,N+1))$  para cada elemento de x.”

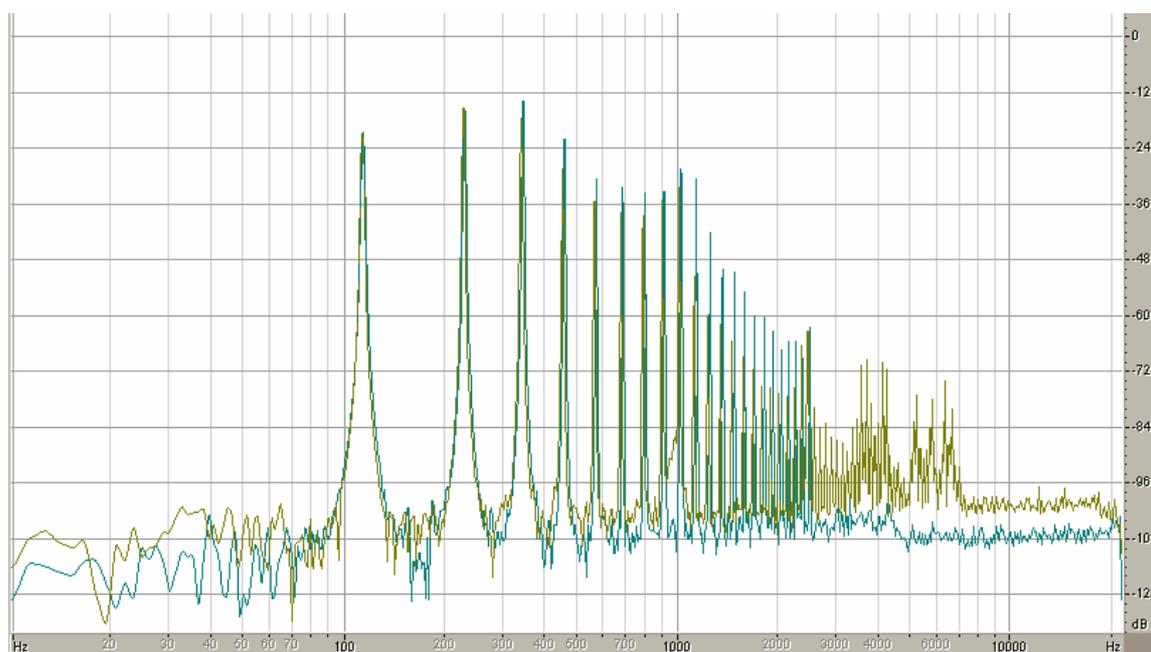


Figura 5.11 Comparación de la vocal generada por el programa VTCALCS y la generada en MATLAB por medio del análisis multi-cuadro.

Basados en esto generamos un  $Y[jw]$  que pueda generar una IFFT real en el que hacemos un espejo sobre el eje horizontal y duplicamos los resultados a excepción del primero. Finalmente, los resultados que se pueden apreciar son muy satisfactorios.

En la figura 5.11 se puede ver la comparación de la señal original y la generada por el programa de MATLAB aquí se puede ver como los resultados son óptimos para las primeras frecuencias armónicas y que luego empiezan a generar fallas. Esto, sin embargo, no altera auditivamente la vocal ya que evidentemente genera en este caso en particular una

U. Esto comprueba que matemáticamente el modelo funciona y que cualquier circuito con esa función de transferencia independientemente si este es un circuito mecánico, eléctrico o acústico, va a generar algo a la salida que suena a dicha vocal. Pero aquí entran una cantidad de interrogantes que es preciso resolver.

Primero, la función de transferencia obtenida, a pesar de ser probada, tiene un coeficiente cepstral de 128, eso quiere decir que son necesarios 129 circuitos en serie por vocal. Es necesario recordar que la función de transferencia de cada vocal esta dada por:

$$\hat{X}^{ej\Omega} = \ln X(e^{j\Omega}) = \ln |X(e^{j\Omega})| + j \arg(X(e^{j\Omega}))$$

Es preciso retomar además, que por fallas en el modelo a partir del cual se tomaron las muestras de audio, la fase fue eliminada por lo que nos queda que la función de transferencia del tracto vocal es:

$$\begin{aligned} \hat{X}^{ej\Omega} &= \ln |\hat{X}(e^{j\Omega})| \\ \ln |\hat{X}(e^{j\Omega})| &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_a[n] \cos n\Omega \\ &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_a[n] \cos n\Omega \end{aligned}$$

Si se observa la expresión resultante para poder hacer esa suma (que en realidad no es infinita sino que depende de la cantidad de coeficientes cepstrales). Esto generaría una serie de números de este tipo:

$$\hat{X}^{ej\Omega} = ca[0] \cos 0 + ca[1] \cos 2\Omega + ca[2] \cos 3\Omega + \dots + ca[128] \cos 128\Omega$$

Definamos, por ejemplo, la función de transferencia de la vocal a, esta sería:

$$\begin{aligned}
& -21,65\cos(0w) + 2,72\cos(1w) + 2,64\cos(2w) + 2,5\cos(3w) + 2,32\cos(4w) + 2,11\cos(5w) + \\
& 1,87\cos(6w) + 1,62\cos(7w) + 1,35\cos(8w) + 1,07\cos(9w) + 0,79\cos(10w) + 0,51\cos(11w) \\
& + 0,25\cos(12w) + 0,02\cos(13w) + -0,17\cos(14w) + -0,3\cos(15w) + -0,37\cos(16w) + - \\
& 0,38\cos(17w) + -0,33\cos(18w) + -0,24\cos(19w) + -0,14\cos(20w) + -0,06\cos(21w) + - \\
& 0,01\cos(22w) + -0,01\cos(23w) + -0,07\cos(24w) + -0,18\cos(25w) + -0,31\cos(26w) + - \\
& 0,43\cos(27w) + -0,53\cos(28w) + -0,57\cos(29w) + -0,54\cos(30w) + -0,45\cos(31w) + - \\
& 0,3\cos(32w) + -0,12\cos(33w) + 0,06\cos(34w) + 0,23\cos(35w) + 0,34\cos(36w) + \\
& 0,39\cos(37w) + 0,37\cos(38w) + 0,31\cos(39w) + 0,2\cos(40w) + 0,08\cos(41w) + - \\
& 0,04\cos(42w) + -0,14\cos(43w) + -0,21\cos(44w) + -0,24\cos(45w) + -0,24\cos(46w) + - \\
& 0,22\cos(47w) + -0,2\cos(48w) + -0,17\cos(49w) + -0,15\cos(50w) + -0,14\cos(51w) + - \\
& 0,13\cos(52w) + -0,12\cos(53w) + -0,11\cos(54w) + -0,08\cos(55w) + -0,05\cos(56w) + \\
& 0\cos(57w) + 0,05\cos(58w) + 0,1\cos(59w) + 0,13\cos(60w) + 0,15\cos(61w) + 0,15\cos(62w) \\
& + 0,13\cos(63w) + 0,1\cos(64w) + 0,06\cos(65w) + 0,02\cos(66w) + 0\cos(67w) + - \\
& 0,01\cos(68w) + 0,01\cos(69w) + 0,05\cos(70w) + 0,11\cos(71w) + 0,17\cos(72w) + \\
& 0,23\cos(73w) + 0,28\cos(74w) + 0,31\cos(75w) + 0,3\cos(76w) + 0,27\cos(77w) + \\
& 0,22\cos(78w) + 0,15\cos(79w) + 0,07\cos(80w) + -0,01\cos(81w) + -0,07\cos(82w) + - \\
& 0,12\cos(83w) + -0,14\cos(84w) + -0,15\cos(85w) + -0,15\cos(86w) + -0,14\cos(87w) + - \\
& 0,14\cos(88w) + -0,13\cos(89w) + -0,14\cos(90w) + -0,14\cos(91w) + -0,15\cos(92w) + - \\
& 0,16\cos(93w) + -0,15\cos(94w) + -0,14\cos(95w) + -0,12\cos(96w) + -0,09\cos(97w) + - \\
& 0,06\cos(98w) + -0,03\cos(99w) + -0,02\cos(100w) + -0,02\cos(101w) + -0,03\cos(102w) + - \\
& 0,05\cos(103w) + -0,08\cos(104w) + -0,1\cos(105w) + -0,11\cos(106w) + -0,11\cos(107w) + - \\
& 0,09\cos(108w) + -0,06\cos(109w) + -0,02\cos(110w) + 0,02\cos(111w) + 0,06\cos(112w) + \\
& 0,09\cos(113w) + 0,1\cos(114w) + 0,1\cos(115w) + 0,09\cos(116w) + 0,06\cos(117w) + \\
& 0,04\cos(118w) + 0,01\cos(119w) + -0,02\cos(120w) + -0,05\cos(121w) + -0,07\cos(122w) + - \\
& 0,08\cos(123w) + -0,08\cos(124w) + -0,07\cos(125w) + -0,04\cos(126w) + 0,02\cos(127w) + \\
& 0,12\cos(128w)
\end{aligned}$$

Debido a la cantidad de números en dicha función de transferencia, es mejor mantenerla por bloques, de esta forma se evitará errores de cálculo. El circuito representativo de esto será una cadena de circuitos cada uno representando uno de los 129 elementos que se suman y todo para producir una única vocal. Es preciso tener en cuenta que la función de transferencia varía con cada nueva vocal generada, ya que cambia la forma del tubo. Entonces, ¿es necesario realizar un circuito tan complejo que a pesar de haber probado sus resultados, no va a poder ser producido para ser insertado en una laringe debido a que se necesitarían 5 diferentes cadenas de circuitos, para generar voz y no podrían ser utilizados a voluntad sino dependiendo de cual de todas ellas se escoja? Desafortunadamente, en este punto, la investigación conoce la efectividad del producto y su facilidad para generar vocales. Mas sabe de antemano que la problemática bajo la cual este proyecto comienza, no puede ser resuelta por este medio. Este proyecto sin embargo puede servir en otros

propósitos como el reconocimiento de voz basado en los coeficientes centrales o en la generación de sonidos producidos por medio de síntesis de sonido.

El segundo problema que se observa es la forma en la que dicho circuito debe ser construido. Generar un circuito a partir de cosenos es una ardua labor ya que por lo general, las funciones de transferencia utilizan otro tipo de formas como la forma racional. Es preciso entonces encontrar una forma en la que se pueda generar este circuito sin complicarse mucho ya que definitivamente esa función de transferencia probó sus resultados y estos pueden ser apreciados auditivamente.

Tercero, después de mucho buscar, no se halló un emulador de circuitos eléctricos al que se le pueda ingresar datos de audio, los procese, y a la salida se este, genere audio. Por eso, a pesar de que el comportamiento del circuito este teóricamente aceptado (la función de transferencia sirve), sus resultados no van a poder ser emulados a menos de que estos sean construidos, pero como esa no es la intención de dicha investigación, los resultados van a tener que ser teóricos.

De igual manera, no existe emulador de circuitos acústicos por computador que sea de acceso gratuito y que permita probar la eficacia de la función de transferencia del circuito acústico, pero como la función de transferencia existe y se probó su funcionamiento, se supone que los resultados de dichos circuitos van a ser igualmente positivos.

Para realizar esta conversión fue necesario acudir a la ayuda de la conversión de funciones de transferencia basándose en la funcionalidad del circuito en sí. MATLAB, en sí, permitía una aproximación y mediante cálculos matemáticos. Sin embargo, al realizar el cálculo de la función de transferencia, las modificaciones eran supremamente grandes, y el circuito podía perder su funcionalidad. De esta manera, y tomando como referencia, a manera de ensayo y error, se fueron modificando los parámetros hasta que cada uno de los componentes del modelo para cada una de las vocales fue hallado. Como se mencionó

anteriormente, no se encontró la forma de probar auditivamente que este circuito era el ideal.

