

Instituto Tecnológico de Costa Rica
Escuela de Ingeniería Electrónica



Sistema de distribución inalámbrico de sonido para auditorios

**Informe de Proyecto de Graduación para optar por el título de Ingeniero
en Electrónica con el grado académico de Licenciatura**

Vittorio Capra Velásquez

Cartago, Junio de 2008



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRONICA
PROYECTO DE GRADUACIÓN
TRIBUNAL EVALUADOR

Proyecto de Graduación defendido ante el presente Tribunal Evaluador como requisito para optar por el título de Ingeniero en Electrónica con el grado académico de Licenciatura, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Miembros del Tribunal



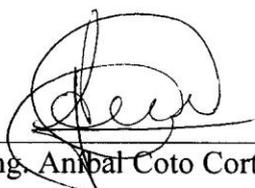
Ing. William Marín Moreno

Profesor lector



Ing. Néstor Hernández Hostaller

Profesor lector



Ing. Anibal Coto Cortés

Profesor asesor

Los miembros de este Tribunal dan fe de que el presente trabajo de graduación ha sido aprobado y cumple con las normas establecidas por la Escuela de Ingeniería Electrónica

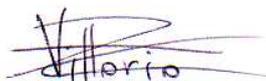
Cartago, 16 de Junio, 2008

Declaro que el presente Proyecto de Graduación ha sido realizado enteramente por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos propios.

En los casos en que he utilizado bibliografía, he procedido a indicar las fuentes mediante las respectivas citas bibliográficas.

En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo de graduación realizado y por el contenido del correspondiente informe final.

Cartago, 16 de junio de 2008



Vittorio Capra Velásquez

Céd: 1-1203-0950

Resumen

Se pretende solucionar el problema de los expositores que hacen uso de la palabra para transmitir sus mensajes en lugares muy amplios o con muchos oyentes. Éstos realizan un esfuerzo físico excesivo en su voz que les causa problemas de salud con potenciales consecuencias graves, y los sistemas existentes actualmente para solventar este aspecto son poco prácticos debido a su elevado costo.

La solución desarrollada es un sistema electrónico que consiste en una red inalámbrica de transmisión y recepción de voz y datos de control, conformada por dispositivos portátiles y de bajo costo. El sistema permite al expositor hablar en un volumen natural y controlar el avance de la exposición mediante distintos modos de funcionamiento.

Este sistema consta de un módulo maestro (el del expositor) y un número variable de módulos esclavos (los del público). La parte central de procesamiento de la información se realiza con un microcontrolador, que se encarga de procesar la voz, previamente acondicionada y de generar los datos de control para transmitir ambos digitalmente por medio de un transceptor, a la vez que se encarga de interpretar los datos entrantes y tomar las decisiones necesarias que permiten definir los diferentes modos de funcionamiento y controlar los indicadores visuales que guían al usuario del sistema.

Palabras claves: microcontrolador; transceptor inalámbrico; transmisión digital; procesamiento de voz, audio.

Abstract

The objective is to solve the problem of the expositors that speak loud to transmit their messages in wide areas or in places with a large amount of people. This expositors have to force their voices so this cause them serious injuries with potential repercussions, and the systems available are impractical for being as expensive as they are.

The solution is an electronic system that consists in a wireless transmission and reception network of voice and control data, conformed by portable and low cost devices. The system allows the expositor to speak in a natural volume and to control the course of the conference with different modes of operation.

The system has a master module (the one of the expositor) and variable number of slave modules (the ones of the participants), where the central processing unit is a microcontroller that processes the voice (previously conditioned) and generates the control data to transmit both in a digital format with a wireless transceiver. The microcontroller also decodes the incoming data to take the decisions that allow the system to switch between the different modes and to control the visual indicators that guide the users in the system.

Keywords: microcontroller; wireless transceiver; digital transmission; voice processing, audio.

Dedicatoria

A mi familia por estar a mi lado en este proceso y haberme apoyado con lo necesario para culminar de manera exitosa. Espero tenerlos mucho tiempo a mi lado para disfrutar de los frutos que esta nueva etapa me pueda traer.

Agradecimiento

Agradezco sin excluir a nadie a todos mis profesores universitarios que contribuyeron de uno u otro modo con mi formación, pero principalmente a los siguientes: Ing. Aníbal Coto Cortés, Ing. Nestor Hernández Hostaller, Ing. William Marín Moreno y a la Ing. Arys Carrasquilla Batista que me apoyaron de forma directa en los momentos finales y más decisivos para lograr esta meta.

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	1
1.1. PROBLEMA EXISTENTE E IMPORTANCIA DE SU SOLUCIÓN	1
1.2. SOLUCIÓN SELECCIONADA	2
CAPÍTULO 2: METAS Y OBJETIVOS.....	6
2.1. META	6
2.2. OBJETIVO GENERAL.....	6
2.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	6
CAPÍTULO 3: MARCO TEÓRICO	7
3.1. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA O PROCESO A MEJORAR	7
3.2. ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS	7
3.3. DESCRIPCIÓN DE LOS PRINCIPALES PRINCIPIOS FÍSICOS Y ELECTRÓNICOS RELACIONADOS CON LA SOLUCIÓN DEL PROBLEMA	8
3.3.1. Aspectos generales de la voz humana	8
3.3.2. Conversión de la voz en una señal eléctrica.....	9
3.3.3. Digitalización de una señal de audio.....	10
3.3.4. Implicaciones del muestreo.....	12
3.3.5. Enlace SPI para ingreso y salida de datos al transceptor.....	14
3.3.6. Modulación GFSK	16
CAPÍTULO 4. PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO.....	17
CAPÍTULO 5: DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LA SOLUCIÓN.....	19
5.1. ANÁLISIS DE SOLUCIONES Y SELECCIÓN FINAL	19
5.2. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL HARDWARE	21
5.2.1. Alimentación del sistema	24
5.2.2. Acondicionamiento y filtrado de la señal hacia el ADC.....	25
5.2.3. Unidad de procesamiento central de información.....	26
5.2.4. Módulo de transmisión/recepción inalámbrica	28
5.2.5. Módulo de conversión de digital a analógico	30
5.2.6. Filtro de reconstrucción y CAS de salida.....	30
5.3. DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE	31
5.3.1. Definición de los códigos de control.....	32
5.3.2. Configuración y uso del transceptor.....	32
5.3.3. Algoritmos y rutinas del programa	33
CAPÍTULO 6: ANÁLISIS DE RESULTADOS	39
6.1. RESTRICCIONES DEL MÓDULO DAC.....	39
6.2. CAS DE ENTRADA	41
6.3. ENTRADA Y SALIDA DE VOZ AL MICROCONTROLADOR	42
6.4. FILTRO DE RECONSTRUCCIÓN	44
6.5. COMUNICACIÓN PIC-TRANSECTOR.....	45
6.6. CONSUMO DE POTENCIA	46
6.7. ALGORITMOS DEL PROGRAMA.....	48
6.8. COSTO Y PORTABILIDAD	49
CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	51
7.1. CONCLUSIONES.....	51
7.2. RECOMENDACIONES	51
BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS	52
APÉNDICES.....	54
A.1. PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN	54

A.2. DIAGRAMAS DE FLUJO DE INTERRUPCIONES DEL MICROCONTROLADOR	57
A.3. DESCRIPCIÓN DE BANDERAS DE ESTADO Y CONTADORES.....	60

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. ESQUEMA DE DISPOSITIVOS PORTÁTILES DE COMUNICACIÓN.....	2
FIGURA 2. DIAGRAMA DE BLOQUES DE CADA MÓDULO.	3
FIGURA 3. DISPOSICIÓN PARA LOS DISPOSITIVOS DEL SISTEMA.....	4
FIGURA 4. CONVERSIÓN DE LA VOZ EN SEÑAL DE AUDIO CON UN MICRÓFONO.	10
FIGURA 5. PASOS BÁSICOS EN LA CONVERSIÓN ANALÓGICA/DIGITAL.....	11
FIGURA 6. ETAPAS DEL MUESTREO DE UNA SEÑAL DE BANDA LIMITADA.	13
FIGURA 7. ETAPAS PARA LA TRANSMISIÓN DIGITAL DE LA VOZ HUMANA.....	14
FIGURA 8. ETAPAS PARA LA RECEPCIÓN DIGITAL DE LA VOZ HUMANA.	14
FIGURA 9. ESQUEMA DE COMUNICACIÓN SPI PARA UN SOLO PERIFÉRICO.....	15
FIGURA 10. DIAGRAMA DE TIEMPOS DE EJEMPLO DE COMUNICACIÓN CON SPI.....	16
FIGURA 11. DIAGRAMA DE BLOQUES DE PROPUESTA DE SOLUCIÓN INICIAL.	19
FIGURA 12. DIAGRAMA DE BLOQUES DE PROPUESTA DE SOLUCIÓN FINAL.....	20
FIGURA 13. DIAGRAMA DE BLOQUES DEL SISTEMA PARA EL MÓDULO MAESTRO.....	22
FIGURA 14. DIAGRAMA DE BLOQUES DEL SISTEMA PARA EL MÓDULO ESCLAVO.	23
FIGURA 15. DIAGRAMA DEL CIRCUITO DE ALIMENTACIÓN.	24
FIGURA 16. DIAGRAMA DE CAS Y FILTRO ANTI-ALIAS PARA LA SEÑAL DE AUDIO HACIA ADC.....	25
FIGURA 17. ESQUEMA DE CONEXIÓN DEL MICROCONTROLADOR EN MÓDULO MAESTRO.	26
FIGURA 18. ESQUEMA DE CONEXIÓN DEL MICROCONTROLADOR EN MÓDULO ESCLAVO.	28
FIGURA 19. DIAGRAMA DEL CIRCUITO DEL MÓDULO TRANSCÉPTOR.	29
FIGURA 20. DIAGRAMA DEL CIRCUITO DEL MÓDULO DE CONVERSIÓN DE DIGITAL A ANALÓGICO.....	30
FIGURA 21. DIAGRAMA DEL FILTRO DE RECONSTRUCCIÓN Y EL CAS DE SALIDA.	31
FIGURA 22. RUTINA PARA CONVERSIÓN DE A/D.....	34
FIGURA 23. RUTINA DE CONFIGURACIÓN DE TRANSCÉPTOR HACIA MODO TRANSMISOR.	34
FIGURA 24. RUTINA DE CONFIGURACIÓN DE TRANSCÉPTOR HACIA MODO RECEPTOR.	35
FIGURA 25. RUTINA PARA ENVIAR DATO CON TRANSCÉPTOR.	35
FIGURA 26. RUTINA PARA ENVIAR DATO HACIA EL DAC.....	36
FIGURA 27. RUTINA PARA BASE DE TIEMPO DE 0.25S.	37
FIGURA 28. RUTINA PARA EXTRAER DATO DESDE TRANSCÉPTOR.....	37
FIGURA 29. CIRCUITO PARA MEDIR LA RESPUESTA ESTÁTICA DEL MÓDULO DAC.....	39
FIGURA 30. RESPUESTA ESTÁTICA DEL MODULO DAC.	39
FIGURA 31. RESPUESTA DINÁMICA DEL DAC CON DATOS DE 0 A 255.....	40
FIGURA 32. RESPUESTA DINÁMICA DEL DAC CON DATOS DE 0 A 200.....	41
FIGURA 33. SEÑAL DE AUDIO (PERSONA HABLANDO A VOLUMEN NORMAL) ACONDICIONADA.....	41
FIGURA 34. SEÑAL DE AUDIO (PERSONA GRITANDO) ACONDICIONADA.....	42
FIGURA 35. CIRCUITO DE MEDICIÓN PARA MÓDULOS ADC Y DAC.....	43
FIGURA 36. COMPARACIÓN DE SEÑAL DE AUDIO ACONDICIONADA Y SALIDA DEL DAC.	43

FIGURA 37. COMPARACIÓN DE SEÑAL ACONDICIONADA Y SALIDA FILTRO DE RECONSTRUCCIÓN.	44
FIGURA 38. SEÑALES DE PRUEBA DEL ENLACE SPI.	45
FIGURA 39. CARACTERÍSTICA DE DESCARGA TEÓRICA DE UNA BATERÍA DURACELL DE 9V	47
FIGURA 40. FOTOGRAFÍA DE LA CIRCUITERÍA DE PROTOTIPO DE UN MÓDULO.	50
FIGURA 41. INTERRUPCIÓN DEL TEMPORIZADOR 0 EN MÓDULO MAESTRO.	57
FIGURA 42. INTERRUPCIÓN DEL TEMPORIZADOR 0 EN MÓDULO ESCLAVO.	58
FIGURA 43. ESTRUCTURA GENERAL DE INTERRUPCIÓN RB.	59

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. NIVELES SONOROS DE INTENSIDAD DE DIFERENTES HABLANTES.	8
TABLA 2. GAMA DE FRECUENCIAS FUNDAMENTALES PARA DISTINTOS TONOS DE VOZ.	9
TABLA 3. VALORES DE SNR DE UNA SEÑAL DIGITAL EN FUNCIÓN DE LOS BITS DE LA MUESTRA.	12
TABLA 4. DESCRIPCIÓN DE LOS PINES DEL PIC16F873A EN MÓDULO MAESTRO.	27
TABLA 5. CARACTERÍSTICAS DEL PIC16F873A QUE MOTIVARON SU ELECCIÓN.	27
TABLA 6. CARACTERÍSTICAS DEL NRF24L01 QUE MOTIVARON SU ELECCIÓN.	28
TABLA 7. CÓDIGOS DE CONTROL QUE CONFORMAN EL PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN.	32
TABLA 8. REPRESENTACIÓN BINARA DE LOS CÓDIGOS DE CONTROL.	32
TABLA 9. COMANDOS PARA EL NRF24L01.....	33
TABLA 10. COMPARACIÓN DE CONSUMO CON DIFERENTES CRISTALES OSCILADORES.	46
TABLA 11. VALORES DE V_{OL} MÁXIMO DEL MICROCONTROLADOR Y V_{IL} MÁXIMO DEL TRANSEPTOR.....	47
TABLA 12. ESPACIO DE MEMORIA DEL PIC16F873A OCUPADO POR LOS PROGRAMAS.....	48
TABLA 13. LISTADO Y COSTO DE LOS COMPONENTES DE CADA MÓDULO.	49
TABLA 14. DIMENSIONES DE COMPONENTES PRINCIPALES DE PANEL DE CONTROL.	50

Capítulo 1: Introducción

En el presente capítulo se presenta el problema que motivó la realización del proyecto. Se expone la importancia de resolverlo y el contexto en el que éste se ubica, así como la técnica utilizada para buscar la solución.

1.1. Problema existente e importancia de su solución

La labor expositiva de los docentes a través de la comunicación oral es sumamente importante, así como para los expositores en general que en definitiva requieren el uso de la palabra para transmitir sus mensajes a un público casi siempre numeroso.

La necesidad de comunicarse en lugares con muchos oyentes y de grandes dimensiones obliga a estos expositores a realizar un esfuerzo físico excesivo en la voz que les puede causar problemas de salud con consecuencias graves. En ocasiones se utilizan alternativas poco prácticas para evitar esta situación, tales como el uso de parlantes que presentan un gran inconveniente por su poca portabilidad, o bien sistemas sofisticados de comunicación que son muy caros.

El problema es entonces que los expositores para públicos numerosos o para lugares muy amplios sufren un desgaste en su voz que les puede causar graves consecuencias y las alternativas existentes para contrarrestarlo son poco prácticas.

Durante el primer semestre del año 2007 se inició un proyecto en la Escuela de Ingeniería Electrónica del ITCR que pretendía dar solución al problema [7]. Ese proyecto consistía en el desarrollo de un sistema electrónico conformado por dispositivos portátiles dotados de implementos tales como audífonos y un micrófono, tanto para el expositor como para los participantes, para permitirles interactuar durante las clases o exposiciones.

Dentro de los logros alcanzados en esa etapa se encuentran la recomendación del uso de ciertos dispositivos electrónicos y la experimentación con algunos de los mismos, la propuesta de algunas ideas para la lógica del sistema de selección de modos de operación y principalmente el planteamiento de que el sistema funcione con un módulo maestro (el del expositor) que gobierne la comunicación y un número variable de módulos esclavos (los del público). Sin embargo, en esa etapa no se obtuvo un dispositivo funcional.

El proyecto cuyo desarrollo se presenta en este documento consiste en la segunda etapa del antes mencionado, cuyo fin es solucionar el problema definido arriba. La solución a este problema se traduce en una gran mejora en las condiciones en que los docentes y los expositores transmiten sus mensajes de forma oral, pues permite disminuir notablemente el esfuerzo físico que sin el sistema propuesto deben realizar, lo cual supone un gran avance en pro de su salud.

1.2. Solución seleccionada

Con el desarrollo del proyecto se tomó como base lo que ya estaba hecho en la primera etapa para diseñar e implementar un sistema de transmisión de sonido inalámbrico portátil que permite la interacción del expositor y el público. En la figura 1 se muestra un esquema de los dispositivos de comunicación.

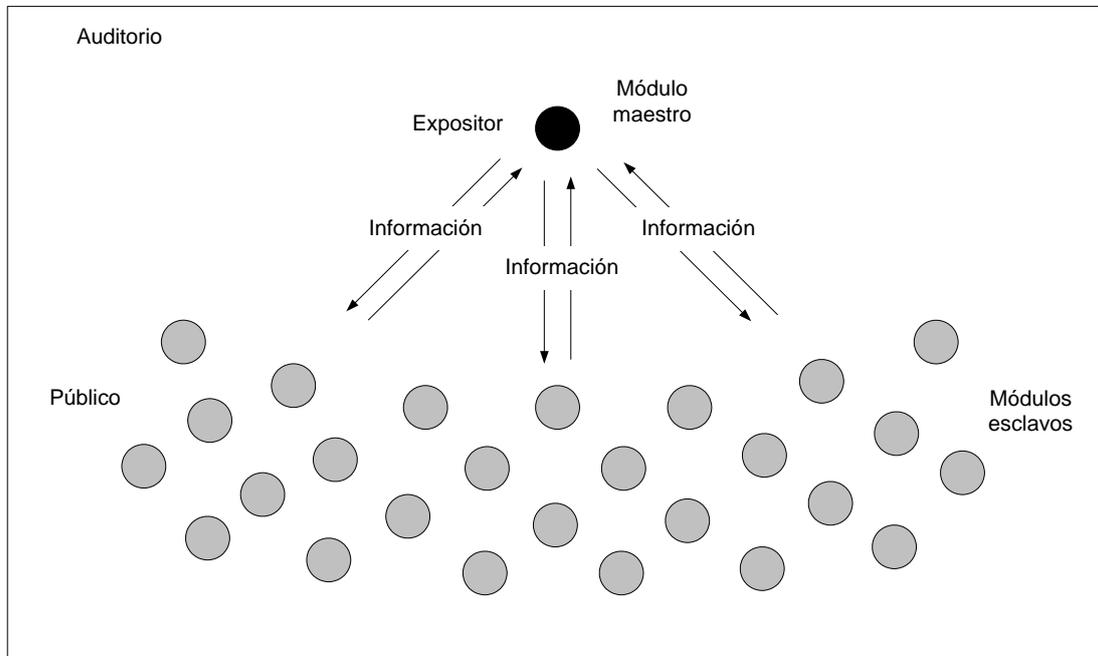


Figura 1. Esquema de dispositivos portátiles de comunicación.

La solución se compone de dispositivos portátiles que integran audífonos y un micrófono para el expositor y los participantes. El dispositivo del expositor es considerado el módulo maestro (gobierna la comunicación) y los dispositivos del público se consideran módulos esclavos. Se aprecia en la figura 1 que el intercambio de información es bidireccional (esto le permite también a los integrantes del público hablar y transmitir información de control).

El sistema cuenta con la opción de operar en tres modos de funcionamiento que el módulo maestro puede elegir a partir del uso de botones que éste posee, los modos son:

Modo de conferencia normal: para la exposición normal. Sólo el módulo maestro tiene la opción de transmitir audio mientras que los módulos esclavos sólo tienen habilitado el receptor.

Modo para dudas: el módulo maestro y un esclavo tienen la opción de intercambiar el uso de la palabra y los demás módulos esclavos permiten a los usuarios escuchar la conversación.

Modo de conversación privada: permite una conversación privada entre el módulo maestro y uno de los módulos esclavos.

Además de esto, se incluyó la opción de identificar a un número variable de módulos esclavos para contribuir con la escalabilidad del sistema, esto significa

que si algún oyente se incorpora a la exposición después de que ésta inicie, no encontrará problemas para participar en el desarrollo de la misma.

Se debe tener en cuenta que el sistema opera en un medio compartido (con un canal común que es el aire dentro del área de cobertura), por lo que se implementó un protocolo para lidiar con la utilización del espectro por parte de los participantes. Esto permite evitar problemas de comunicación tales como incoherencias debidas a transmisiones simultáneas por parte de varios módulos. En la figura 2 se incluye un diagrama de bloques general del sistema.

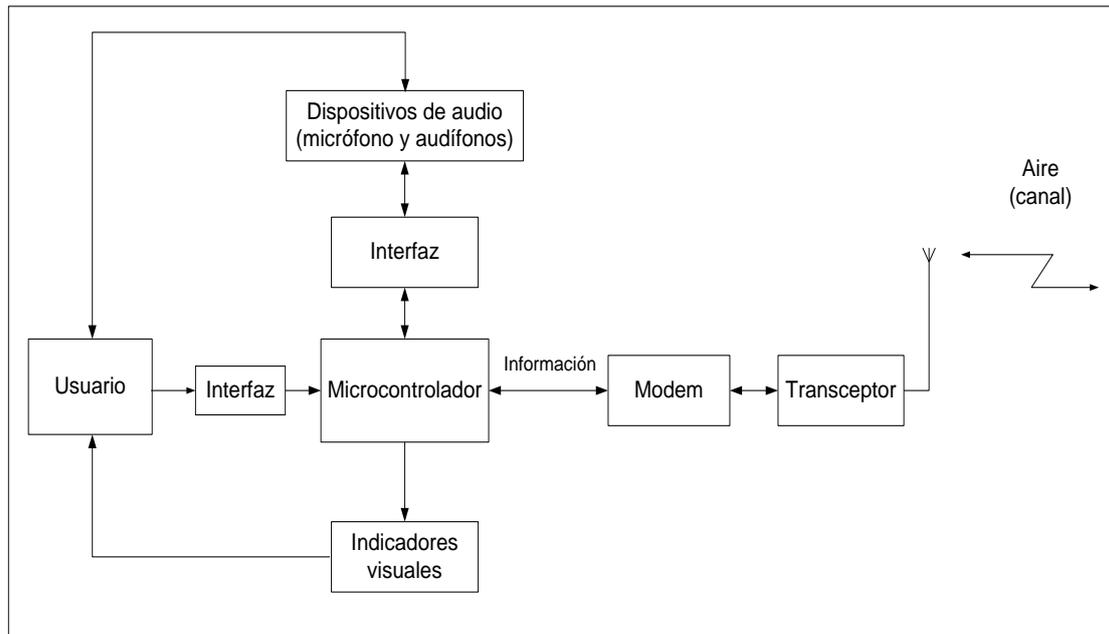


Figura 2. Diagrama de bloques de cada módulo.