A pesar de todo esto, al realizar la analogía acústica, se encontró algo muy interesante. Los valores de longitud coincidían con los valores promedio de una laringe. Adicionalmente, la analogía tipo impedancia generaba resultados impresionantes ya que mostraba tubos unidos, que constituye un gran acierto al ser en general la forma en la que tradicionalmente (sin tener valores reales) se había modelado la laringe desde el siglo XVIII.

Esta analogía fue realizada mediante el estudio de las analogías en general y teniendo como referencia la analogía tipo impedancia por su forma.

## 6. CONCLUSIONES

El modelo acústico para el aparato fonador propuesto en este proyecto de investigación, es un modelo funcional y aplicable para el estudio de la voz. Los resultados obtenidos fueron sorprendentes ya que este sistema se pensaba como utópico o demasiado profesional para ser aplicado, y sin embargo tras largos años de investigación, logró ser una realidad. El problema que este buscaba solucionar era el de las personas que sufrían de cáncer de laringe o traquea y debían perder el aparato fonador quirúrgicamente. Tras grandes esfuerzos se probó que este circuito tal como está descrito en esta investigación no es lo suficientemente eficiente para poder si quiera considerar la posibilidad de insertarlo en una laringe humana con el fin de retornar a estas personas su capacidad de hablar.

Por otro lado este proyecto ayudó a comprobar que a) la función de transferencia de un sonido cualquiera es la superposición de envolventes de frecuencia del mismo sonido a diferentes frecuencias. b) lo que diferencia un sonido de otro puede ser descrito en variaciones de la forma del tubo fonador o como variaciones de la misma forma del tubo a diferente frecuencia. c) La fase ideal de un sonido puede ser encontrada tomando los mismos parámetros de envolventes de frecuencia y buscando el patrón matemático que estas siguen. d) Los sonidos aquí producidos, no representan la absoluta realidad de vocales en español, mas son un reflejo de la toma de referencia utilizada. e) la creación de vocales para efectos de síntesis puede ser lograda de forma eficiente por medio de esta programación y este programa en sí.

La analogía de un circuito es otra forma en la que una función de transferencia de un circuito, puede ser interpretada. Ya sea para fines mecánicos, eléctricos o acústicos, esta función de transferencia se mantiene igual y es quien define la exactitud de los resultados esperados por un circuito cualquiera. De poder comprobar el funcionamiento de dichos circuitos auditivamente, se podría comprobar la efectividad del circuito más no de la

función de transferencia ya que esta es quien define, el comportamiento y el circuito es sólo una manifestación física de esta.

Esta investigación es muy fuerte en su desarrollo de una teoría que hasta hace 2 años fue creada; Sienta un precedente muy grande tanto para la eventual creación de un circuito tangible para personas que pierden el habla como para el avance de la síntesis como esta vista hoy en día. Sin embargo, esta no logró hacer esto por sí misma.; Creó un circuito que no es “insertable” en un sistema humano real; Por esto, necesita más profundización y necesita la creación de un grupo interdisciplinario para eventuales mejoras.

## **7. RECOMENDACIONES**

Con el fin de mejorar el contenido práctico de este proyecto y aminorar sus debilidades, se recomiendan los siguientes puntos: 1) Buscar o crear un software que permita evaluar los circuitos aquí descritos para que auditivamente se pueda determinar si estos son o no reflejo exacto de la función de transferencia para cada vocal descrita a lo largo de este proyecto. 2) Encontrar una solución para poder unificar todos los circuitos en uno sólo, buscando variar el mínimo en sus componentes buscando reducir su complejidad, mientras esta solución permita su fácil manipulación al ser insertada en una laringe. 3) Comprobar por otros medios, como el Articulógrafo Electromagnético si la forma descrita para cada una de las vocales es comparable con los resultados encontrados en esta investigación; de ser así buscar la unificación de teorías para buscar una forma general y universal para cada sonido. 4) Con la ayuda de un equipo médico, buscar materiales aptos para ser insertados en un cuerpo humano para poder transformar el circuito teórico en una realidad.

Todas estas recomendaciones para la continuación de este proyecto sólo buscan dar una solución viable a un problema del que nadie es ajeno y puede llegar a tener. De tener el personal adecuado para la continuación, la Universidad de San Buenaventura podría llegar a trascender barreras internacionales así como la Facultad de Ingeniería y en especial el programa de Ingeniería de Sonido, en la creación de un elemento que puede mejorar la calidad de vida de millones de personas alrededor del mundo.

## APENDICES

### APENDICE A

Nombre: \_\_\_\_\_

A Continuación usted va a oír un sonido emulado de una vocal, en orden aleatorio.  
Identifique de qué vocal se trata, mediante esta tabla.

1.	AO	EO	IO	OO	UO
2.	AO	EO	IO	OO	UO
3.	AO	EO	IO	OO	UO
4.	AO	EO	IO	OO	UO
5.	AO	EO	IO	OO	UO
6.	AO	EO	IO	OO	UO
7.	AO	EO	IO	OO	UO
8.	AO	EO	IO	OO	UO
9.	AO	EO	IO	OO	UO
10.	AO	EO	IO	OO	UO
11.	AO	EO	IO	OO	UO
12.	AO	EO	IO	OO	UO
13.	AO	EO	IO	OO	UO
14.	AO	EO	IO	OO	UO
15.	AO	EO	IO	OO	UO

## APÉNDICE B

A

	JW	TP	TS	TA	LA	LP	HL	FX
Valor	-2.7	1.8	0.3	-0.4	0.0	0.0	0.1	Varia

E

	JW	TP	TS	TA	LA	LP	HL	FX
Valor	-1.7	-1.3	0.9	-2.0	1.0	-0.4	0.3	Varia

I

	JW	TP	TS	TA	LA	LP	HL	FX
Valor	1.3	-1.7	0.8	-2.5	0.8	-1.0	0.0	Varia

O

	JW	TP	TS	TA	LA	LP	HL	FX
Valor	-0.6	2.8	1.6	0.2	-0.2	0.0	0.0	Varia

U

	JW	TP	TS	TA	LA	LP	HL	FX
Valor	0.8	2.0	1.3	-2.2	-0.9	1.2	0.0	Varia

## APÉNDICE C

Programa que retorna los coeficientes cepstrales de la vocal a para amplitud

```
% Introducción de los valores
clear all
clc

% Se insertan los valores picos de frecuencia (en escala relativa) de
% cada "frame" en la mayor cantidad de armónicos posibles
a_m20 = [...
106.32 -19.34
212.64 -19.04
320.31 -23.36
426.63 -20.48
532.95 -18.06
639.27 -5.40
745.59 -15.69
853.25 -22.72
959.57 -26.29
1065.89 -27.81
1172.21 -16.00
1278.53 -22.64
1384.85 -36.25
1492.52 -45.82
1598.84 -47.05
1705.16 -50.45
1811.48 -53.13
1917.80 -54.92
2025.47 -55.68
2131.79 -52.46
2238.11 -41.59
2344.43 -43.16];

a_m15 = [...
114.40 -18.58
228.79 -17.83
343.19 -22.33
456.23 -18.70
570.63 -11.19
685.03 -5.57
799.42 -22.01
913.82 -26.84
1028.21 -25.26
1141.26 -18.78
1255.65 -18.64
1370.05 -36.97
1484.45 -42.80
1598.84 -44.86
1713.24 -49.94
1827.63 -52.55
1940.68 -52.92
2055.08 -51.52
2169.47 -50.72
2283.87 -35.31
2398.26 -50.10
2512.66 -56.36];
```

```
a_m10 = [...  
122.47 -19.47  
246.29 -17.72  
368.76 -20.83  
491.23 -19.05  
615.04 -6.08  
737.51 -11.52  
861.33 -19.99  
983.80 -23.46  
1106.27 -19.24  
1230.08 -14.56  
1352.55 -37.02  
1475.02 -38.82  
1598.84 -43.04  
1721.31 -47.72  
1845.13 -50.16  
1967.60 -50.74  
2090.07 -49.11  
2213.88 -41.77  
2336.35 -38.38  
2458.82 -57.81  
2582.64 -61.33  
2705.11 -62.97];
```

```
a_m05 = [...  
130.55 -22.31  
262.44 -20.37  
392.98 -22.17  
523.53 -18.92  
655.42 -4.68  
785.96 -21.02  
917.85 -23.51  
1048.40 -27.10  
1178.94 -14.58  
1310.83 -25.41  
1441.38 -34.93  
1571.92 -44.99  
1703.81 -47.84  
1834.36 -49.68  
1964.90 -52.79  
2096.80 -49.95  
2227.34 -41.12  
2359.23 -43.24  
2489.78 -56.89  
2620.32 -64.06  
2752.21 -65.86  
2882.76 -67.12];
```

```
a_00 = [...  
139.97 -19.10  
279.93 -17.91  
421.24 -19.79  
561.21 -10.59  
701.17 -6.02  
841.14 -22.33  
981.11 -23.48  
1122.42 -17.38  
1262.38 -16.67  
1402.35 -35.66  
1542.32 -41.26
```

```
1682.28 -43.85
1823.59 -48.01
1963.56 -48.34
2103.52 -47.63
2243.49 -35.47
2383.46 -42.33
2524.77 -54.25
2664.73 -60.95
2804.70 -62.65
2944.67 -64.03
3084.63 -64.42];
```

```
a_05 = [...
149.39 -19.74
298.77 -17.63
448.16 -19.40
597.55 -7.36
746.93 -10.92
896.32 -19.34
1045.71 -22.82
1195.09 -10.72
1344.48 -24.79
1493.87 -32.74
1643.25 -41.20
1792.64 -44.39
1942.03 -46.06
2091.41 -46.21
2240.80 -33.93
2390.19 -40.64
2539.57 -52.02
2688.96 -59.72
2838.35 -61.83
2987.73 -63.00
3137.12 -63.21
3286.51 -59.45];
```

```
a_10 = [...
156.12 -22.24
313.58 -18.67
469.69 -21.13
627.15 -4.84
783.27 -15.47
940.73 -19.53
1096.85 -16.60
1254.31 -15.59
1410.42 -36.95
1567.89 -41.64
1724.00 -42.62
1880.12 -47.50
2037.58 -45.12
2193.70 -38.85
2351.16 -37.29
2507.27 -54.24
2664.73 -60.74
2820.85 -61.80
2978.31 -64.23
3134.43 -63.67
3291.89 -61.43
3448.00 -48.82];
```

```
a_15 = [...
```

```
164.19 -23.75
329.73 -19.44
493.92 -19.39
659.45 -3.40
823.65 -26.40
989.18 -23.42
1153.37 -14.30
1318.91 -22.69
1483.10 -33.87
1648.64 -45.00
1812.83 -44.82
1977.02 -46.23
2142.55 -42.02
2306.74 -32.32
2472.28 -57.47
2636.47 -57.23
2802.01 -61.13
2966.20 -64.29
3131.74 -64.44
3295.93 -61.78
3461.46 -49.70
3625.65 -50.48];
```

```
a_20 = [...
173.61 -20.13
347.22 -16.92
520.83 -13.95
694.45 -5.75
869.40 -21.45
1043.01 -23.29
1216.63 -10.99
1390.24 -32.64
1563.85 -34.79
1737.46 -41.40
1911.07 -45.00
2084.68 -45.31
2258.29 -32.12
2433.25 -42.15
2606.86 -51.44
2780.47 -58.39
2954.09 -59.81
3127.70 -60.55
3301.31 -58.79
3474.92 -44.71
3648.53 -48.49
3822.14 -52.31];
```

```
a_25 = [...
184.38 -18.55
367.41 -13.61
551.79 -9.55
734.82 -5.64
919.20 -16.89
1102.23 -14.18
1286.61 -14.63
1469.64 -33.62
1654.02 -38.03
1837.05 -40.33
2021.43 -40.52
2204.46 -32.21
2388.84 -34.76
```

```

2571.87 -49.08
2756.25 -54.68
2940.63 -57.22
3123.66 -56.43
3308.04 -56.15
3491.07 -38.66
3675.45 -46.26
3858.48 -45.26
4042.86 -49.26];

```

```

%% matrices de datos

```

```

%Se define una matriz (m*mk) para amplitud, otra para frecuencia y un
%vector para el promedio de cada frecuencia por frame

```

```

a(:,1) = a_m20(:,2);    f(:,1) = a_m20(:,1);    av(1,1) = mean(f(:,1));
a(:,2) = a_m15(:,2);    f(:,2) = a_m15(:,1);    av(1,2) = mean(f(:,2));
a(:,3) = a_m10(:,2);    f(:,3) = a_m10(:,1);    av(1,3) = mean(f(:,3));
a(:,4) = a_m05(:,2);    f(:,4) = a_m05(:,1);    av(1,4) = mean(f(:,4));
a(:,5) = a_00(:,2);     f(:,5) = a_00(:,1);     av(1,5) = mean(f(:,5));
a(:,6) = a_05(:,2);     f(:,6) = a_05(:,1);     av(1,6) = mean(f(:,6));
a(:,7) = a_10(:,2);     f(:,7) = a_10(:,1);     av(1,7) = mean(f(:,7));
a(:,8) = a_15(:,2);     f(:,8) = a_15(:,1);     av(1,8) = mean(f(:,8));
a(:,9) = a_20(:,2);     f(:,9) = a_20(:,1);     av(1,9) = mean(f(:,9));
a(:,10) = a_25(:,2);    f(:,10) = a_25(:,1);    av(1,10) = mean(f(:,10));

```

```

% se observan los diferentes armónicos en un gráfico

```

```

subplot(3,1,1)

```

```

plot(f,a,'*')

```

```

hold on

```

```

%%

```

```

%se define el numero de armónicos nk y el número de frames

```

```

nk = length(a);

```

```

m = 10;

```

```

%Se define el vector uk

```

```

uk = ones(nk,1);

```

```

%Se genera una matriz para crear los W

```

```

for l = 1:nk

```

```

    ma(l,:) = [zeros(1,(l-1)), ones(1,1), zeros(1,nk-(l))];

```

```

end

```

```

%se crea w que una ponderación en frecuencia para que todas las frecuencias

```

```

%tengan la misma importancia

```

```

max = 4000;

```

```

for k = 1:m

```

```

    w(:,k) = max./(log(0.001*max+1)*(f(:,k)+1000))

```

```

end

```

```

figure(2); hold off

```

```

plot(w)

```

```

%Se crean los W a partir de los w y la matriz ma

```

```

for l = 1:nk

```

```

    for z = 1:nk

```

```

        W1(l,z) = ma(l,z)*w(1,1);

```

```

        W2(l,z) = ma(l,z)*w(1,2);

```

```

        W3(l,z) = ma(l,z)*w(1,3);

```

```

        W4(l,z) = ma(l,z)*w(1,4);

```

```

        W5(l,z) = ma(l,z)*w(1,5);

```

```

        W6(l,z) = ma(l,z)*w(1,6);

```

```

        W7(l,z) = ma(l,z)*w(1,7);

```

```

W8(1,z) = ma(1,z)*w(1,8);
W9(1,z) = ma(1,z)*w(1,9);
W10(1,z) = ma(1,z)*w(1,10)
end
end

% Se establece el orden del cepstrum y el periodo de muestreo de las tomas
p = 128;
T = 1/44100;

%Se genera omega que es la frecuencia en radianes
for k = 1:10
    omega(:,k) = 2*pi()*T*f(:,k);
end

% Se crea la matrix Pk (nk*p+1)
for n = 0:p
    for l = 1:nk
        P1(1,n+1) = (2)*cos(n*omega(1,1)); P1(:,1)= 1;
        P2(1,n+1) = (2)*cos(n*omega(1,2)); P2(:,1)= 1;
        P3(1,n+1) = (2)*cos(n*omega(1,3)); P3(:,1)= 1;
        P4(1,n+1) = (2)*cos(n*omega(1,4)); P4(:,1)= 1;
        P5(1,n+1) = (2)*cos(n*omega(1,5)); P5(:,1)= 1;
        P6(1,n+1) = (2)*cos(n*omega(1,6)); P6(:,1)= 1;
        P7(1,n+1) = (2)*cos(n*omega(1,7)); P7(:,1)= 1;
        P8(1,n+1) = (2)*cos(n*omega(1,8)); P8(:,1)= 1;
        P9(1,n+1) = (2)*cos(n*omega(1,9)); P9(:,1)= 1;
        P10(1,n+1) = (2)*cos(n*omega(1,10)); P10(:,1)= 1
    end
end

% ----- // -----

%% Proceso para determinar Ca
%El valor inicial de ca es un vector (1*p+1)= cero
ca(p+1,1) = zeros;

% Se calcula el offset dk tomando Pk Y Wk, y ca en cero
d(:,1) = (uk'*W1*(a(:,1)-P1*ca))/(uk'*W1*uk);
d(:,2) = (uk'*W2*(a(:,2)-P2*ca))/(uk'*W2*uk);
d(:,3) = (uk'*W3*(a(:,3)-P3*ca))/(uk'*W3*uk);
d(:,4) = (uk'*W4*(a(:,4)-P4*ca))/(uk'*W4*uk);
d(:,5) = (uk'*W5*(a(:,5)-P5*ca))/(uk'*W5*uk);
d(:,6) = (uk'*W6*(a(:,6)-P6*ca))/(uk'*W6*uk);
d(:,7) = (uk'*W7*(a(:,7)-P7*ca))/(uk'*W7*uk);
d(:,8) = (uk'*W8*(a(:,8)-P8*ca))/(uk'*W8*uk);
d(:,9) = (uk'*W9*(a(:,9)-P9*ca))/(uk'*W9*uk);
d(:,10) = (uk'*W10*(a(:,10)-P10*ca))/(uk'*W10*uk);

rho = T*f(1,:);
lamda = 1*(10^(-3));

%Se genera una matrix (p+1*p+1)para crear los R
for n = 0:p
    ma(n+1,:) = [zeros(1,(n)), ones(1,1), zeros(1,(p)-(n))];
end

%Se crean los R a partir de la matrix ma2
for n = 0:p
    R(n+1,:) = ma(n+1,:) * n^2;
end

% se calcula yk de nuevo para calcular otro Da

```

```

for k = 1:m
    yk(:,k)= a(:,k)- d(:,k)*uk;
end

% Genera Da el indice de error...
Da(1,:) = 2*((rho(1,:)*(yk(:,1)- P1*ca)'*W1*(yk(:,1)- P1*ca)+(lamda*ca'*R*ca)))+
...
    (rho(2,:)*(yk(:,2)- P2*ca)'*W2*(yk(:,2)- P2*ca)+(lamda*ca'*R*ca)))+ ...
    (rho(3,:)*(yk(:,3)- P3*ca)'*W3*(yk(:,3)- P3*ca)+(lamda*ca'*R*ca)))+ ...
    (rho(4,:)*(yk(:,4)- P4*ca)'*W4*(yk(:,4)- P4*ca)+(lamda*ca'*R*ca)))+ ...
    (rho(5,:)*(yk(:,5)- P5*ca)'*W5*(yk(:,5)- P5*ca)+(lamda*ca'*R*ca)))+ ...
    (rho(6,:)*(yk(:,6)- P6*ca)'*W6*(yk(:,6)- P6*ca)+(lamda*ca'*R*ca)))+ ...
    (rho(7,:)*(yk(:,7)- P7*ca)'*W7*(yk(:,7)- P7*ca)+(lamda*ca'*R*ca)))+ ...
    (rho(8,:)*(yk(:,8)- P8*ca)'*W8*(yk(:,8)- P8*ca)+(lamda*ca'*R*ca)))+ ...
    (rho(9,:)*(yk(:,9)- P9*ca)'*W9*(yk(:,9)- P9*ca)+(lamda*ca'*R*ca)))+ ...
    (rho(10,:)*(yk(:,10)- P10*ca)'*W10*(yk(:,10)-
P10*ca)+(lamda*ca'*R*ca)));

%Se le asigna un valor nuevo a ca diferente de cero con una división left
izq = rho(1,:)*(P1'*W1*P1)+lamda*R + rho(2,:)*(P2'*W2*P2)+lamda*R + ...
rho(3,:)*(P3'*W3*P3)+lamda*R + rho(4,:)*(P4'*W4*P4)+lamda*R + ...
rho(5,:)*(P5'*W5*P5)+lamda*R + rho(6,:)*(P6'*W6*P6)+lamda*R + ...
rho(7,:)*(P7'*W7*P7)+lamda*R + rho(8,:)*(P8'*W8*P8)+lamda*R + ...
rho(9,:)*(P9'*W9*P9)+lamda*R + rho(10,:)*(P10'*W10*P10)+lamda*R);

der = rho(1,:)*(P1'*W1*(yk(:,1))) + (rho(2,:)*(P2'*W2*(yk(:,2)))) + ...
rho(3,:)*(P3'*W3*(yk(:,3))) + (rho(4,:)*(P4'*W4*(yk(:,4)))) + ...
rho(5,:)*(P5'*W5*(yk(:,5))) + (rho(6,:)*(P6'*W6*(yk(:,6)))) + ...
rho(7,:)*(P7'*W7*(yk(:,7))) + (rho(8,:)*(P8'*W8*(yk(:,8)))) + ...
rho(9,:)*(P9'*W9*(yk(:,9))) + (rho(10,:)*(P10'*W10*(yk(:,10)))));

%Se calculan los nuevos valores de ca
ca = izq ./ der;

%Se calcula Dk para los nuevos valores de ca
d(:,1) = (uk'*W1*(a(:,1)-P1*ca))/(uk'*W1*uk);
d(:,2) = (uk'*W2*(a(:,2)-P2*ca))/(uk'*W2*uk);
d(:,3) = (uk'*W3*(a(:,3)-P3*ca))/(uk'*W3*uk);
d(:,4) = (uk'*W4*(a(:,4)-P4*ca))/(uk'*W4*uk);
d(:,5) = (uk'*W5*(a(:,5)-P5*ca))/(uk'*W5*uk);
d(:,6) = (uk'*W6*(a(:,6)-P6*ca))/(uk'*W6*uk);
d(:,7) = (uk'*W7*(a(:,7)-P7*ca))/(uk'*W7*uk);
d(:,8) = (uk'*W8*(a(:,8)-P8*ca))/(uk'*W8*uk);
d(:,9) = (uk'*W9*(a(:,9)-P9*ca))/(uk'*W9*uk);
d(:,10) = (uk'*W10*(a(:,10)-P10*ca))/(uk'*W10*uk);

%se calcula yk para el nuevo dk
for k = 1:m
    yk(:,k)= a(:,k)- d(:,k).*uk;
end

%Se calcula Da otra vez para ver si converge
Da(2,:) = 2*((rho(1,:)*(yk(:,1)- P1*ca)'*W1*(yk(:,1)- P1*ca)+(lamda*ca'*R*ca)))+
...
    (rho(2,:)*(yk(:,2)- P2*ca)'*W2*(yk(:,2)- P2*ca)+(lamda*ca'*R*ca)))+ ...
    (rho(3,:)*(yk(:,3)- P3*ca)'*W3*(yk(:,3)- P3*ca)+(lamda*ca'*R*ca)))+ ...
    (rho(4,:)*(yk(:,4)- P4*ca)'*W4*(yk(:,4)- P4*ca)+(lamda*ca'*R*ca)))+ ...
    (rho(5,:)*(yk(:,5)- P5*ca)'*W5*(yk(:,5)- P5*ca)+(lamda*ca'*R*ca)))+ ...
    (rho(6,:)*(yk(:,6)- P6*ca)'*W6*(yk(:,6)- P6*ca)+(lamda*ca'*R*ca)))+ ...
    (rho(7,:)*(yk(:,7)- P7*ca)'*W7*(yk(:,7)- P7*ca)+(lamda*ca'*R*ca)))+ ...
    (rho(8,:)*(yk(:,8)- P8*ca)'*W8*(yk(:,8)- P8*ca)+(lamda*ca'*R*ca)))+ ...