El diagrama de bloques de la figura 2 es válido para el módulo maestro y para cada módulo esclavo. Las diferencias entre uno y otros se encuentran en la lógica de los algoritmos programados en el microcontrolador y en la cantidad y significado de los indicadores visuales e interfaz de comunicación para cada tipo de usuario.

El microcontrolador se encarga del procesamiento de la información. Entre otras cosas, se encarga de:

1. Brindar acceso al usuario mediante una interfaz, para seleccionar los modos y otras opciones de comunicación si se trata del maestro o para hacer la solicitud de reportarse o participar de las preguntas si se trata del módulo esclavo.
2. Gobernar el funcionamiento de indicadores visuales que le permiten al usuario saber el modo en el que el sistema está funcionando y otra información pertinente, tal como un indicador acerca del módulo esclavo que está transmitiendo audio, entre otras.

3. Generar las señales de mando que mediante una interfaz apropiada controlan el funcionamiento de los dispositivos de audio (micrófono y audífonos) según la necesidad que se presente en cada modo de funcionamiento.

4. Controlar el flujo de información de entrada y salida de cada módulo, tanto de audio como de datos de control, según las exigencias que se requieran en cada modo de operación.

Se observa además en la figura 2 que se incluye un transceptor conectado a una antena que permite el intercambio de información de forma inalámbrica. Los datos de control y de audio se transmiten en un formato digital.

En cuanto a la disposición de los dispositivos del sistema a ser utilizados por el usuario, se definió el prototipo que se muestra en la figura 3.

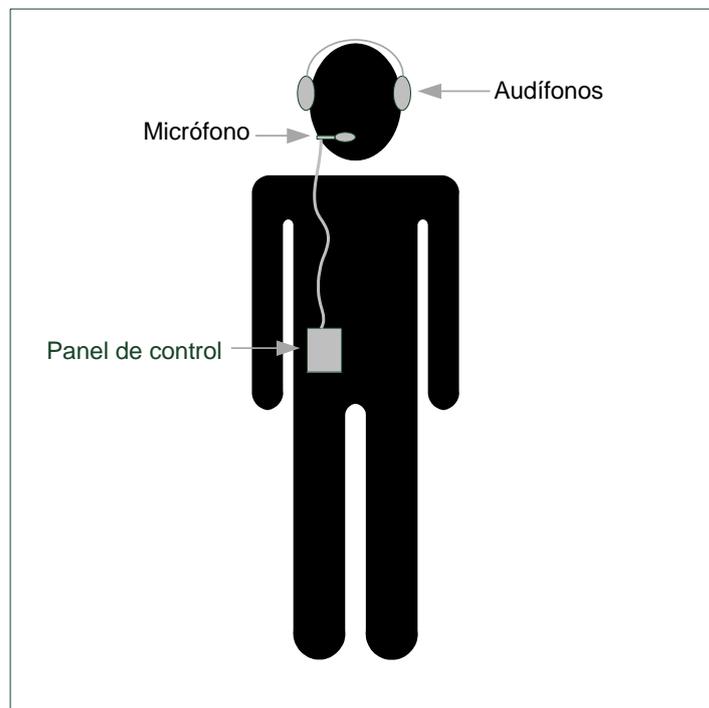


Figura 3. Disposición para los dispositivos del sistema.

Existe un panel de control que el usuario puede utilizar con facilidad, el cual contiene el circuito de control y procesamiento, y tiene disponibles los indicadores visuales y los botones que componen la interfaz para elegir las opciones que el sistema ofrece. La alimentación del sistema (por medio de baterías) y los componentes electrónicos se colocan en este panel, lo cual contribuye con la portabilidad.

En lo referente a las características de transmisión, se partió de la necesidad de una cobertura en una distancia acorde a las dimensiones típicas de auditorios de mediana capacidad. De acuerdo con esto se definió una distancia mínima de 25m de cobertura.

Para satisfacer el requisito de una adecuada fidelidad de sonido que resulte agradable a los oyentes, dos parámetros que permiten medir de forma objetiva esta característica son el ancho de banda efectivo transmitido para el audio y la razón señal a ruido que se presente en el receptor.

Para que la voz sea inteligible se requiere un ancho de banda de entre 3kHz y 3.5kHz, por lo que se definió transmitir un ancho de banda de al menos 3.5kHz.

En cuanto a la razón señal a ruido, se determinó como parámetro que la potencia de la señal de audio sea al menos 100 veces mayor que la potencia del ruido, lo que da como resultado una razón señal a ruido de 20dB. [8]

Capítulo 2: Metas y objetivos

2.1. Meta

Reducir significativamente los problemas de salud relacionados con la voz que sufren los expositores y facilitar el proceso de enseñanza-aprendizaje mediante una alternativa práctica y accesible.

2.2. Objetivo general

Diseñar un sistema portátil de transmisión/recepción inalámbrica que cubra las principales necesidades presentes en las exposiciones.

2.3. Objetivos específicos

1) Diseñar los algoritmos con los que se implemente un sistema portátil de comunicación con módulos maestro y esclavos que cubra las principales necesidades presentes en las exposiciones.

2) Diseñar un prototipo de sistema de transmisión inalámbrico que tenga la capacidad de transmitir audio con un ancho de banda mínimo de 3.5kHz.

3) Diseñar un prototipo de sistema de transmisión inalámbrico con la capacidad de transmitir audio con una razón señal a ruido de al menos 20dB.

4) Diseñar un prototipo de sistema inalámbrico de comunicación con una cobertura mínima de 25 metros de distancia.

5) Diseñar un prototipo de sistema inalámbrico de comunicación portátil con una autonomía de al menos 6 horas.

Capítulo 3: Marco teórico

3.1. Descripción del sistema o proceso a mejorar

Con el desarrollo del proyecto se busca mejorar el proceso comunicación oral que llevan a cabo los docentes y los expositores en general, pues se trata de evitar que éstos fueren su voz de forma excesiva reduciendo el riesgo de serias patologías que se derivan de esas prácticas inadecuadas.

Dentro de las graves patologías que puede causar el esfuerzo físico excesivo en la voz se pueden mencionar las siguientes: nódulos y pólipos, corditis vasomotora, hiperplasia de los pliegues vestibulares, úlceras laríngeas de contacto, laringitis pseudomixomatosa e hiperemia de los bordes libres de las cuerdas vocales. [5]

La propuesta de este proyecto consiste en el uso de dispositivos portátiles que permiten el intercambio bidireccional de sonido entre el docente o el expositor y los participantes, de modo que éstos cuenten con un micrófono y audífonos que les permitan escuchar y ser escuchados sin necesidad de hablar a un volumen distinto al natural de cada uno de ellos.

Dichos dispositivos portátiles son inalámbricos y cuentan con un panel de control con interfaz hacia los usuarios para elegir las diferentes opciones e indicadores visuales que lo guían en el proceso. El sistema es de bajo costo en comparación con otros similares disponibles en el mercado, ya que dentro de la población meta del sistema se incluyen las instituciones públicas de docencia.

3.2. Antecedentes bibliográficos

Existen dispositivos similares en el mercado. El sistema *Spokeman MA 2200* distribuido por la empresa *KEC* es un ejemplo, y está conformado por un amplificador de bolsillo con audífono y micrófono y un pequeño panel de control que permite la comunicación inalámbrica. Utiliza baterías recargables con una autonomía de hasta 10 horas, pero su precio ronda los 138 dólares por cada dispositivo [6], lo cual lo hace impráctico para la aplicación que se requiere.

Otro sistema es el llamado *Sistema de conferencias inalámbrico infrarrojo* de la empresa japonesa *TOA*, con un costo que asciende a los 16 500 dólares para apenas 16 oyentes, un expositor principal y dos expositores secundarios [10]; y al igual que la opción anterior su uso en nuestro entorno no es práctico debido su elevado precio.

En la actualidad prácticamente la totalidad de dispositivos que se usan para transmitir voz y datos de control en una misma aplicación de forma inalámbrica, con radio frecuencia, lo hacen en formato digital. La información analógica (como la voz) se digitaliza y luego se modula para ser transmitida a través del aire, y los datos de control se generan digitalmente desde un inicio.

Se prefiere esta técnica en lugar de la analógica por razones tales como la fidelidad del sonido debida a la alta razón señal a ruido que se logra por la fácil

recuperación de los datos digitales. Además, se facilita el proceso de codificar y transmitir información de control adicional. Debido a este motivo en el mercado muchos transceptores analógicos están descontinuados por el uso cada vez mayor de los transceptores digitales.

3.3. Descripción de los principales principios físicos y electrónicos relacionados con la solución del problema

3.3.1. Aspectos generales de la voz humana

Para conocer las principales características de la voz humana se requiere conocer las características del sonido en general. El sonido se define como una onda que se propaga a través de un medio físico (como por ejemplo el aire) y se presenta como variaciones de presión que pueden estimular la sensación auditiva [4]. Dos cualidades importantes del sonido son la intensidad y el tono.

La intensidad es la propiedad que permite captar a un sonido como fuerte o débil. La intensidad acústica es una magnitud que da idea de la cantidad de energía que está fluyendo por el medio como consecuencia de la propagación de la onda y equivale a una potencia por unidad de superficie, se expresa en W/m^2 . Por otra parte, la intensidad fisiológica se mide en decibeles (dB) y es una medida que se relaciona con la sensación sonora, por lo tanto es una unidad comparativa que obedece a la ecuación 3.1:

$$S = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad (3.1)$$

donde $I_0 = 10^{-12} W/m^2$ es la referencia a 0dB elegida por tratarse del umbral de audición a 1kHz, y la I representa el valor de intensidad acústica medido [12].

Para tener una idea de las diferencias de volumen que se dan entre los hablantes se presenta en la tabla 1 la gama de niveles sonoros de intensidad de varias clases de personas.

Tabla 1. Niveles sonoros de intensidad de diferentes hablantes. [13]

Emisión	Nivel sonoro (dB)
Nivel mínimo de la voz humana	20
Mujer conversando en voz baja	25
Hombre conversando en voz baja	30
Mujer conversando en voz normal	50
Hombre conversando en voz normal	55
Mujer hablando en público	60
Hombre hablando en público	65
Mujer hablando esforzándose	70
Hombre hablando esforzándose	75
Mujer cantando	80
Hombre cantando	85
Nivel máximo de la voz humana	90

El tono está relacionado con la frecuencia y es el que permite asignarle al sonido un lugar en la escala musical, permite distinguir entre los graves (frecuencias bajas) y agudos (frecuencias altas). Se presenta en la tabla 2 la gama de frecuencias fundamentales para los distintos tonos de voces humanas.

Tabla 2. Gama de frecuencias fundamentales para distintos tonos de voz. [13]

Emisión	Extensión (Hz)
Soprano	247 – 1056
Mezzosoprano	220 – 900
Contralto	176 – 840
Tenor	132 – 528
Barítono	110 – 440
Bajo	82 – 396

A pesar de los datos de la tabla 2, en la voz hablada se producen resonancias en el tracto vocal que aparecen como picos en el espectro sonoro principalmente de las vocales, a los cuales se les denomina formantes. Las vocales se producen como sonidos, mientras que las consonantes se clasifican más bien como ruidos.

Mientras que en las vocales se encuentran armónicos bien definidos (en el caso de la “i”, por ejemplo, se tiene que los primeros armónicos son débiles pero el quinto y el sexto son fuertes) en las consonantes aparecen de forma brusca (armónicos transitorios).

Por las razones anteriores la inteligibilidad de la voz se debe a las altas frecuencias, de modo que para que sea comprensible es necesaria la presencia de armónicos cuyas frecuencias se hallan entre los 500 Hz y los 3500 Hz, mientras que la energía (lo que define en gran medida la potencia de la voz) está contenida en su mayor parte en las bajas frecuencias [13].

3.3.2. Conversión de la voz en una señal eléctrica

El transductor usado para convertir el sonido en una señal de audio (señal eléctrica que representa a la señal sonora) es el micrófono. Es un transductor electroacústico que transforma las vibraciones ejercidas sobre su cápsula, debidas a la presión acústica del sonido, en una señal eléctrica que lo representa.

La vibración hace mover un diafragma que a su vez provoca el movimiento de una bobina móvil o bien una cinta corrugada ancladas en un imán permanente, lo que genera un campo magnético cuyas fluctuaciones debidas a la vibración producen una tensión proporcional a éstas, tensión que corresponde a la señal de audio en cuestión.

En la figura 4 se observa un esquema que muestra las partes principales de un micrófono que intervienen en la conversión del sonido en una señal eléctrica.

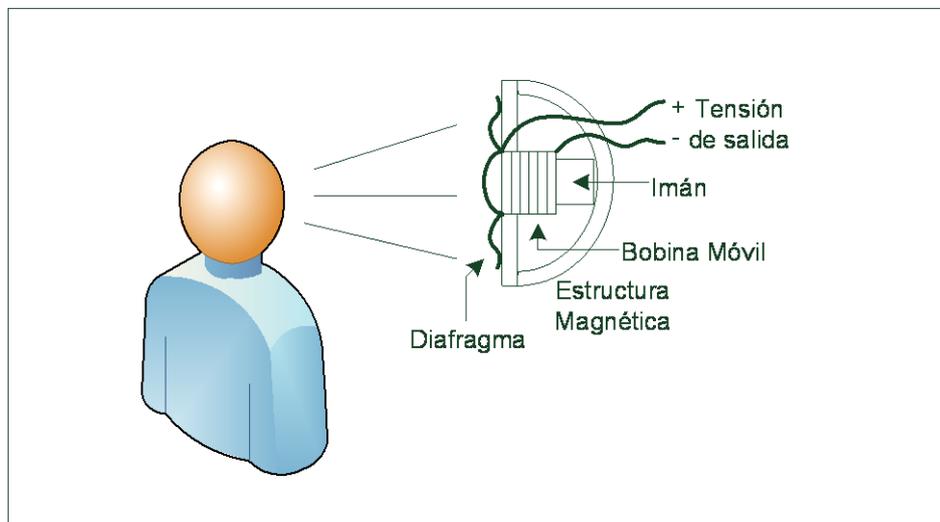


Figura 4. Conversión de la voz en señal de audio con un micrófono.

Dos características importantes de un micrófono son: el rango dinámico y la respuesta en frecuencia. El rango dinámico tiene que ver con la amplitud de la onda sonora que llega al micrófono, es el rango de niveles de sonido aceptables para producir una señal eléctrica utilizable. La respuesta en frecuencia corresponde a la gama de frecuencias efectivas de la señal sonora que pueden ser manejadas por el micrófono.

3.3.3. Digitalización de una señal de audio

Hay varias razones por las cuales es adecuado digitalizar una señal de audio para ser transmitida de un lugar a otro. Las ventajas se dan precisamente en el proceso de transmisión, algunas de ellas son:

1. La transmisión digital tiene una alta inmunidad al ruido. Los pulsos digitales tienen menor susceptibilidad que las señales analógicas a la amplitud no deseada, frecuencia y variaciones de fase; debido a que con la transmisión digital esos parámetros no requieren ser evaluados con tanta precisión. Por el contrario, los pulsos que se reciben simplemente se evalúan durante un intervalo de muestreo y se hace una sola determinación si el pulso está por encima o por debajo de un umbral específico.

.2. Los pulsos digitales permiten un mejor procesamiento y multicanalización que las señales analógicas, pues por ejemplo, los pulsos digitales se pueden guardar fácilmente, mientras que las señales analógicas no. Esta facilidad de procesamiento permite evaluar muestras individuales y tomar decisiones a partir de las mismas con lógica programada, lo cual da una enorme flexibilidad en el funcionamiento del sistema sin necesidad de aumentar el hardware para lograr dichos resultados.

3. Los sistemas digitales utilizan la regeneración de señales, mientras que los analógicos requieren de amplificación, otra razón más por la cual los primeros son más resistentes al ruido.

4. Es más fácil medir y evaluar las señales digitales, lo cual permite determinar el rendimiento de los sistemas digitales con menor dificultad que el de los analógicos.

Algunas desventajas que se evitan en los sistemas de transmisión analógicos son:

1. Se requiere un mayor ancho de banda para transmitir una señal analógica codificada en digital que para transmitirla directamente de forma analógica.

2. Se debe pasar inevitablemente por la conversión de analógico a digital antes de la transmisión y de digital a analógico en el receptor.

3. En la mayoría de los casos se requiere una sincronización precisa de tiempo entre el transmisor y el receptor en las comunicaciones digitales. [11]

En la figura 5 se incluye un esquema en bloques de los pasos que intervienen propiamente en la digitalización de una señal eléctrica analógica.

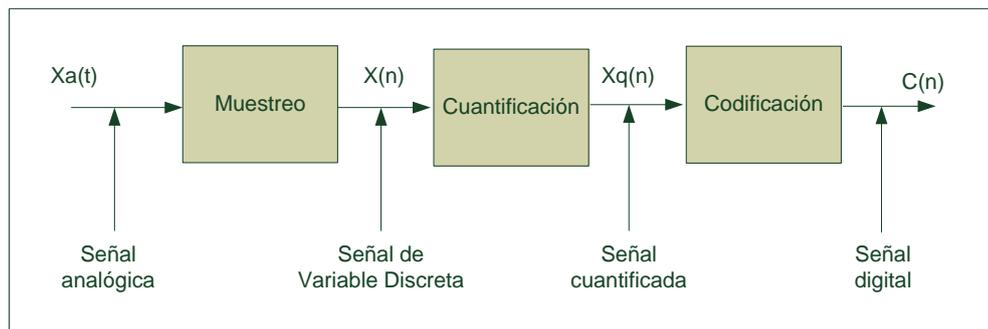


Figura 5. Pasos básicos en la conversión analógica/digital.

Seguidamente se explica cada paso:

1. Muestreo: se llama así al proceso de conversión de una señal de variable continua a otra de variable discreta a partir de la toma de muestras de la señal continua en ciertos instantes.

2. Cuantificación: es la conversión de la señal de variable discreta y valores continuos a otra señal de variable discreta pero con valores discretos, lo cual se realiza con una aproximación de cada muestra a un valor de un conjunto finito de posibles valores. A la diferencia entre el valor continuo y su aproximación se le denomina error de cuantificación.

3. Codificación: es la asignación de una representación binaria para los valores cuantificados. [1]

En este proyecto se realiza una conversión analógica/digital de la voz para su transmisión debido a la alta razón señal a ruido (SNR) que se logra. Si el sistema se diseña de forma adecuada prácticamente la SNR que se obtiene en el receptor sólo se ve afectada por la cuantificación (ruido de cuantificación). En estos sistemas, una buena aproximación para calcular la SNR es la mostrada en la ecuación 3.2 (donde “b” representa el número de bits usados en la representación de la señal):

$$SNR(dB) = 10\log_{10} \frac{3}{2} 2^{2b} = 1.76 + 6.02b \quad (3.2)$$

Con base en la ecuación 3.2, en la tabla 3 se incluyen una serie de valores de SNR que se obtienen en función del uso de diferente número de bits para la representación de cada muestra de la señal analógica que se está digitalizando.

Tabla 3. Valores de SNR de una señal digital en función de los bits de la muestra.

Número de bits “b”	Razón señal a ruido (dB)
4	25.84
5	31.86
6	37.88
7	43.9
8	49.92

La digitalización contribuye además a disminuir el consumo de potencia pues para lograr un aumento en la SNR lo que se requiere es utilizar más bits para representar la información, a diferencia de los sistemas analógicos que requieren amplificar la señal de información para contrarrestar los niveles de ruido que se puedan sumar.

3.3.4. Implicaciones del muestreo

Al realizar la conversión de una señal analógica a digital se debe elegir de manera adecuada la frecuencia con la que se va a muestrear. Para explicar esto, tómesese como base una señal en función del tiempo cuya representación en el dominio de la frecuencia es de banda limitada.

Al muestrear esa señal, lo que ocurre con su espectro es que se forman réplicas de la misma centradas en los armónicos de la frecuencia de muestreo (f_s), como se observa en la figura 6.

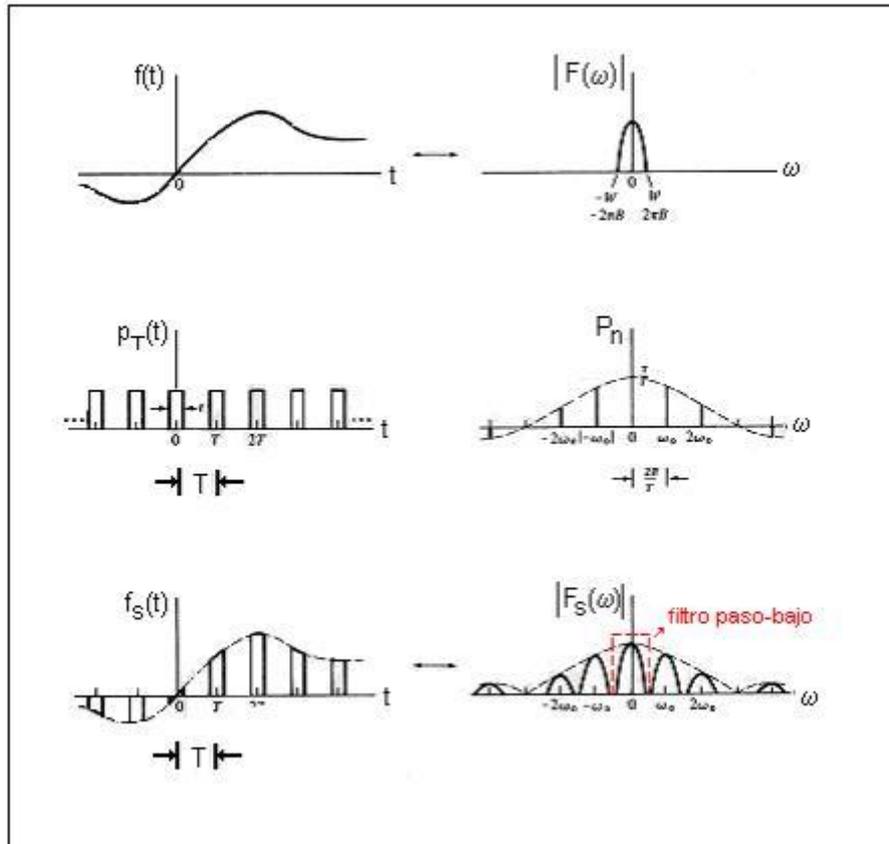


Figura 6. Etapas del muestreo de una señal de banda limitada. [9]

De acuerdo con la figura 6, para que las réplicas no se traslapen, los armónicos de F_s deben tener una separación de al menos dos veces el ancho de banda de la señal (lo cual permitiría su posterior reconstrucción con un filtro paso-bajo). De acá se desprende que el valor de la frecuencia de muestreo que se debe usar para convertir una señal analógica a digital debe ser como mínimo el doble del ancho de banda de la señal analógica, esto se conoce como teorema de Nyquist.