```

```

        (rho(9,:) * ((yk(:,9) - P9*ca)' * W9 * (yk(:,9) - P9*ca) + (lamda*ca)' * R * ca))) + ...
        (rho(10,:) * ((yk(:,10) - P10*ca)' * W10 * (yk(:,10) -
P10*ca) + (lamda*ca)' * R * ca)));

% para que el proceso termine, el valor absoluto de rata de la diferencia de la
% distosión actual (Da1) con la actual (Da0) sobre la distosión actual debe
% ser menor a 0.0001

terminar(1,:) = abs((Da(2,:) - Da(1,:)) ./ Da(2,:));

%Se le asigna un valor nuevo a ca diferente al anterior con una división left
izq = rho(1,:) * ((P1' * W1 * P1) + lamda * R) + rho(2,:) * ((P2' * W2 * P2) + lamda * R) + ...
      rho(3,:) * ((P3' * W3 * P3) + lamda * R) + rho(4,:) * ((P4' * W4 * P4) + lamda * R) + ...
      rho(5,:) * ((P5' * W5 * P5) + lamda * R) + rho(6,:) * ((P6' * W6 * P6) + lamda * R) + ...
      rho(7,:) * ((P7' * W7 * P7) + lamda * R) + rho(8,:) * ((P8' * W8 * P8) + lamda * R) + ...
      rho(9,:) * ((P9' * W9 * P9) + lamda * R) + rho(10,:) * ((P10' * W10 * P10) + lamda * R);

der = rho(1,:) * (P1' * W1 * (yk(:,1))) + (rho(2,:) * (P2' * W2 * (yk(:,2)))) + ...
      rho(3,:) * (P3' * W3 * (yk(:,3))) + (rho(4,:) * (P4' * W4 * (yk(:,4)))) + ...
      rho(5,:) * (P5' * W5 * (yk(:,5))) + (rho(6,:) * (P6' * W6 * (yk(:,6)))) + ...
      rho(7,:) * (P7' * W7 * (yk(:,7))) + (rho(8,:) * (P8' * W8 * (yk(:,8)))) + ...
      rho(9,:) * (P9' * W9 * (yk(:,9))) + (rho(10,:) * (P10' * W10 * (yk(:,10))));

%Se calculan los nuevos valores de ca
ca = izq ./ der;

%Se calcula Dk para los nuevos valores de ca
d(:,1) = (uk' * W1 * (a(:,1) - P1 * ca)) / (uk' * W1 * uk);
d(:,2) = (uk' * W2 * (a(:,2) - P2 * ca)) / (uk' * W2 * uk);
d(:,3) = (uk' * W3 * (a(:,3) - P3 * ca)) / (uk' * W3 * uk);
d(:,4) = (uk' * W4 * (a(:,4) - P4 * ca)) / (uk' * W4 * uk);
d(:,5) = (uk' * W5 * (a(:,5) - P5 * ca)) / (uk' * W5 * uk);
d(:,6) = (uk' * W6 * (a(:,6) - P6 * ca)) / (uk' * W6 * uk);
d(:,7) = (uk' * W7 * (a(:,7) - P7 * ca)) / (uk' * W7 * uk);
d(:,8) = (uk' * W8 * (a(:,8) - P8 * ca)) / (uk' * W8 * uk);
d(:,9) = (uk' * W9 * (a(:,9) - P9 * ca)) / (uk' * W9 * uk);
d(:,10) = (uk' * W10 * (a(:,10) - P10 * ca)) / (uk' * W10 * uk);

%se calcula yk para el nuevo dk
for k = 1:m
    yk(:,k) = a(:,k) - d(:,k) * uk;
end

Da(3,:) = 2 * ((rho(1,:) * ((yk(:,1) - P1*ca)' * W1 * (yk(:,1) - P1*ca) + (lamda*ca)' * R * ca))) +
...
        (rho(2,:) * ((yk(:,2) - P2*ca)' * W2 * (yk(:,2) - P2*ca) + (lamda*ca)' * R * ca))) + ...
        (rho(3,:) * ((yk(:,3) - P3*ca)' * W3 * (yk(:,3) - P3*ca) + (lamda*ca)' * R * ca))) + ...
        (rho(4,:) * ((yk(:,4) - P4*ca)' * W4 * (yk(:,4) - P4*ca) + (lamda*ca)' * R * ca))) + ...
        (rho(5,:) * ((yk(:,5) - P5*ca)' * W5 * (yk(:,5) - P5*ca) + (lamda*ca)' * R * ca))) + ...
        (rho(6,:) * ((yk(:,6) - P6*ca)' * W6 * (yk(:,6) - P6*ca) + (lamda*ca)' * R * ca))) + ...
        (rho(7,:) * ((yk(:,7) - P7*ca)' * W7 * (yk(:,7) - P7*ca) + (lamda*ca)' * R * ca))) + ...
        (rho(8,:) * ((yk(:,8) - P8*ca)' * W8 * (yk(:,8) - P8*ca) + (lamda*ca)' * R * ca))) + ...
        (rho(9,:) * ((yk(:,9) - P9*ca)' * W9 * (yk(:,9) - P9*ca) + (lamda*ca)' * R * ca))) + ...
        (rho(10,:) * ((yk(:,10) - P10*ca)' * W10 * (yk(:,10) -
P10*ca) + (lamda*ca)' * R * ca)));

terminar(2,:) = abs((Da(3,:) - Da(2,:)) ./ Da(3,:));

for kkk = 4:6
    izq = rho(1,:) * ((P1' * W1 * P1) + lamda * R) + rho(2,:) * ((P2' * W2 * P2) + lamda * R) +
...

```

```

rho(3,:) * ((P3'*W3*P3)+lamda*R) + rho(4,:) * ((P4'*W4*P4)+lamda*R) + ...
rho(5,:) * ((P5'*W5*P5)+lamda*R) + rho(6,:) * ((P6'*W6*P6)+lamda*R) + ...
rho(7,:) * ((P7'*W7*P7)+lamda*R) + rho(8,:) * ((P8'*W8*P8)+lamda*R) + ...
rho(9,:) * ((P9'*W9*P9)+lamda*R) + rho(10,:) * ((P10'*W10*P10)+lamda*R);
% Yoshi's comment - rho must be introduced for the computation of der.
der = rho(1,:) * (P1'*W1*(yk(:,1))) + (rho(2,:) * (P2'*W2*(yk(:,2)))) + ...
rho(3,:) * (P3'*W3*(yk(:,3))) + (rho(7,:) * (P4'*W4*(yk(:,4)))) + ...
rho(5,:) * (P5'*W5*(yk(:,5))) + (rho(6,:) * (P6'*W6*(yk(:,6)))) + ...
rho(7,:) * (P7'*W7*(yk(:,7))) + (rho(8,:) * (P8'*W8*(yk(:,8)))) + ...
rho(9,:) * (P9'*W9*(yk(:,9))) + (rho(10,:) * (P10'*W10*(yk(:,10))));
ca = izq ./ der;
d(:,1) = (uk'*W1*(a(:,1)-P1*ca))/(uk'*W1*uk);
d(:,2) = (uk'*W2*(a(:,3)-P2*ca))/(uk'*W2*uk);
d(:,3) = (uk'*W3*(a(:,4)-P3*ca))/(uk'*W3*uk);
d(:,4) = (uk'*W4*(a(:,2)-P4*ca))/(uk'*W4*uk);
d(:,5) = (uk'*W5*(a(:,5)-P5*ca))/(uk'*W5*uk);
d(:,6) = (uk'*W6*(a(:,6)-P6*ca))/(uk'*W6*uk);
d(:,7) = (uk'*W7*(a(:,7)-P7*ca))/(uk'*W7*uk);
d(:,8) = (uk'*W8*(a(:,8)-P8*ca))/(uk'*W8*uk);
d(:,9) = (uk'*W9*(a(:,9)-P9*ca))/(uk'*W9*uk);
d(:,10) = (uk'*W10*(a(:,10)-P10*ca))/(uk'*W10*uk);
for k = 1:m
    yk(:,k) = a(:,k) - d(:,k)*uk;
end
Da(kkk,:) = 2 * ((rho(1,:) * ((yk(:,1) - P1*ca)'*W1*(yk(:,1) - ...
(rho(2,:) * ((yk(:,2) - P2*ca)'*W2*(yk(:,2) - P2*ca) + (lamda*ca'*R*ca))) + ...
(rho(3,:) * ((yk(:,3) - P3*ca)'*W3*(yk(:,3) - P3*ca) + (lamda*ca'*R*ca))) + ...
(rho(4,:) * ((yk(:,4) - P4*ca)'*W4*(yk(:,4) - P4*ca) + (lamda*ca'*R*ca))) + ...
(rho(5,:) * ((yk(:,5) - P5*ca)'*W5*(yk(:,5) - P5*ca) + (lamda*ca'*R*ca))) + ...
(rho(6,:) * ((yk(:,6) - P6*ca)'*W6*(yk(:,6) - P6*ca) + (lamda*ca'*R*ca))) + ...
(rho(7,:) * ((yk(:,7) - P7*ca)'*W7*(yk(:,7) - P7*ca) + (lamda*ca'*R*ca))) + ...
(rho(8,:) * ((yk(:,8) - P8*ca)'*W8*(yk(:,8) - P8*ca) + (lamda*ca'*R*ca))) + ...
(rho(9,:) * ((yk(:,9) - P9*ca)'*W9*(yk(:,9) - P9*ca) + (lamda*ca'*R*ca))) + ...
(rho(10,:) * ((yk(:,10) - P10*ca)'*W10*(yk(:,10) -
P10*ca) + (lamda*ca'*R*ca))));
terminar(kkk-1,:) = abs((Da(kkk,:) - Da(kkk-1,:))/Da(kkk,:));
end

%%
figure(1)
fre = (0:4200)';
om = 2*pi*fre*(1/44100);

lnXejw = 0;
for x = 1:p+1
    lnXejw = (ca(x)*cos((x-1)*(om)))+ lnXejw;
end

subplot(3,1,2)
plot(f,yk,'k*')
hold on

subplot(3,1,3)
plot(fre,lnXejw,'b')
xlabel('frecuencia')
ylabel('energía')
title('Grafica de la A')

figure(3)
% Con esta función se escalan los valores como los valores originales
lnXejw = Xejw *2.3-6;

```

```
plot(f,a,'*')
hold on
plot(fre,lnXejw,'r')
```

## Programa que retorna los coeficientes cepstrales de la vocal a para fase

```
%% se activan los valores en a.m
A

%% Procedimiento para encontrar los coeficientes de las fases
teta_am20 = [...
106.3202      84.978844
212.6404     -107.528198
320.3064     -151.05014
426.6266     -42.501827
532.9468      90.077942
639.267       136.460403
745.5872     127.372208
853.2532      77.090691
959.5734    -160.490402
1065.8936    -58.887062
1172.2137     28.197346
1278.5339     11.292423
1384.8541    149.847763
1492.5201     68.840858
1598.8403   -179.091385
1705.1605    -51.799927
1811.4807     65.930046
1917.8009   -169.915619
2025.4669    133.913162
2131.7871   -118.065422
2238.1074     5.465909
2344.4275   -14.728888];

teta_am15 = [...
114.3951      99.214035
228.7903     -78.131447
343.1854      73.422821
456.2347      10.244127
570.6299     154.473114
685.025      150.508881
799.4202     -93.463379
913.8153      3.388234
1028.2104    131.221848
1141.2598     85.129646
1255.6549     81.4021
1370.05     -140.092789
1484.4452    -55.067623
1598.8403     93.482857
1713.2355   -126.438957
1827.6306     5.453722
1940.6799    -33.729042
2055.0752    110.71666
2169.4702   -94.997505
2283.8652   -54.215744
2398.2605   -47.408318
2512.6558   119.282494];
```

```
teta_am10 = [...  
122.4701    107.592133  
246.286    119.278023  
368.7561   -79.339249  
491.2262    44.059181  
615.0421   -11.152923  
737.5122   -18.359163  
861.3281   -42.323727  
983.7982    85.982811  
1106.2683  -128.684143  
1230.0842   66.208374  
1352.5543  128.826721  
1475.0244  -84.956795  
1598.8403  -104.932121  
1721.3104   33.673935  
1845.1263   -2.278245  
1967.5964  141.173843  
2090.0664  -80.594673  
2213.8823  -106.318054  
2336.3525  -104.268509  
2458.8228   36.22533  
2582.6387  -25.717861  
2705.1086  129.252441  
];
```

```
teta_am05 = [...  
130.545    132.761383  
262.4359   169.754791  
392.981    -3.619797  
523.526    161.004425  
655.4169   58.564869  
785.9619   100.037987  
917.8528   112.826172  
1048.3978  -70.025848  
1178.9429   35.531185  
1310.8337  -114.406876  
1441.3788   74.860092  
1571.9238  -118.665001  
1703.8147  -144.917511  
1834.3597   28.049578  
1964.9048  -165.498291  
2096.7957  173.825714  
2227.3408  -15.224427  
2359.2314  -172.905319  
2489.7766   7.423501  
2620.3218  157.027771  
2752.2124  148.638748  
2882.7576  -34.832027];
```

```
teta_a00 = [...  
139.9658   -115.271393  
279.9316   -145.844131  
421.2433   -31.838579  
561.2091   -123.334648  
701.1749    24.795708  
841.1407   -74.46463  
981.1066   176.271179  
1122.4182  -81.091667  
1262.384   57.202908  
1402.3499  -23.302006  
1542.3157  -147.540985
```

```
1682.2815 144.5504
1823.5931 -112.189339
1963.559 167.868729
2103.5249 80.497833
2243.4907 -13.413422
2383.4565 121.736862
2524.7681 -117.242996
2664.7339 158.364365
2804.6997 77.033813
2944.6655 6.236383
3084.6313 -69.535835];
```

```
teta_a05 = [...
149.3866 49.76263
298.7732 -174.928345
448.1598 -75.837029
597.5464 -17.416811
746.933 -72.613571
896.3196 17.24456
1045.7062 109.828606
1195.0928 103.188721
1344.4794 51.888317
1493.866 163.865005
1643.2526 -104.129181
1792.6392 -31.491308
1942.0258 59.433689
2091.4124 131.083008
2240.7988 -155.971542
2390.1855 141.211166
2539.5723 -113.741013
2688.9587 -32.607895
2838.3452 49.568146
2987.7319 142.936096
3137.1187 -129.059601
3286.5051 -47.250721];
```

```
teta_a10 = [...
156.1157 -41.250881
313.5773 -175.840454
469.693 -162.414749
627.1545 -42.700329
783.2703 171.618881
940.7318 -11.298923
1096.8475 -7.18212
1254.3091 22.942234
1410.4248 1.416415
1567.8864 132.687088
1724.0021 141.125504
1880.1178 136.380722
2037.5793 -58.694092
2193.6951 -57.329754
2351.1567 -32.254612
2507.2725 -32.597721
2664.7339 119.182922
2820.8496 119.182091
2978.311 -56.55912
3134.4268 -59.832886
3291.8884 111.365997
3448.0042 104.672325];
```

```
teta_a15 = [...
```

```
164.1907    32.49963
329.7272   -28.011995
493.9178    69.464737
659.4543   -156.525055
823.645     163.943298
989.1815    41.074722
1153.3722   110.352753
1318.9087  -152.502365
1483.0994  -63.209057
1648.6359   174.960129
1812.8265  -132.922653
1977.0172  -55.821548
2142.5537  -154.298706
2306.7444   141.161301
2472.2808  -68.021072
2636.4717   18.075388
2802.0081  -68.893364
2966.1987   2.949433
3131.7354  -101.617653
3295.9258  -37.299072
3461.4624  -156.751038
3625.6531   139.608734];
```

```
teta_a20 = [...
173.6115    46.080967
347.2229   176.845352
520.8344   -83.829292
694.4458  -150.611084
869.4031   113.935646
1043.0145  175.347046
1216.626   138.150925
1390.2374   89.658447
1563.8489  -154.316528
1737.4603  -50.361748
1911.0718  22.520426
2084.6831  101.558311
2258.2947  152.571167
2433.252   -95.122307
2606.8633   9.644178
2780.4749  90.163765
2954.0864  169.720703
3127.6978  -100.283745
3301.3091  -26.213493
3474.9207  37.90464
3648.5322  -15.78826
3822.1436  82.59993];
```

```
teta_a25 = [...
184.3781    167.66748
367.4103   -139.227829
551.7883   -22.374897
734.8206   49.754307
919.1986   121.126549
1102.2308  -86.710205
1286.6089  27.481237
1469.6411  -46.139572
1654.0192  -53.158573
1837.0514  82.70446
2021.4294  -149.240982
2204.4617  -38.37112
2388.8398  87.749687
```

```

2571.8721    158.714554
2756.25      91.22261
2940.6279   -79.887047
3123.6602    87.660538
3308.0383    25.259068
3491.0706    63.26432
3675.4487   -56.2757
3858.481     79.667221
4042.8589   -20.798384];

```

```

%% Formación de matrices de cálculo
teta(:,1) = pi*(teta_am20(:,2))/180;
teta(:,2) = pi*(teta_am15(:,2))/180;
teta(:,3) = pi*(teta_am10(:,2))/180;
teta(:,4) = pi*(teta_am05(:,2))/180;
teta(:,5) = pi*(teta_a00(:,2))/180;
teta(:,6) = pi*(teta_a05(:,2))/180;
teta(:,7) = pi*(teta_a10(:,2))/180;
teta(:,8) = pi*(teta_a15(:,2))/180;
teta(:,9) = pi*(teta_a20(:,2))/180;
teta(:,10) = pi*(teta_a25(:,2))/180;

```

```

Vref = 0;
for n = 1:p
    Vref = (-2)*(ca(n,:)*sin(n*omega))+ Vref;
end

```

```

Tr = T/1000;
yyk = 0;
for n = 0:p
    yyk = (ca(n+1,:)*cos(n*omega)) + yyk;
end

```

```

for n = -p:-1
    yyk = (ca((-n)+1,:)*cos(n*omega)) + yyk;
end

```

```

Rk = 0;
for k = 1:m
    Rk = (1/pi)*(exp(a(k,:)+yyk(k,:)).*cos(2*pi*f(k,:)*Tr + teta(k,:)-
Vref(k,:)) + Rk;
end

```

```

%falta arg y t

```

```

vk(:,1) = teta_am20(:,2);
vk(:,2) = teta_am20(:,2);
vk(:,3) = teta_am20(:,2);
vk(:,4) = teta_am20(:,2);
vk(:,5) = teta_am20(:,2);
vk(:,6) = teta_am20(:,2);
vk(:,7) = teta_am20(:,2);
vk(:,8) = teta_am20(:,2);
vk(:,9) = teta_am20(:,2);
vk(:,10) = teta_am20(:,2);

```

```

% Se crea la matrix Qk (nk*p+1)

```

```

for n = 1:p
    for l = 1:nk
        Q1(l,n) = (-2)*sin(n*omega(l,1));
        Q2(l,n) = (-2)*sin(n*omega(l,2));
    end
end

```

```

        Q3(1,n) = (-2)*sin(n*omega(1,3));
        Q4(1,n) = (-2)*sin(n*omega(1,4));
        Q5(1,n) = (-2)*sin(n*omega(1,5));
        Q6(1,n) = (-2)*sin(n*omega(1,6));
        Q7(1,n) = (-2)*sin(n*omega(1,7));
        Q8(1,n) = (-2)*sin(n*omega(1,8));
        Q9(1,n) = (-2)*sin(n*omega(1,9));
        Q10(1,n) = (-2)*sin(n*omega(1,10));
    end
end
%Se genera una matriz para crear los R
for n = 1:p
    ma3(n,:) = [zeros(1,(n-1)), ones(1,1), zeros(1,(p)-(n))];
end

%Se crean los R a partir de la matriz ma2
for n = 1:p
    RR(n,:) = ma3(n,:) * (n-1)^2;
end

cp = zeros(p,1);
Dp(1,:) = 2*((rho(1,)*(vk(:,1)- Q1*cp)'*W1*(vk(:,1)-
Q1*cp)+(lamda*cp'*RR*cp)))+ ...
    (rho(2,)*(vk(:,2)- Q2*cp)'*W2*(vk(:,2)-
Q2*cp)+(lamda*cp'*RR*cp)))+ ...
    (rho(3,)*(vk(:,3)- Q3*cp)'*W3*(vk(:,3)-
Q3*cp)+(lamda*cp'*RR*cp)))+ ...
    (rho(4,)*(vk(:,4)- Q4*cp)'*W4*(vk(:,4)-
Q4*cp)+(lamda*cp'*RR*cp)))+ ...
    (rho(5,)*(vk(:,5)- Q5*cp)'*W5*(vk(:,5)-
Q5*cp)+(lamda*cp'*RR*cp)))+ ...
    (rho(6,)*(vk(:,6)- Q6*cp)'*W6*(vk(:,6)-
Q6*cp)+(lamda*cp'*RR*cp)))+ ...
    (rho(7,)*(vk(:,7)- Q7*cp)'*W7*(vk(:,7)-
Q7*cp)+(lamda*cp'*RR*cp)))+ ...
    (rho(8,)*(vk(:,8)- Q8*cp)'*W8*(vk(:,8)-
Q8*cp)+(lamda*cp'*RR*cp)))+ ...
    (rho(9,)*(vk(:,9)- Q9*cp)'*W9*(vk(:,9)-
Q9*cp)+(lamda*cp'*RR*cp)))+ ...
    (rho(10,)*(vk(:,10)- Q10*cp)'*W10*(vk(:,10)-
Q10*cp)+(lamda*cp'*RR*cp)));

der2 = rho(1,)*(Q1'*W1*(vk(:,1))) + rho(2,)*(Q2'*W2*(vk(:,2))) + ...
    rho(3,)*(Q3'*W3*(vk(:,3))) + rho(4,)*(Q4'*W4*(vk(:,4))) + ...
    rho(5,)*(Q5'*W5*(vk(:,5))) + rho(6,)*(Q6'*W6*(vk(:,6))) + ...
    rho(7,)*(Q7'*W7*(vk(:,7))) + rho(8,)*(Q8'*W8*(vk(:,8))) + ...
    rho(9,)*(Q9'*W9*(vk(:,9))) + rho(10,)*(Q10'*W10*(vk(:,10)));

izq2 = rho(1,)*((Q1'*W1*Q1)+(lamda*RR))+ rho(2,)*((Q2'*W2*Q2)+(lamda*RR))+ ...
    rho(3,)*((Q3'*W3*Q3)+(lamda*RR))+ rho(4,)*((Q4'*W4*Q4)+(lamda*RR))+ ...
    rho(5,)*((Q5'*W5*Q5)+(lamda*RR))+ rho(6,)*((Q6'*W6*Q6)+(lamda*RR))+ ...
    rho(7,)*((Q7'*W7*Q7)+(lamda*RR))+ rho(8,)*((Q8'*W8*Q8)+(lamda*RR))+ ...
    rho(9,)*((Q9'*W9*Q9)+(lamda*RR))+ rho(10,)*((Q10'*W10*Q10)+(lamda*RR));

%Se calcula tk para los nuevos valores de cp
cp=(der2 \ izq2)';

%Se calcula Dp para ver si converge
Dp(2,:) = 2*((rho(1,)*(vk(:,1)- Q1*cp)'*W1*(vk(:,1)-
Q1*cp)+(lamda*cp'*RR*cp)))+ ...