Sin embargo, en la realidad las señales limitadas en tiempo nunca son estrictamente de banda limitada. Por este motivo se debe incluir un filtro analógico anti-alias antes del muestreo, cuya frecuencia de corte sea igual a la banda de frecuencia máxima que se quiera transmitir, de forma que se logre limitar en banda la señal y poder realizar una conversión adecuada. [9]

En este proyecto el ancho de banda que se quiere transmitir para la voz es de 3.5kHz, de modo que se debe hacer pasar la señal de audio a través de un filtro anti-alias de paso-bajo con una frecuencia de corte de alrededor de 3.5kHz. Para la conversión a digital la f_s debe ser mayor o igual a 7kHz, por lo que finalmente se definió de 8kHz.

En la figura 7 se incluye un esquema general de los bloques necesarios para la conversión de la voz humana a una señal digital y su transmisión inalámbrica.



Figura 7. Etapas para la transmisión digital de la voz humana.

Se incluye en la figura 8 un diagrama de bloques general del proceso que se lleva a cabo en el receptor para la reconstrucción de la señal de audio y su posterior transformación a ondas electroacústicas para ser escuchadas por el usuario.

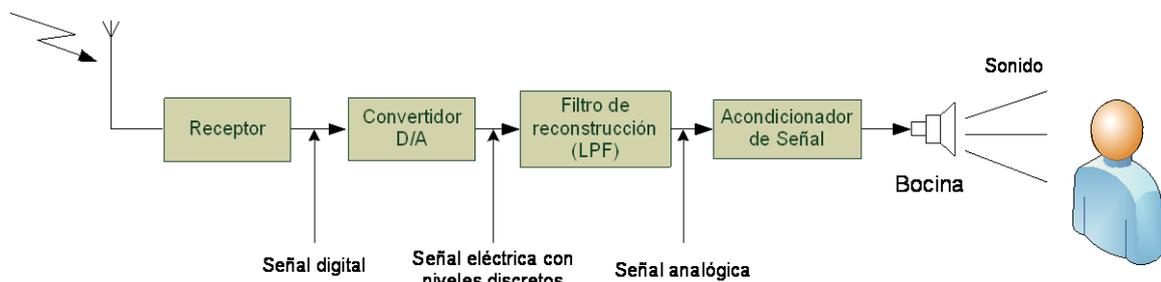


Figura 8. Etapas para la recepción digital de la voz humana.

3.3.5. Enlace SPI para ingreso y salida de datos al transceptor

De acuerdo con las figuras 7 y 8 la señal digitalizada de voz debe ingresarse al transceptor configurado en modo de transmisión para enviar a través del aire dicha información, y de igual forma, en el extremo del transceptor configurado en modo de recepción debe extraerse de éste la señal digital que representa la voz transmitida.

El transceptor utilizado en este proyecto es el nRF24L01 de la empresa *Nordic Semiconductor*, en el cual debe ingresarse y extraerse la información en formato digital mediante el enlace SPI (por sus siglas en inglés *Serial Peripheral Interface*) o Interfase para Periféricos Serie, es decir, cada muestra de 8 bits de audio o código de control que se quiera transmitir o recibir deberá ser ingresado y extraído respectivamente bajo las reglas y características de este enlace.

Para comprender el funcionamiento del SPI obsérvese la figura 9:

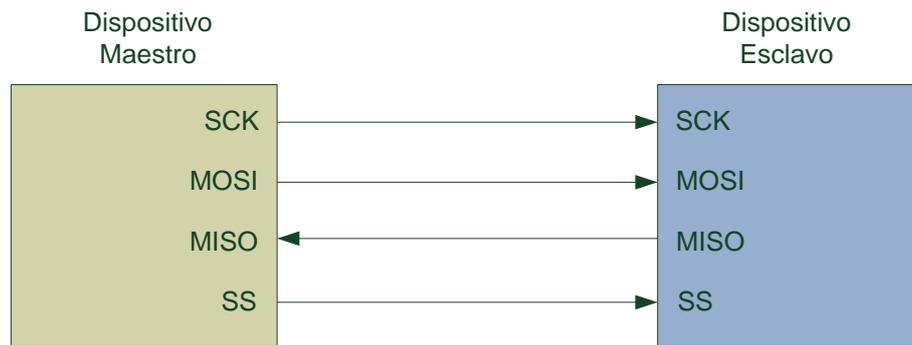


Figura 9. Esquema de comunicación SPI para un solo periférico.

En la figura 9 se observa un esquema de comunicación con SPI entre un dispositivo identificado como maestro y otro identificado como esclavo (no confundir éstos con los dispositivos maestro y esclavos correspondientes a los módulos finales de comunicación de este proyecto). Como dispositivo maestro se utiliza el microcontrolador y como esclavo el transceptor. El SPI es uno de los enlaces conocidos como “de cuatro cables”, ya que utiliza cuatro señales para llevar a cabo la comunicación, las cuales son:

- SCK (*Serial Clock*) que es la señal de reloj y permite definir la frecuencia con que se intercambian los datos, ya que cada bit se muestrea bien con el flanco positivo o negativo (según se defina) de esta señal.
- MOSI (*Master Output Slave Input*) es la salida de datos del dispositivo maestro y a la vez la entrada de datos del dispositivo esclavo, cada bit debe estar estable en el flanco elegido para SCK.
- MISO (*Master Input Slave Output*) es la entrada de datos del dispositivo maestro y a la vez la salida de datos del dispositivo esclavo, cada bit se extrae del dispositivo esclavo en el flanco elegido para SCK.
- SS (*Slave Select*) es un habilitador del dispositivo esclavo, la habilitación puede ser en alto o en bajo según se defina. Sólo con esta señal en estado activo es que el dispositivo esclavo muestrea los datos entrantes o bien el dispositivo maestro extrae los datos del esclavo (o ambas a la vez). Si SS no está activa, ese proceso no ocurre y los dispositivos son transparentes a los cambios de las otras tres líneas.

El SPI permite comunicación *full duplex*, pues la entrada y salida de datos de cada dispositivo está en líneas separadas. En la figura 10 se muestra un diagrama de tiempos de estas señales para un ejemplo de intercambio de datos entre un dispositivo maestro y uno esclavo (en este ejemplo se da comunicación *half duplex*).

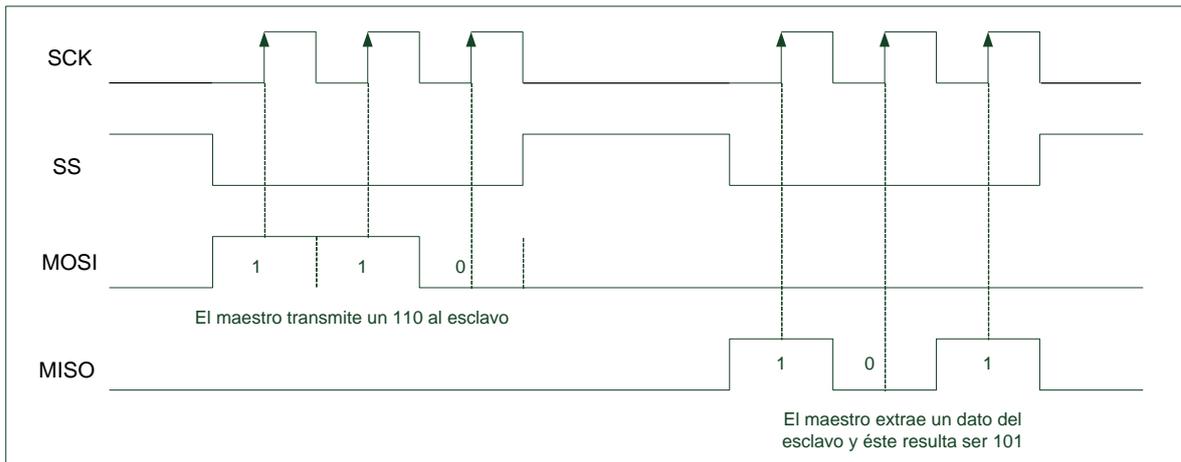


Figura 10. Diagrama de tiempos de ejemplo de comunicación con SPI.

3.3.6. Modulación GFSK

Una vez que los datos se ingresan al transceptor esta información debe ser transmitida por el aire. Para realizar esta transmisión el transceptor nRF24L01 utiliza modulación del tipo GFSK (por sus siglas en inglés *Gaussian Frequency Shift Keying*) o Modulación por Desplazamiento de Frecuencia Gausiana. La modulación consiste en que un uno lógico de la señal moduladora se representa con un incremento en la frecuencia de la portadora, mientras que un cero lógico se representa con un decremento de la misma.

Este tipo de modulación es una versión mejorada de la *FSK*, en donde la diferencia estriba en que para *GFSK* la información se pasa a través de un filtro gaussiano antes de modular la señal, lo cual se traduce en un espectro de energía más estrecho de la señal modulada que permite mayores velocidades de transferencia sobre un mismo canal.

Este transceptor utiliza un frecuencia de portadora de 2.4GHz pero es capaz de operar en 125 canales RF diferentes con un espaciamiento de 1MHz o 2MHz entre cada uno de ellos de acuerdo con la tasa de bits de transmisión que se utilice. Esta opción permite realizar ajustes para elegir el canal más adecuado con el que se eviten interferencias con otros equipos que operan en la banda ISM de 2.4GHz.

Capítulo 4. Procedimiento metodológico

Este proyecto se inició con una etapa de indagación en la que se buscaron fuentes bibliográficas de actividades similares tales como informes académicos de proyectos de universidades internacionales, artículos de proyectos de ingeniería y libros de texto relacionados con comunicaciones eléctricas para fundamentar las bases teóricas.

Para evaluar la información recabada se tomaron en cuenta las fuentes, revisando que éstas fueran fidedignas, tales como páginas Web de organismos internacionales (ministerios laborales), investigaciones de profesionales en el campo de la electrónica y artículos de resumen o informativos acerca de proyectos universitarios similares. Además, la validez de los libros de texto usados se determinó pues son ampliamente reconocidos en el ambiente académico.

Previo a la etapa de diseño se tenían como posibilidades varias soluciones cuya diferencia fundamental estribaba en la forma de transmitir la voz y los datos de control de los módulos electrónicos del expositor y el público.