```

```

        (rho(2,:) * ((vk(:,2) - Q2*cp) ' * W2 * (vk(:,2) -
Q2*cp) + (lamda*cp' * RR*cp))) + ...
        (rho(3,:) * ((vk(:,3) - Q3*cp) ' * W3 * (vk(:,3) -
Q3*cp) + (lamda*cp' * RR*cp))) + ...
        (rho(4,:) * ((vk(:,4) - Q4*cp) ' * W4 * (vk(:,4) -
Q4*cp) + (lamda*cp' * RR*cp))) + ...
        (rho(5,:) * ((vk(:,5) - Q5*cp) ' * W5 * (vk(:,5) -
Q5*cp) + (lamda*cp' * RR*cp))) + ...
        (rho(6,:) * ((vk(:,6) - Q6*cp) ' * W6 * (vk(:,6) -
Q6*cp) + (lamda*cp' * RR*cp))) + ...
        (rho(7,:) * ((vk(:,7) - Q7*cp) ' * W7 * (vk(:,7) -
Q7*cp) + (lamda*cp' * RR*cp))) + ...
        (rho(8,:) * ((vk(:,8) - Q8*cp) ' * W8 * (vk(:,8) -
Q8*cp) + (lamda*cp' * RR*cp))) + ...
        (rho(9,:) * ((vk(:,9) - Q9*cp) ' * W9 * (vk(:,9) -
Q9*cp) + (lamda*cp' * RR*cp))) + ...
        (rho(10,:) * ((vk(:,10) - Q10*cp) ' * W10 * (vk(:,10) -
Q10*cp) + (lamda*cp' * RR*cp))));

```

```

% para que el proceso termine, el valor absoluto de rata de la diferencia de la
% distorsión actual (Da1) con la actual (Da0) sobre la distorsión actual debe
% ser menor a 0.0001
terminar2(1,:) = abs((Dp(2,:) - Dp(1,:)) / Dp(2,:));

```

```

%Se le asigna un valor nuevo a cp diferente al anterior con una división left
izq2 = rho(1,:) * ((Q1' * W1 * Q1) + (lamda*RR)) + rho(2,:) * ((Q2' * W2 * Q2) + (lamda*RR)) + ...
        rho(3,:) * ((Q3' * W3 * Q3) + (lamda*RR)) + rho(4,:) * ((Q4' * W4 * Q4) + (lamda*RR)) + ...
        rho(5,:) * ((Q5' * W5 * Q5) + (lamda*RR)) + rho(6,:) * ((Q6' * W6 * Q6) + (lamda*RR)) + ...
        rho(7,:) * ((Q7' * W7 * Q7) + (lamda*RR)) + rho(8,:) * ((Q8' * W8 * Q8) + (lamda*RR)) + ...
        rho(9,:) * ((Q9' * W9 * Q9) + (lamda*RR)) + rho(10,:) * ((Q10' * W10 * Q10) + (lamda*RR));

```

```

der2 = rho(1,:) * (Q1' * W1 * (vk(:,1))) + rho(2,:) * (Q2' * W2 * (vk(:,2))) + ...
        rho(3,:) * (Q3' * W3 * (vk(:,3))) + rho(4,:) * (Q4' * W4 * (vk(:,4))) + ...
        rho(5,:) * (Q5' * W5 * (vk(:,5))) + rho(6,:) * (Q6' * W6 * (vk(:,6))) + ...
        rho(7,:) * (Q7' * W7 * (vk(:,7))) + rho(8,:) * (Q8' * W8 * (vk(:,8))) + ...
        rho(9,:) * (Q9' * W9 * (vk(:,9))) + rho(10,:) * (Q10' * W10 * (vk(:,10)));

```

```

%Se calculan los nuevos valores de cp
cp = (der2 \ izq2)';

```

```

%Se calcula Dp para ver si converge

```

```

Dp(3,:) = 2 * ((rho(1,:) * ((vk(:,1) - Q1*cp) ' * W1 * (vk(:,1) -
Q1*cp) + (lamda*cp' * RR*cp))) + ...
        (rho(2,:) * ((vk(:,2) - Q2*cp) ' * W2 * (vk(:,2) -
Q2*cp) + (lamda*cp' * RR*cp))) + ...
        (rho(3,:) * ((vk(:,3) - Q3*cp) ' * W3 * (vk(:,3) -
Q3*cp) + (lamda*cp' * RR*cp))) + ...
        (rho(4,:) * ((vk(:,4) - Q4*cp) ' * W4 * (vk(:,4) -
Q4*cp) + (lamda*cp' * RR*cp))) + ...
        (rho(5,:) * ((vk(:,5) - Q5*cp) ' * W5 * (vk(:,5) -
Q5*cp) + (lamda*cp' * RR*cp))) + ...
        (rho(6,:) * ((vk(:,6) - Q6*cp) ' * W6 * (vk(:,6) -
Q6*cp) + (lamda*cp' * RR*cp))) + ...
        (rho(7,:) * ((vk(:,7) - Q7*cp) ' * W7 * (vk(:,7) -
Q7*cp) + (lamda*cp' * RR*cp))) + ...
        (rho(8,:) * ((vk(:,8) - Q8*cp) ' * W8 * (vk(:,8) -
Q8*cp) + (lamda*cp' * RR*cp))) + ...
        (rho(9,:) * ((vk(:,9) - Q9*cp) ' * W9 * (vk(:,9) -
Q9*cp) + (lamda*cp' * RR*cp))) + ...
        (rho(10,:) * ((vk(:,10) - Q10*cp) ' * W10 * (vk(:,10) -
Q10*cp) + (lamda*cp' * RR*cp))));

```

```

% para que el proceso termine, el valor absoluto de rata de la diferencia de la
% distosión actual (Da1) con la actual (Da0) sobre la distosión actual debe
% ser menor a 0.0001
terminar2(2,:) = abs((Da(3,:)-Da(2,:))/Da(3,:));

for kkk = 4:6
    izq2 = rho(1,:) * ((Q1'*W1*Q1)+(lamda*RR)) + rho(2,:) * ((Q2'*W2*Q2)+(lamda*RR)) +
    ...
    rho(3,:) * ((Q3'*W3*Q3)+(lamda*RR)) + rho(4,:) * ((Q4'*W4*Q4)+(lamda*RR)) +
    ...
    rho(5,:) * ((Q5'*W5*Q5)+(lamda*RR)) + rho(6,:) * ((Q6'*W6*Q6)+(lamda*RR)) +
    ...
    rho(7,:) * ((Q7'*W7*Q7)+(lamda*RR)) + rho(8,:) * ((Q8'*W8*Q8)+(lamda*RR)) +
    ...
    rho(9,:) * ((Q9'*W9*Q9)+(lamda*RR)) +
rho(10,:) * ((Q10'*W10*Q10)+(lamda*RR));
    der2 = rho(1,:) * (Q1'*W1*(vk(:,1))) + rho(2,:) * (Q2'*W2*(vk(:,2))) + ...
    rho(3,:) * (Q3'*W3*(vk(:,3))) + rho(4,:) * (Q4'*W4*(vk(:,4))) + ...
    rho(5,:) * (Q5'*W5*(vk(:,5))) + rho(6,:) * (Q6'*W6*(vk(:,6))) + ...
    rho(7,:) * (Q7'*W7*(vk(:,7))) + rho(8,:) * (Q8'*W8*(vk(:,8))) + ...
    rho(9,:) * (Q9'*W9*(vk(:,9))) + rho(10,:) * (Q10'*W10*(vk(:,10)));
    cp = (der2 \ izq2)';
    Dp(kkk,:) = 2*((rho(1,:) * ((vk(:,1) - Q1*cp)'*W1*(vk(:,1) -
Q1*cp)+(lamda*cp'*RR*cp))) + ...
    (rho(2,:) * ((vk(:,2) - Q2*cp)'*W2*(vk(:,2) -
Q2*cp)+(lamda*cp'*RR*cp))) + ...
    (rho(3,:) * ((vk(:,3) - Q3*cp)'*W3*(vk(:,3) -
Q3*cp)+(lamda*cp'*RR*cp))) + ...
    (rho(4,:) * ((vk(:,4) - Q4*cp)'*W4*(vk(:,4) -
Q4*cp)+(lamda*cp'*RR*cp))) + ...
    (rho(5,:) * ((vk(:,5) - Q5*cp)'*W5*(vk(:,5) -
Q5*cp)+(lamda*cp'*RR*cp))) + ...
    (rho(6,:) * ((vk(:,6) - Q6*cp)'*W6*(vk(:,6) -
Q6*cp)+(lamda*cp'*RR*cp))) + ...
    (rho(7,:) * ((vk(:,7) - Q7*cp)'*W7*(vk(:,7) -
Q7*cp)+(lamda*cp'*RR*cp))) + ...
    (rho(8,:) * ((vk(:,8) - Q8*cp)'*W8*(vk(:,8) -
Q8*cp)+(lamda*cp'*RR*cp))) + ...
    (rho(9,:) * ((vk(:,9) - Q9*cp)'*W9*(vk(:,9) -
Q9*cp)+(lamda*cp'*RR*cp))) + ...
    (rho(10,:) * ((vk(:,10) - Q10*cp)'*W10*(vk(:,10) -
Q10*cp)+(lamda*cp'*RR*cp)))));
    terminar2(kkk-1,:) = abs((Dp(kkk,:)-Dp(kkk-1,:))/Dp(kkk,:));
end

cp(p+1,:) = 0;
for g = 0:p-1
    cp((p+1)-g,:) = cp(p-g,:);
end
cp(1,:) = 0;

argXejw = 0;
for x = 1:p+1
    argXejw = cp(x)*sin((x)*om) + argXejw;
end

Xejw = lnXejw + argXejw;
Xejw = exp(Xejw);
Y = real(ifft(Xejw));

```

## APÉNDICE D

Programación en Excel para determinar los picos de frecuencias (este proceso resulta de pasar los resultados en texto del SpectraLAB )

;Freq(Hz)	Relative Amplitude (dB): Left	Frecuencia	Amplitud Relativa	e (-2,0)	=PERCENTIL(D2:D2904; 0,94)
942078	-88350868	=A2/10000	=B2/1000000	=SI(F2="";C2)	=SI(D2<F\$1;D2)
955536	-79121056	=A3/10000	=B3/1000000	=SI(F3="";C3)	=SI(D3<F\$1;D3)
968994	-75494118	=A4/10000	=B4/1000000	=SI(F4="";C4)	=SI(D4<F\$1;D4)
982452	-73049583	=A5/10000	=B5/1000000	=SI(F5="";C5)	=SI(D5<F\$1;D5)
995911	-71856178	=A6/10000	=B6/1000000	=SI(F6="";C6)	=SI(D6<F\$1;D6)
1009369	-68296043	=A7/10000	=B7/1000000	=SI(F7="";C7)	=SI(D7<F\$1;D7)
1022827	-59481037	=A8/10000	=B8/1000000	=SI(F8="";C8)	=SI(D8<F\$1;D8)
1036285	-47736332	=A9/10000	=B9/1000000	=SI(F9="";C9)	=SI(D9<F\$1;D9)
1049744	-23207516	=A10/10000	=B10/1000000	=SI(F10="";C10)	=SI(D10<F\$1;D10)
1063202	-14599268	=A11/10000	=B11/1000000	=SI(F11="";C11)	=SI(D11<F\$1;D11)
1076660	-18241697	=A12/10000	=B12/1000000	=SI(F12="";C12)	=SI(D12<F\$1;D12)
1090118	-41580040	=A13/10000	=B13/1000000	=SI(F13="";C13)	=SI(D13<F\$1;D13)
1103577	-54475433	=A14/10000	=B14/1000000	=SI(F14="";C14)	=SI(D14<F\$1;D14)
1117035	-62855843	=A15/10000	=B15/1000000	=SI(F15="";C15)	=SI(D15<F\$1;D15)
1130493	-71264137	=A16/10000	=B16/1000000	=SI(F16="";C16)	=SI(D16<F\$1;D16)
1143951	-82368706	=A17/10000	=B17/1000000	=SI(F17="";C17)	=SI(D17<F\$1;D17)
1157410	-79560814	=A18/10000	=B18/1000000	=SI(F18="";C18)	=SI(D18<F\$1;D18)
1170868	-77796822	=A19/10000	=B19/1000000	=SI(F19="";C19)	=SI(D19<F\$1;D19)
1184326	-78359428	=A20/10000	=B20/1000000	=SI(F20="";C20)	=SI(D20<F\$1;D20)
1197784	-81660515	=A21/10000	=B21/1000000	=SI(F21="";C21)	=SI(D21<F\$1;D21)
1211243	-85939278	=A22/10000	=B22/1000000	=SI(F22="";C22)	=SI(D22<F\$1;D22)
1224701	-89224442	=A23/10000	=B23/1000000	=SI(F23="";C23)	=SI(D23<F\$1;D23)