Una alternativa era utilizar dos transceptores en cada módulo de comunicación, uno analógico para transmisión y recepción de voz y otro digital para el intercambio de datos de control. Esta alternativa presenta varias limitantes, entre ellas: afecta la factibilidad de fabricación por el desuso en que han venido cayendo los transceptores analógicos, incide negativamente en el desempeño por la susceptibilidad al ruido de las transmisiones analógicas y aumenta el costo por requerirse de dos transceptores en lugar de uno solo.

Tomando en cuenta esto, se decidió implementar la solución correspondiente a la digitalización de la voz y su transmisión y recepción junto con los datos de control con un solo transceptor en cada módulo. Esta solución permite en definitiva un menor costo, un mejor desempeño y una mayor factibilidad de fabricación y escalabilidad.

En este proyecto no se implementó un prototipo terminado, sin embargo, se realizó un gran avance en el diseño del sistema, se propusieron las bases a nivel de bloques funcionales, se desarrolló la lógica de funcionamiento, se resolvieron ciertos requerimientos que demanda un sistema portátil, se programaron los algoritmos en la unidad de control, se planteó detalladamente el protocolo de comunicación y se eligieron los dispositivos con base en los objetivos y restricciones planteados.

El primer paso para iniciar con el diseño detallado fue indagar sistemas y técnicas para el procesamiento y transmisión de voz, luego se analizaron características de frecuencia y amplitud de la voz humana y seguidamente se compararon las ventajas y desventajas de la transmisión de la voz en forma analógica y en forma digital. Al llegar a este punto se tenían definidos los bloques que conformarían el sistema, con base en los cuales se eligieron los componentes y se planteó el hardware necesario.

Después se ideó el protocolo de comunicación basado en las restricciones y necesidades que se habían establecido inicialmente, para luego implementarlo mediante algoritmos lógicos programados en el microcontrolador.

Los criterios que se utilizaron para el desarrollo de los algoritmos fueron los siguientes: utilizar una estructura modular con funciones para las tareas más frecuentes, implementar el flujo de acciones de la conferencia con base en interrupciones y banderas de estado, y desde el punto de vista del código usar nombres descriptivos para las variables y métodos.

En medio del proceso se redefinieron aspectos del hardware para optimizarlo, tales como un circuito acondicionador de señal para la entrada de audio, del cual se hicieron simulaciones y pruebas con montajes reales. Este circuito representó cierto reto debido a la alimentación disponible y las características de las señales de audio analógicas producidas por el micrófono.

En el presente desarrollo se llevaron a cabo estrategias para procurar un bajo consumo de potencia y una alta autonomía del sistema, algunas de ellas fueron:

1. El uso de resistencias de altas denominaciones en los circuitos analógicos para minimizar el valor de la corriente que circula a través de las mismas y con ello la potencia disipada.
2. La definición de los estados lógicos activos en cero e inactivos en uno (interrupción de cambio en puerto B, entradas para botones de mando, IRQ del transceptor, SS del enlace SPI) que para entradas del tipo TTL significan un menor consumo.
3. La puesta en reposo del transceptor en momentos en los que éste no requiere procesamiento.
4. Procurar la utilización de un cristal oscilador de una frecuencia tal que logre el menor consumo posible junto con un adecuado funcionamiento.

A pesar de todas estas medidas, en etapas posteriores pueden usarse otras estrategias como incluir dentro de los algoritmos la puesta en reposo (*stand by*) de otros dispositivos siempre y cuando sea posible, sustituir funciones en las que el procesamiento de la información sea excesivo por otras que permitan un resultado equivalente con un menor procesamiento, sustitución (si es posible) de algunos componentes por otros que presenten un menor consumo y que permitan alcanzar los mismos resultados.

Debe tenerse claro que en este proyecto no se llegó a un prototipo funcional, más bien representa una segunda etapa de lo que eventualmente será el sistema final que permitirá la solución definitiva del problema, el cual requiere de una tercera etapa para lograr ese propósito.

Capítulo 5: Descripción detallada de la solución

Se presenta seguidamente la explicación detallada del diseño del sistema, iniciando con las diferentes alternativas de solución y las ventajas y desventajas que permitieron elegir la solución final. Se incluye posteriormente una explicación detallada del hardware que conforma el sistema así como del software.

5.1. Análisis de soluciones y selección final

En la figura 11 se incluye un diagrama de bloques de la propuesta de solución inicial que corresponde al uso de un transceptor analógico para la voz y uno digital para los datos de control.

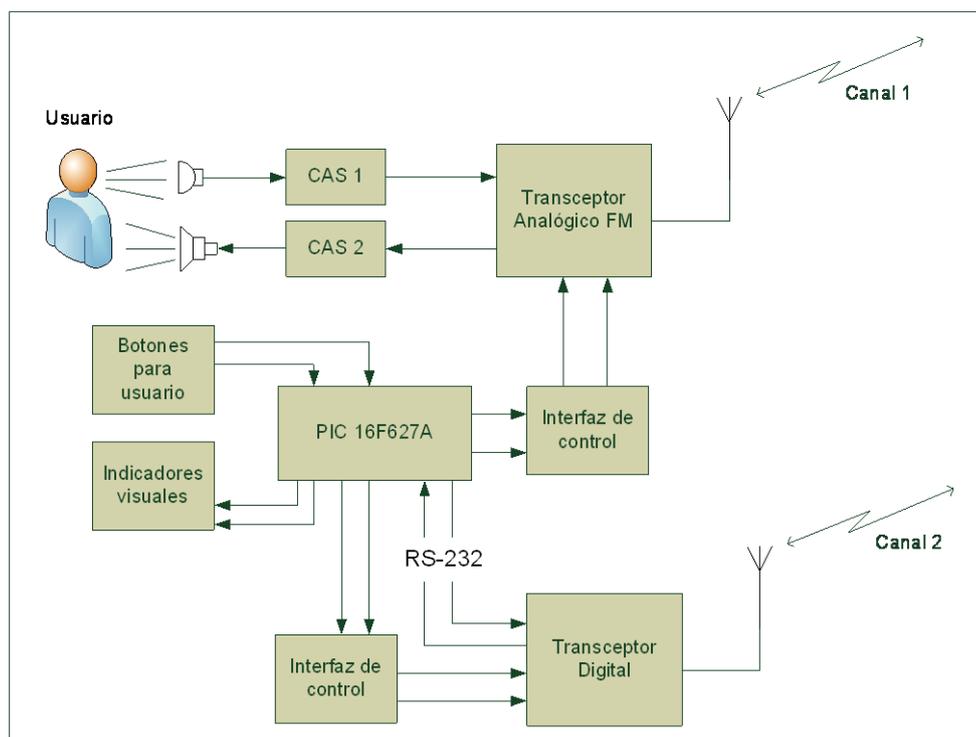


Figura 11. Diagrama de bloques de propuesta de solución inicial.

En esta propuesta la voz nunca ingresa al microcontrolador. Ésta es acondicionada por un CAS y luego de ello ingresa a un transceptor analógico, en donde se modula con FM para ser transmitida por el aire. En el receptor, la voz simplemente sale del transceptor y se acondiciona para que tenga los niveles adecuados para la bocina y el microcontrolador gobierna una interfaz para controlar el transceptor analógico.

En esta propuesta se incluyó un transceptor digital para ser usado con el protocolo RS-232 a baja velocidad (2400 bps). Se había definido el uso del microcontrolador PIC16F627A debido a su bajo precio y sus reducidas dimensiones que contribuían con el costo y la portabilidad respectivamente.

Las razones por las que esta propuesta fue desechada son las siguientes:

1. Los transceptores analógicos han venido en desuso y están prácticamente descontinuados en el mercado. Si bien es cierto podrían haberse conseguido algunos de éstos para la implementación, esto no permitiría una reproducción futura del sistema, que es lo que realmente se quiere.
2. La transmisión de la voz en forma analógica la hace más susceptible al ruido que una transmisión en formato digital.
3. El uso de dos transceptores aumenta el costo del sistema, principalmente si cada uno de ellos requiere circuitería externa, antenas, entre otros.

Como segunda opción se propuso usar un solo transceptor digital. El diagrama de bloques general de esta propuesta se muestra en la figura 12.

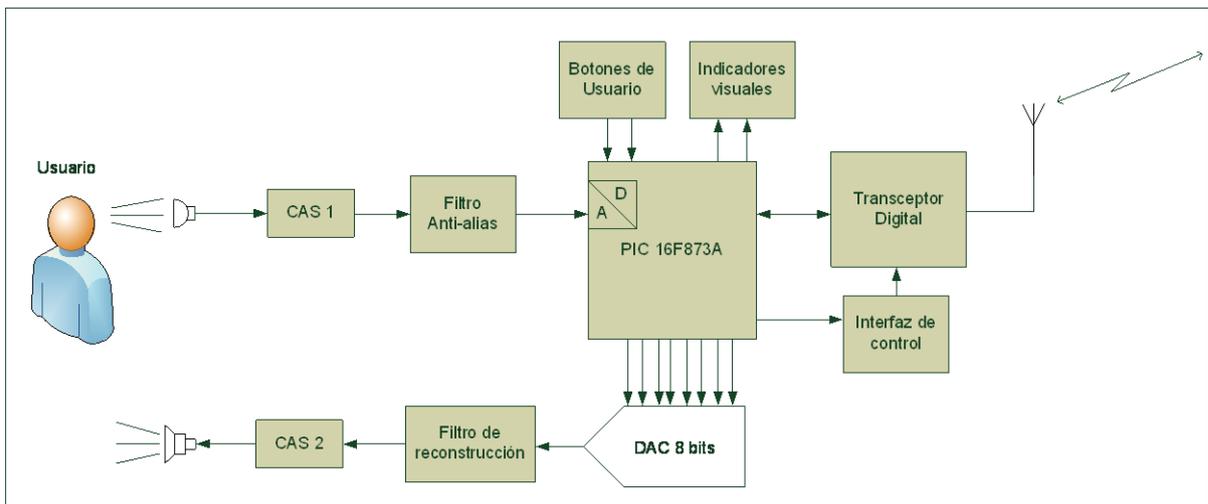


Figura 12. Diagrama de bloques de propuesta de solución final.

En esta propuesta el microcontrolador procesa la señal de voz y lleva a cabo el control general del sistema. Se eligió el PIC16F873A pues cuenta con un convertidor de analógico a digital integrado, el enlace SPI utilizado por el transceptor y un número adecuado para la aplicación de pines de entrada/salida.

Se requiere un filtro anti-alias antes de la conversión de la señal de audio a digital y un circuito acondicionador de señal para que ésta tenga los niveles aceptados por el microcontrolador.

Es necesario también un convertidor de digital a analógico externo para que en modo de recepción los datos digitales que representan a las muestras de audio entrante puedan ser escuchados por el usuario, previo tratamiento de la señal con un filtro de reconstrucción y un acondicionador de la misma. Ventajas de esta propuesta:

1. Hay una mayor factibilidad de conseguir en el mercado transceptores digitales que analógicos, lo cual asegura la reproducción del circuito en futuras optimizaciones y en general en la producción del sistema.
2. La transmisión de información en formato digital es menos susceptible al ruido que las transmisiones analógicas.
3. Con esta propuesta se requiere el uso de un único transceptor, lo que implica el uso de un solo canal y una menor circuitería externa.

Desventajas:

1. Se requiere de un mayor procesamiento de la señal de audio debido a la necesidad de conversión de analógico a digital y de digital a analógico.
2. El microcontrolador tiene una carga de trabajo muy alta que influye en un mayor consumo de energía.
3. La lógica y algoritmos de control para esta propuesta son mucho más complejos que la propuesta inicial, lo cual hace más laboriosa su implementación.
4. Se requiere un microcontrolador más grande y de mayor costo debido a la necesidad de otras funciones y la cantidad de entradas/salidas requeridas.