Esta programación se ve como en la tabla a continuación

;Freq(Hz)	Relative Amplitude (dB): Left	Frecuencia	Amplitud Relativa	e (-2,0)	-69,2299923
942.078	-88.350.868	94,21	-88,35		
955.536	-79.121.056	95,55	-79,12		
968.994	-75.494.118	96,90	-75,49		
982.452	-73.049.583	98,25	-73,05		
995.911	-71.856.178	99,59	-71,86		
1.009.369	-68.296.043	100,94	-68,30	100,9369	-68.296043
1.022.827	-59.481.037	102,28	-59,48	102,2827	-59,481037
1.036.285	-47.736.332	103,63	-47,74	103,6285	-47,736332
1.049.744	-23.207.516	104,97	-23,21	104,9744	-23,207516
1.063.202	-14.599.268	106,32	-14,60	106,3202	-14,599268
1.076.660	-18.241.697	107,67	-18,24	107,666	-18,241697
1.090.118	-41.580.040	109,01	-41,58	109,0118	-41,58004
1.103.577	-54.475.433	110,36	-54,48	110,3577	-54,475433
1.117.035	-62.855.843	111,70	-62,86	111,7035	-62,855843
1.130.493	-71.264.137	113,05	-71,26		
1.143.951	-82.368.706	114,40	-82,37		
1.157.410	-79.560.814	115,74	-79,56		
1.170.868	-77.796.822	117,09	-77,80		
1.184.326	-78.359.428	118,43	-78,36		
1.197.784	-81.660.515	119,78	-81,66		
1.211.243	-85.939.278	121,12	-85,94		
1.224.701	-89.224.442	122,47	-89,22		

Después, los resultados son copiados en la siguiente tabla para conocer los valores de cada pico por frecuencia armónica

Frecuencia	Amplitud Logaritmica	106.32		1		2
106,32	-14,60	=H2/J\$1	=SI(L\$175=\$I2;\$H2;""")	=SI(REDONDEAR(\$J2;0)=L\$1;\$I2;""")	=SI(N\$175=\$I2;\$H2;""")	=SI(REDONDEAR(\$J2;0)=N\$1;\$I2;""")
107,67	-18,24	=H3/J\$1	=SI(L\$175=\$I3;\$H3;""")	=SI(REDONDEAR(\$J3;0)=L\$1;\$I3;""")	=SI(N\$175=\$I3;\$H3;""")	=SI(REDONDEAR(\$J3;0)=N\$1;\$I3;""")
109,01	-41,58	=H4/J\$1	=SI(L\$175=\$I4;\$H4;""")	=SI(REDONDEAR(\$J4;0)=L\$1;\$I4;""")	=SI(N\$175=\$I4;\$H4;""")	=SI(REDONDEAR(\$J4;0)=N\$1;\$I4;""")
110,36	-54,48	=H5/J\$1	=SI(L\$175=\$I5;\$H5;""")	=SI(REDONDEAR(\$J5;0)=L\$1;\$I5;""")	=SI(N\$175=\$I5;\$H5;""")	=SI(REDONDEAR(\$J5;0)=N\$1;\$I5;""")
111,70	-62,86	=H6/J\$1	=SI(L\$175=\$I6;\$H6;""")	=SI(REDONDEAR(\$J6;0)=L\$1;\$I6;""")	=SI(N\$175=\$I6;\$H6;""")	=SI(REDONDEAR(\$J6;0)=N\$1;\$I6;""")
205,91	-68,41	=H7/J\$1	=SI(L\$175=\$I7;\$H7;""")	=SI(REDONDEAR(\$J7;0)=L\$1;\$I7;""")	=SI(N\$175=\$I7;\$H7;""")	=SI(REDONDEAR(\$J7;0)=N\$1;\$I7;""")
207,26	-63,07	=H8/J\$1	=SI(L\$175=\$I8;\$H8;""")	=SI(REDONDEAR(\$J8;0)=L\$1;\$I8;""")	=SI(N\$175=\$I8;\$H8;""")	=SI(REDONDEAR(\$J8;0)=N\$1;\$I8;""")
208,60	-54,83	=H9/J\$1	=SI(L\$175=\$I9;\$H9;""")	=SI(REDONDEAR(\$J9;0)=L\$1;\$I9;""")	=SI(N\$175=\$I9;\$H9;""")	=SI(REDONDEAR(\$J9;0)=N\$1;\$I9;""")
209,95	-44,34	=H10/J\$1	=SI(L\$175=\$I10;\$H10;""")	=SI(REDONDEAR(\$J10;0)=L\$1;\$I10;""")	=SI(N\$175=\$I10;\$H10;""")	=SI(REDONDEAR(\$J10;0)=N\$1;\$I10;""")
211,29	-25,41	=H11/J\$1	=SI(L\$175=\$I11;\$H11;""")	=SI(REDONDEAR(\$J11;0)=L\$1;\$I11;""")	=SI(N\$175=\$I11;\$H11;""")	=SI(REDONDEAR(\$J11;0)=N\$1;\$I11;""")
212,64	-13,78	=H12/J\$1	=SI(L\$175=\$I12;\$H12;""")	=SI(REDONDEAR(\$J12;0)=L\$1;\$I12;""")	=SI(N\$175=\$I12;\$H12;""")	=SI(REDONDEAR(\$J12;0)=N\$1;\$I12;""")
213,99	-15,19	=H13/J\$1	=SI(L\$175=\$I13;\$H13;""")	=SI(REDONDEAR(\$J13;0)=L\$1;\$I13;""")	=SI(N\$175=\$I13;\$H13;""")	=SI(REDONDEAR(\$J13;0)=N\$1;\$I13;""")
215,33	-31,94	=H14/J\$1	=SI(L\$175=\$I14;\$H14;""")	=SI(REDONDEAR(\$J14;0)=L\$1;\$I14;""")	=SI(N\$175=\$I14;\$H14;""")	=SI(REDONDEAR(\$J14;0)=N\$1;\$I14;""")
216,68	-47,03	=H15/J\$1	=SI(L\$175=\$I15;\$H15;""")	=SI(REDONDEAR(\$J15;0)=L\$1;\$I15;""")	=SI(N\$175=\$I15;\$H15;""")	=SI(REDONDEAR(\$J15;0)=N\$1;\$I15;""")
218,02	-56,40	=H16/J\$1	=SI(L\$175=\$I16;\$H16;""")	=SI(REDONDEAR(\$J16;0)=L\$1;\$I16;""")	=SI(N\$175=\$I16;\$H16;""")	=SI(REDONDEAR(\$J16;0)=N\$1;\$I16;""")
219,37	-64,33	=H17/J\$1	=SI(L\$175=\$I17;\$H17;""")	=SI(REDONDEAR(\$J17;0)=L\$1;\$I17;""")	=SI(N\$175=\$I17;\$H17;""")	=SI(REDONDEAR(\$J17;0)=N\$1;\$I17;""")
313,58	-66,36	=H18/J\$1	=SI(L\$175=\$I18;\$H18;""")	=SI(REDONDEAR(\$J18;0)=L\$1;\$I18;""")	=SI(N\$175=\$I18;\$H18;""")	=SI(REDONDEAR(\$J18;0)=N\$1;\$I18;""")
314,92	-58,47	=H19/J\$1	=SI(L\$175=\$I19;\$H19;""")	=SI(REDONDEAR(\$J19;0)=L\$1;\$I19;""")	=SI(N\$175=\$I19;\$H19;""")	=SI(REDONDEAR(\$J19;0)=N\$1;\$I19;""")
316,27	-48,81	=H20/J\$1	=SI(L\$175=\$I20;\$H20;""")	=SI(REDONDEAR(\$J20;0)=L\$1;\$I20;""")	=SI(N\$175=\$I20;\$H20;""")	=SI(REDONDEAR(\$J20;0)=N\$1;\$I20;""")
317,61	-33,02	=H21/J\$1	=SI(L\$175=\$I21;\$H21;""")	=SI(REDONDEAR(\$J21;0)=L\$1;\$I21;""")	=SI(N\$175=\$I21;\$H21;""")	=SI(REDONDEAR(\$J21;0)=N\$1;\$I21;""")
318,96	-17,59	=H22/J\$1	=SI(L\$175=\$I22;\$H22;""")	=SI(REDONDEAR(\$J22;0)=L\$1;\$I22;""")	=SI(N\$175=\$I22;\$H22;""")	=SI(REDONDEAR(\$J22;0)=N\$1;\$I22;""")
320,31	-16,80	=H23/J\$1	=SI(L\$175=\$I23;\$H23;""")	=SI(REDONDEAR(\$J23;0)=L\$1;\$I23;""")	=SI(N\$175=\$I23;\$H23;""")	=SI(REDONDEAR(\$J23;0)=N\$1;\$I23;""")
321,65	-29,39	=H24/J\$1	=SI(L\$175=\$I24;\$H24;""")	=SI(REDONDEAR(\$J24;0)=L\$1;\$I24;""")	=SI(N\$175=\$I24;\$H24;""")	=SI(REDONDEAR(\$J24;0)=N\$1;\$I24;""")
323,00	-47,29	=H25/J\$1	=SI(L\$175=\$I25;\$H25;""")	=SI(REDONDEAR(\$J25;0)=L\$1;\$I25;""")	=SI(N\$175=\$I25;\$H25;""")	=SI(REDONDEAR(\$J25;0)=N\$1;\$I25;""")
324,34	-57,44	=H26/J\$1	=SI(L\$175=\$I26;\$H26;""")	=SI(REDONDEAR(\$J26;0)=L\$1;\$I26;""")	=SI(N\$175=\$I26;\$H26;""")	=SI(REDONDEAR(\$J26;0)=N\$1;\$I26;""")
325,69	-65,84	=H27/J\$1	=SI(L\$175=\$I27;\$H27;""")	=SI(REDONDEAR(\$J27;0)=L\$1;\$I27;""")	=SI(N\$175=\$I27;\$H27;""")	=SI(REDONDEAR(\$J27;0)=N\$1;\$I27;""")
419,90	-61,47	=H28/J\$1	=SI(L\$175=\$I28;\$H28;""")	=SI(REDONDEAR(\$J28;0)=L\$1;\$I28;""")	=SI(N\$175=\$I28;\$H28;""")	=SI(REDONDEAR(\$J28;0)=N\$1;\$I28;""")
421,24	-53,53	=H29/J\$1	=SI(L\$175=\$I29;\$H29;""")	=SI(REDONDEAR(\$J29;0)=L\$1;\$I29;""")	=SI(N\$175=\$I29;\$H29;""")	=SI(REDONDEAR(\$J29;0)=N\$1;\$I29;""")
422,59	-44,94	=H30/J\$1	=SI(L\$175=\$I30;\$H30;""")	=SI(REDONDEAR(\$J30;0)=L\$1;\$I30;""")	=SI(N\$175=\$I30;\$H30;""")	=SI(REDONDEAR(\$J30;0)=N\$1;\$I30;""")
423,93	-31,35	=H31/J\$1	=SI(L\$175=\$I31;\$H31;""")	=SI(REDONDEAR(\$J31;0)=L\$1;\$I31;""")	=SI(N\$175=\$I31;\$H31;""")	=SI(REDONDEAR(\$J31;0)=N\$1;\$I31;""")
425,28	-10,32	=H32/J\$1	=SI(L\$175=\$I32;\$H32;""")	=SI(REDONDEAR(\$J32;0)=L\$1;\$I32;""")	=SI(N\$175=\$I32;\$H32;""")	=SI(REDONDEAR(\$J32;0)=N\$1;\$I32;""")
426,63	-7,32	=H33/J\$1	=SI(L\$175=\$I33;\$H33;""")	=SI(REDONDEAR(\$J33;0)=L\$1;\$I33;""")	=SI(N\$175=\$I33;\$H33;""")	=SI(REDONDEAR(\$J33;0)=N\$1;\$I33;""")
427,97	-16,73	=H34/J\$1	=SI(L\$175=\$I34;\$H34;""")	=SI(REDONDEAR(\$J34;0)=L\$1;\$I34;""")	=SI(N\$175=\$I34;\$H34;""")	=SI(REDONDEAR(\$J34;0)=N\$1;\$I34;""")
429,32	-39,22	=H35/J\$1	=SI(L\$175=\$I35;\$H35;""")	=SI(REDONDEAR(\$J35;0)=L\$1;\$I35;""")	=SI(N\$175=\$I35;\$H35;""")	=SI(REDONDEAR(\$J35;0)=N\$1;\$I35;""")
430,66	-50,49	=H36/J\$1	=SI(L\$175=\$I36;\$H36;""")	=SI(REDONDEAR(\$J36;0)=L\$1;\$I36;""")	=SI(N\$175=\$I36;\$H36;""")	=SI(REDONDEAR(\$J36;0)=N\$1;\$I36;""")
			=SUMA(K2:K40)	=MAX(L2:L40)	=SUMA(M2:M40)	=MAX(N2:N40)