5.2. Descripción general del hardware

Se presenta a continuación una descripción general del hardware del sistema. Los circuitos en detalle se explican más adelante.

Para comprender la estructura y funcionamiento de los módulos debe entenderse el protocolo de comunicación que se desarrolló. Seguidamente se incluyen los pasos básicos del protocolo desarrollado (el protocolo detallado se muestra en el apéndice A.1).

Pasos del protocolo de comunicación:

- 1) *Se encienden los dispositivos.*
- 2) *El modo por defecto es el de conferencia normal donde el expositor habla y los participantes escuchan.*
- 3) *Llegado el momento de las dudas el expositor presiona el **botón de Modo** y con ello los oyentes pueden ingresar en la cola de dudas presionando su **botón de Acción**.*
- 4) *Cuando un participante ha sido puesto en cola (su duda se ha aceptado) el **indicador de duda aceptada** se encenderá en el módulo de dicho participante, de lo contrario significará que la duda no ha sido aceptada y podrá seguir intentando.*
- 5) *Después de un período de 10 segundos (tiempo para plantear dudas) se entrará al modo para discutir las.*

- 6) El expositor presionará el **botón de Siguiente** para iniciar con las dudas en el orden en que fueron entrando.
- 7) El primer participante podrá hablar (su indicador de **duda_aceptada** parpadea) y todos los demás escucharlo, si requiere darle la palabra al expositor para que le conteste podrá presionar el **botón Toggle** y con ello el expositor tendrá la palabra.
- 8) Si el expositor desea puede volver a darle la palabra al oyente para que sigan interactuando mediante el **botón Toggle**, de lo contrario puede presionar el **botón Siguiente** para dar paso al siguiente participante en cola.
- 9) Con cada participante interactuará igual, el **indicador de duda pendiente** del expositor dejará de parpadear cuando ya haya finalizado con todos los participantes en cola.
- 10) En ese momento podrá entrar al modo de conversación privada si lo desea. El expositor tendrá la palabra y le indicará explícitamente a cuál participante quiere hablarle de forma privada. Luego presionará el **botón de Modo** para entrar a conversación privada, el oyente elegido presionará su **botón de Acción** y un indicador le hará saber que está en conversación privada, y cada cual podrá hablar y podrán intercambiar la palabra con el **botón Toggle**. Los demás participantes no podrán escuchar la conversación.

En la figura 13 se presenta el diagrama de bloques del módulo maestro (módulo del expositor).

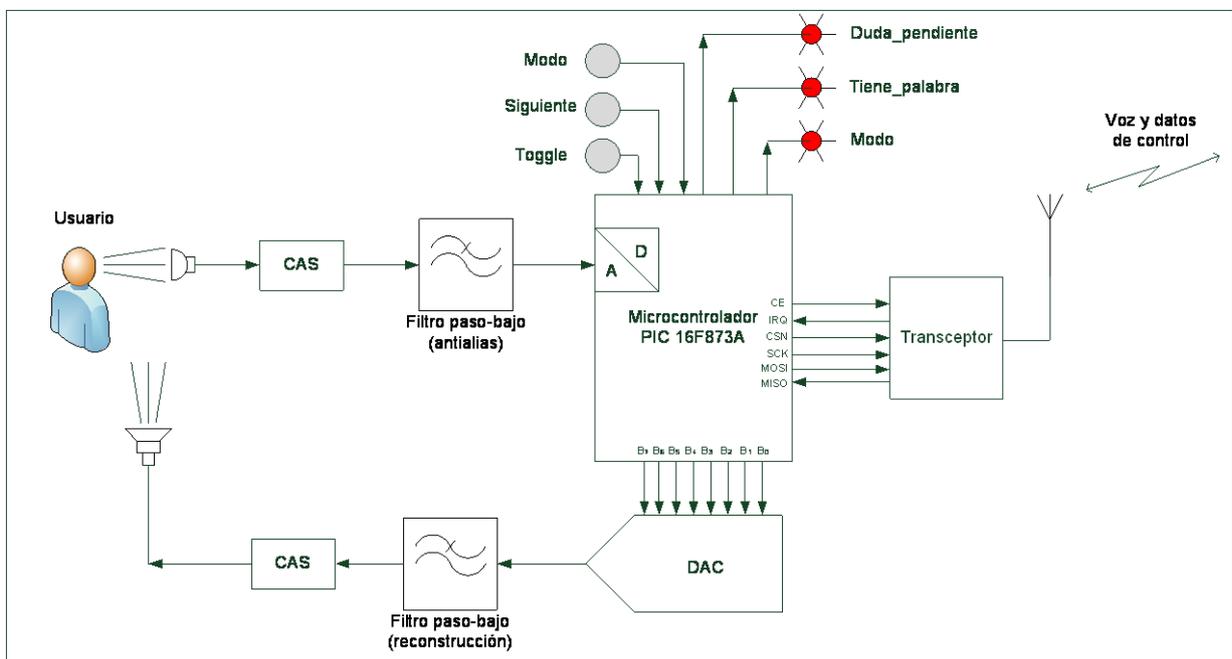


Figura 13. Diagrama de bloques del sistema para el módulo maestro.

El CAS conectado a la salida del micrófono acondiciona la señal de audio para que presente niveles de tensión de 0 a 4V que permitan aprovechar el rango de conversión a digital que ofrece el PIC que va de 0 a 5V y para que la

señal se ubique en el rango lineal del convertidor de digital a analógico DAC0808 (que va de 0 a 4V por la alimentación que se utilizó para ese componente).

Las 6 líneas de conexión entre el microcontrolador y el transceptor permiten al PIC enviar las muestras de audio y datos de control en la transmisión y extraerlos en la recepción. Se incluyen 8 salidas hacia el DAC para transmitir cada bit de las muestras de audio en forma paralela.

El microcontrolador mediante lógica programada se encarga de diferenciar las muestras de audio y los códigos de control analizando el modo en el que se encuentra la conferencia y el valor del dato extraído del transceptor.

Se incluyen tres botones para el módulo maestro: “Modo” permite al expositor seleccionar el modo de la conferencia, “Siguiente” permite al expositor, en el modo para dudas, dar atención (darle la palabra) al siguiente participante en cola y “Toggle” permite intercambiar el uso de la palabra (darle la palabra al usuario con el que está entablando una conversación).

Se incluyen además tres indicadores visuales que guían al expositor durante el proceso: “Duda_pendiente” que parpadea en el modo para dudas si existen participantes en cola en ese instante, “Tiene_palabra” que permanece encendido siempre que el expositor tiene la palabra y “Modo” que se enciende en el modo de conferencia normal, se apaga en el modo para dudas y parpadea en el modo de conversación privada.

El diagrama de bloques del módulo esclavo es similar al del módulo maestro y se muestra en la figura 14.

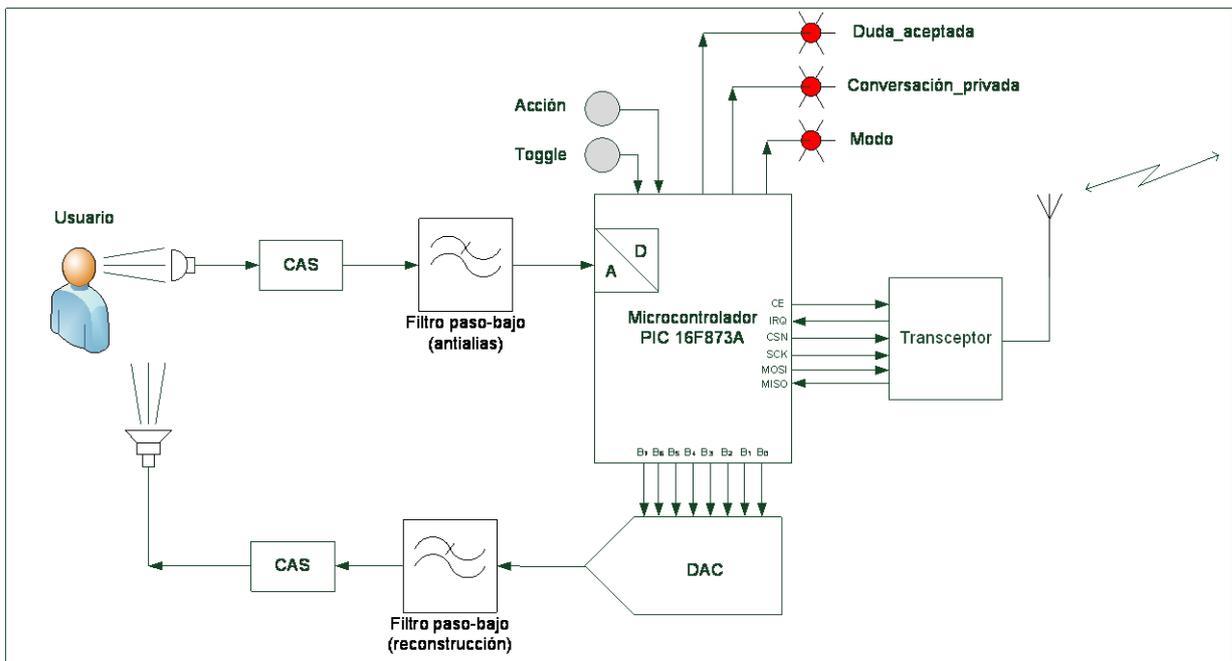


Figura 14. Diagrama de bloques del sistema para el módulo esclavo.

El hardware es muy similar al del módulo maestro pues sólo se diferencia en los indicadores visuales y botones de usuario, es en el software en donde hay cambios significativos entre ambos módulos.

El funcionamiento de los botones es el siguiente: “Acción” le permite al participante solicitar la palabra en el modo para dudas o aceptar la conversación privada si el expositor quiere entablarla con él y el botón “Toggle” le permite, si está haciendo uso de la palabra, cedérsela al expositor

Con referencia a los indicadores visuales: “Duda_aceptada” se enciende en el modo para dudas cuando la duda del participante ha sido aceptada y parpadea en el módulo del participante cuya duda esté siendo atendida, “Conversación_privada” se enciende en el módulo del participante que está entablando una conversación privada con el expositor y “Modo” se enciende en el modo de conferencia normal, se apaga en el modo para dudas y parpadea en el modo de conversación privada.

5.2.1. Alimentación del sistema

La energía del sistema es proporcionada por una batería de 9V para favorecer la portabilidad. Los niveles de tensión requeridos para alimentar los componentes del sistema son al menos +5V y -4V con respecto de una tierra de referencia. En la figura 15 se observa el circuito que se diseñó para cumplir estos requerimientos.