La tabla anterior se ve así:

Frecuencia	Amplitud Logaritmica	106,32		1		2		3
106,32	-14,60	100,00%	106,32	-14,60				
107,67	-18,24	101,27%		-18,24				
109,01	-41,58	102,53%		-41,58				
110,36	-54,48	103,80%		-54,48				
111,70	-62,86	105,06%		-62,86				
205,91	-68,41	193,67%				-68,41		
207,26	-63,07	194,94%				-63,07		
208,60	-54,83	196,20%				-54,83		
209,95	-44,34	197,47%				-44,34		
211,29	-25,41	198,73%				-25,41		
212,64	-13,78	200,00%			212,64	-13,78		
213,99	-15,19	201,27%				-15,19		
215,33	-31,94	202,53%				-31,94		
216,68	-47,03	203,80%				-47,03		
218,02	-56,40	205,06%				-56,40		
219,37	-64,33	206,33%				-64,33		
313,58	-66,36	294,94%						-66,36
314,92	-58,47	296,20%						-58,47
316,27	-48,81	297,47%						-48,81
317,61	-33,02	298,73%						-33,02
318,96	-17,59	300,00%						-17,59
320,31	-16,80	301,27%					320,31	-16,80
321,65	-29,39	302,53%						-29,39
323,00	-47,29	303,80%						-47,29
324,34	-57,44	305,06%						-57,44
325,69	-65,84	306,33%						-65,84
			106,32	-14,60	212,64	-13,78	320,31	-16,80

## APENDICE E

Programación para retornar los valores de FFT a los valores que produce MATLAB y así por medio de la IFFT producir las vocales

```
lnXejw = lnXejw+70;

blanco = zeros (length(lnXejw),1);
fff = 106;

for l = 1:nk
    blanco(fff*l)= ones (1,1);
end

Xejw = lnXejw .* blanco;
Xejw =Xejw-70;
lnXejw = lnXejw-70;

figure(4)
plot (f,a,'o')
hold on
plot (Xejw)

Xejw = -Xejw;
maxxx = min(Xejw);
Xejw = -Xejw;
amp = Xejw-(-maxxx);
energy =100*(10.^(amp/20));

figure(5)
plot(energy,'r')
hold on

cola = length(energy);

for r = 1:cola-1
    energy (cola+r,:)=energy (cola-r+1);
end

gato = ifft(energy);
gato(1,1)= 0;

ffttest = fft(gato,(2^15));
Pyy = ffttest.*conj(ffttest)/(2^15);

quefrecy = 44100*(0:2^14)/(2^15);
plot(quefrecy,Pyy(1:(2^14)+1),'g')
title('Contenido Espectral de vocal')
xlabel('frequency (Hz)')

wavwrite(gato,44100,16,'I')
```

## BIBLIOGRAFÍA

- Analogías Electroacústicas, <http://www.geocities.com/ResearchTriangle/Lab/8941/analog1.htm>, 2007
- Analogias Electromecanicas, <http://www.arrakis.es/~ppriego/analogia/analogia.htm>
- Assad, Hussam; Jahshan, Reem, An Acoustic Model of the Respiratory Tract, 1995
- Barkov Alexej; Barkova, Natalja; Condition Assessment and Life Prediction of Rolling Element Bearings - Part 1; VibroAcoustical Systems and Technologies, St.Petersburg, Russia, <http://www.vibrotek.com/articles/sv95/part1/index.htm>, 2007
- Barrera, Vanessa; Armenta, Daniel; Reyes, Jorge; Vela Mauricio; Fonemas vocálicos del Castellano, Proyecto Integrador, Universidad de San Buenaventura, 2004.
- Cakewalk, Desktop Music Handbook, Glossary of MIDI and Digital Audio Terms, <http://www.cakewalk.com/tips/desktop-glossary.asp>
- Cornut, Guy; La voix; Presses Universitaires de France, Paris; 1983.
- Deng, L.; Lennig, M.; Mermelstein, P., Modeling microsegments of stop consonants in a hidden Markov, model based word recognizer, INRS- Telecommunication- Montreal, Quebec HS E 1H6, Canada, Enero 1990.
- Deng, L.; Lennig, M.; Mermelstein; Use of vowel duration information in a large vocabulary word Recognizer INRS- Telecommunications, 3 Place du Commerce. Montreal, Quebec HSE 1H6, Canada
- Dudley, Homer; Fundamentals of Speech Synthesis; Journal of the Audio Engineering Society; Oct 1955.
- Enciclopedia Encarta, Laringe, 2005.
- Engwall, Olov; Vocal tract modelling in 3D, TMH-QPSR 1-2/1999
- Etter, Jean François; Cáncer de la laringe, Jueves Nov 24 2005 , <http://www.stop-tabac.ch/sp/Photos/Poster04.htm>, Traducido del francés por José Antonio Jaén con la colaboración de Ana Sánchez
- Faúndez Zanuy, Marcos; Modelado predictivo no lineal de la señal de voz aplicado a codificación y reconocimiento de locutor, UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA, Departament de Teoria del Senyal i Comunicacions, Agosto 1998
- Gupta, V.; Mermelstein P., Effects of speaker accent on the performance of a speaker-independent, isolated-word recognizer

La laringe, <http://www.encolombia.com/medicina/otorrino/otorrinosupl30402-laringetraquea2.htm>, oct 29 2005.

Mark R. Petersen, Exercises for Musical Analysis and Synthesis in Matlab, Febrero 15, 2004

Martínez Bernaldo de Quirós, Cristian; Complementos de Sonido y Audiofrecuencia: Fundamentos Básicos Del Reconocimiento De Voz, NP: 18756  
<http://www.adictosaltrabajo.com/tutoriales/pdfs/complementosr.pdf>

Merlmeilstein, Paul; Articulatory model pf Speech production, Journal of the Acoustic Society of America

Mermelstein, Paul; Threshold of degradation for frequency-distributed band-limited noise in continuous speech; Bell Northern Research and INRS-Telecommunications, University of Qudbec, Nuns'Island, Qudbec H3E 1H6, Canada, 25 Junio 1982.

Miyara, Federico; Acústica Del Tracto Vocal, 1995

Miyara, Federico; la voz humana, Comunicación y lenguaje, 1999

Mosquera Rivera, Ismael , Sistema de conversión de Voz a MIDI, Proyecto Fin de Carrera, Ingeniería Técnica en Informática de Sistemas, Universitat Pompeu Fabra, Junio 2004

Oppenheim, A. V. & Schafer, R.W. (1989), Discrete-Time Signal Processing, Prentice Hall.

Ponce-Dávalos J. L., Y.V. Shkvarko, Caracterización Espectral Mediante el Método Modificado por Regularización de Prony Fusionado con Estimadores Espectrales No Paramétricos de Alta Resolución, 2003, IEEE,  
[http://www.ewh.ieee.org/reg/9/etrans/vol3issue3July2005/3TLA3\\_5Ponce-Davalos.pdf](http://www.ewh.ieee.org/reg/9/etrans/vol3issue3July2005/3TLA3_5Ponce-Davalos.pdf),

Pueo Ortega, Basilio, Romá Romero Miguel; Electroacústica, Altavoces y micrófonos, Pearson; Prentice may, 2003

Rubin, Philip; Vatikiotis-Bateson, "Measuring and modeling speech production", that appears as a chapter in: S.L. Hopp, M.J. Owren, and C.S. Evans (Eds.), *Animal Acoustic Communication*. Springer-Verlag, 1998.)  
<http://www.haskins.yale.edu/haskins/HEADS/MMSP/tract.html>

Shiga, Yoshinori; King, Simon; Estimating the spectral envelope of voiced speech using multi-frame analysis; Centre for Speech Technology Reaserch University of Edin Burgh, Edinburgh U.K., in *Proc. Eurospeech2003*, vol. 3, Geneva, Switzerland, Sept. 2003, pp. 1737-1740.

Shiga, Yoshinori, King, Simon; Source-Filter Separation for Articulation-to-Speech Synthesis, Centre for Speech Technology Research, University of Edinburgh 2 Buccleuch Place, Edinburgh EH8 9LW, U.K.

Shiga, Yoshinori; King, Simon; Estimating Detailed Spectral Envelopes Using Articulatory Clustering, Centre for Speech Technology Research, University of Edinburgh

Shiga Y., King S.; Estimation of Voice Source and Vocal Tract Characteristics Based on Multi-frame Analysis, in *Proc. Eurospeech2003*, vol. 3, Geneva, Switzerland, Sept. 2003, pp 1749 - 1752

Shiga, Yoshinori; King, Simon ACCURATE SPECTRAL ENVELOPE ESTIMATION FOR ARTICULATION-TO-SPEECH SYNTHESIS, Centre for Speech Technology Research, University of Edinburgh, U.K.

Shiga, Yoshinori; Precise Estimation of Vocal Tract and Voice Source Characteristics. University of Edinburgh, 2005. PhD thesis.

Shiga, Yoshinori, Y.Shiga@surrey.ac.uk, 3/07/07, 2/21/07, 10/30/06,10/28/06, 10/27/06, 10/23/06

Símbolos fonéticos de las vocales (comúnmente usados para las lenguas de México)  
<http://www.sil.org/mexico/ling/glosario/E005ee-VocalesCuadro.htm>

Smith III, Julius O.; Virtual Acoustic Musical Instruments: Review of Models and Selected Research; Center for Computer Research in Music and Acoustics (CCRMA) Department of Music, Stanford University Stanford, California 94305 Oct. 19, 2005