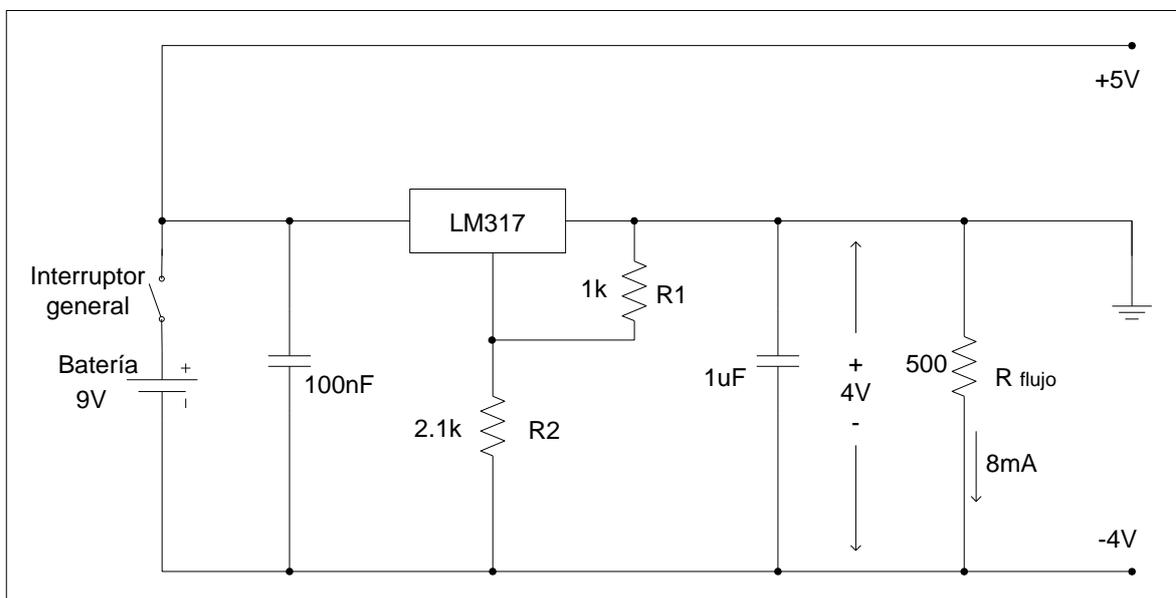


Figura 15. Diagrama del circuito de alimentación.

Se usa un regulador de tensión variable (LM317) fijado en 4V que tiene como entrada un potencial de 9V y su salida regulada a 4V mediante la combinación de los valores de R_1 y R_2 . La salida de 4V con respecto a la terminal negativa de la batería conforma la tierra de referencia del circuito de alimentación. Con este esquema la terminal positiva de la batería está a un

potencial de +5V con respecto a la referencia y la terminal negativa de la batería a un potencial de -4V, logrando cumplir con los requerimientos.

Fue necesario incluir una resistencia de 500Ω (R_{flujio}) para crear un flujo de corriente que saliera del regulador LM317 y contrarrestar el flujo de corriente de entrada que se producía por ser ésta terminal la tierra de referencia del circuito, de lo contrario el regulador no era capaz de mantener su tensión de salida en 4V.

5.2.2. Acondicionamiento y filtrado de la señal hacia el ADC

La señal de audio que produce el micrófono es una señal con niveles de tensión alterna de muy baja amplitud. El acondicionamiento consiste en aumentar su amplitud para aprovechar el rango de conversión del ADC y añadirle un *offset* para eliminar sus componentes de tensión negativos.

También es preciso limitar la señal entre 0 y 4V para no dañar el PIC y para ajustarse al rango lineal del DAC del receptor. A partir de pruebas experimentales se determinó que la relación adecuada entre la tensión de salida y la tensión producida por el micrófono que se requería implementar en el CAS es la de ecuación 5.1:

$$V_o = 639V_{mic} + 2 \quad (5.1)$$

donde “ V_o ” es la tensión de salida del CAS y “ V_{mic} ” es la tensión producida por el micrófono. Para obtener esta función de transferencia se implementó el circuito de la figura 16.

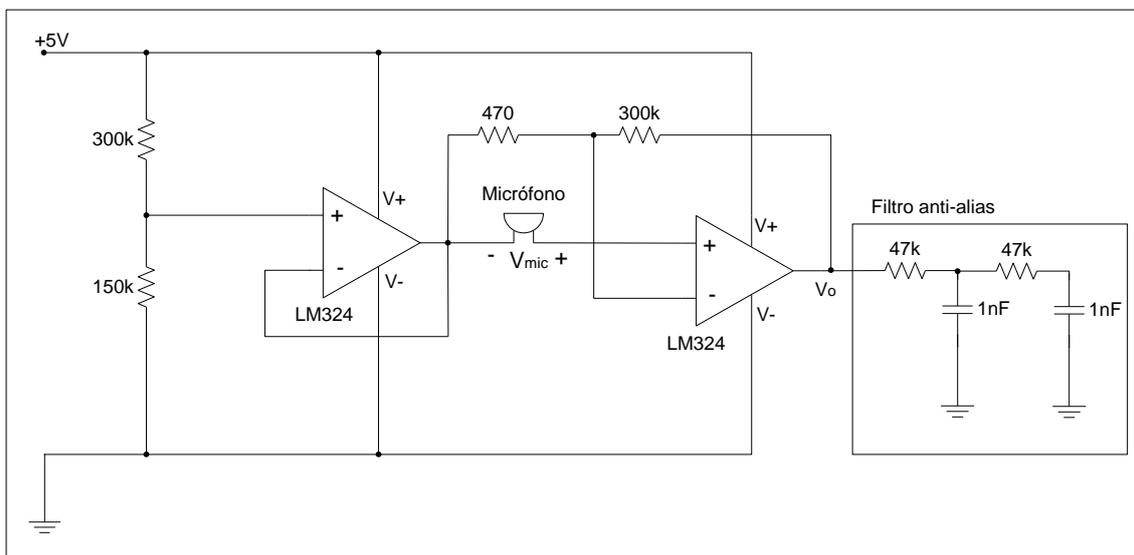


Figura 16. Diagrama de CAS y filtro anti-alias para la señal de audio hacia ADC.

El circuito está formado por una etapa de seguidor de tensión que establece el *offset* de 2V al conectar la terminal negativa del micrófono a ese potencial y otra etapa de amplificador-restador que permite amplificar sólo la componente AC.

Los voltajes de alimentación usados en los amplificadores operacionales permiten limitar la salida entre 0 y 4V. Se utiliza el circuito integrado LM324 pues contribuye con la portabilidad al integrar cuatro amplificadores operacionales en un solo chip (los dos amplificadores operacionales restantes se utilizan en etapas posteriores). Para procurar un bajo consumo de energía se utilizan valores de resistencia de alta denominación para minimizar la corriente que circula a través de ellas.

Se observa también en la figura 16 el filtro paso-bajo pasivo RC de dos etapas en cascada a la salida del CAS, que es el filtro anti-alias. La frecuencia de corte de cada etapa obedece a la ecuación 5.2:

$$F_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (5.2)$$

donde “R” es el valor de la resistencia y “C” el valor de la capacitancia. Con los valores elegidos se logra en cada etapa una frecuencia de corte de alrededor de 3.4kHz.

5.2.3. Unidad de procesamiento central de información

El procesamiento de la información es realizado por el microcontrolador. En la figura 17 se incluye el diagrama del esquema utilizado con el PIC16F873A de *Microchip* para la conexión de periféricos y componentes (módulo maestro).

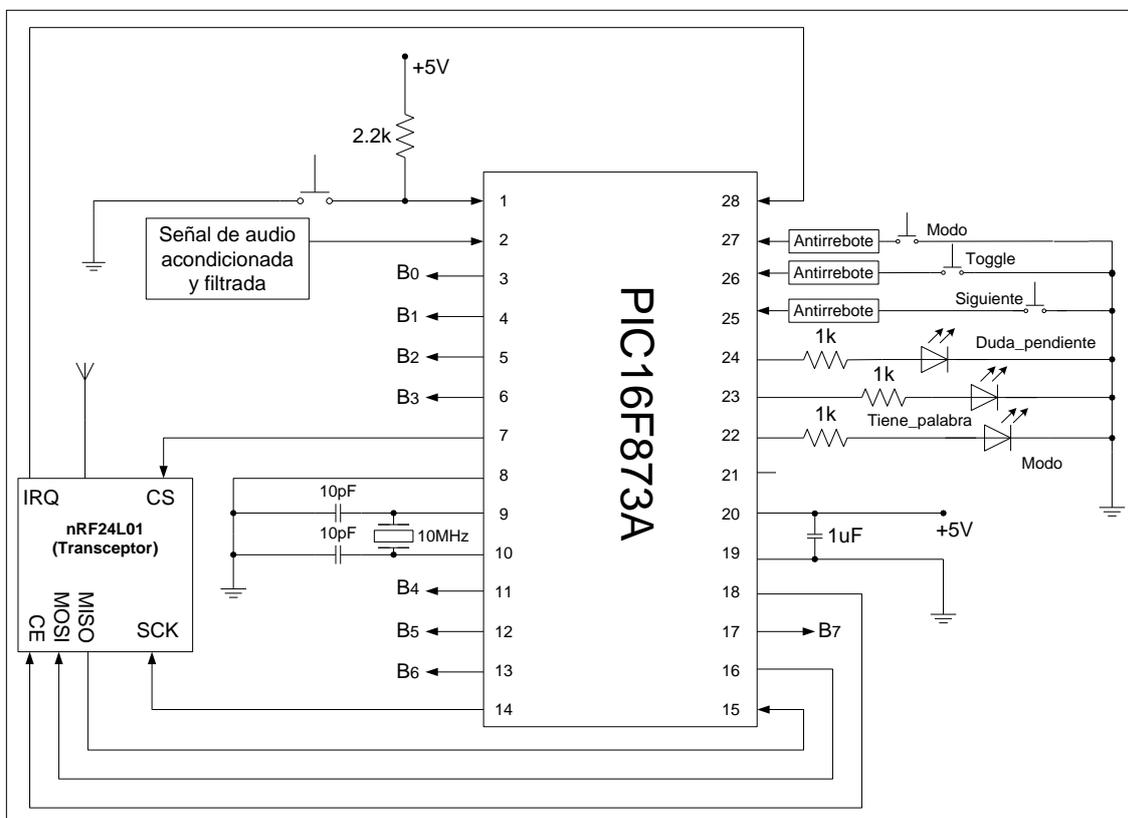


Figura 17. Esquema de conexión del microcontrolador en módulo maestro.

En la tabla 4 se presenta la descripción de cada uno de los pines usados en el módulo y su función.

Tabla 4. Descripción de los pines del PIC16F873A en módulo maestro.

Número de pin	Nombre	Función
1	Res	Reset general del sistema al presionar el pulsador
2	AN0	Entrada de canal 0 hacia el ADC
3	RA1	Salida 1 del puerto A (Bit 0 o LSB hacia el DAC)
4	RA2	Salida 2 del puerto A (Bit 1 hacia el DAC)
5	RA3	Salida 3 del puerto A (Bit 2 hacia el DAC)
6	RA4	Salida 4 del puerto A (Bit 3 hacia el DAC)
7	— SS	<i>Slave Select</i> (habilitador de periférico esclavo para el enlace SPI, habilita la comunicación con transceptor)
8	Vss	Conexión a tierra
9	Osc1	Terminal 1 para cristal oscilador
10	Osc2	Terminal 2 para cristal oscilador
11	RC0	Salida 0 del puerto C (Bit 4 hacia el DAC)
12	RC1	Salida 2 del puerto C (Bit 5 hacia el DAC)
13	RC2	Salida 3 del puerto C (Bit 6 hacia el DAC)
14	SCK	Salida de clock serial para el enlace SPI
15	SDI	<i>SPI data in</i> equivalente al MISO
16	SDO	<i>SPI data out</i> equivalente al MOSI
17	RC6	Salida 6 del puerto C (Bit 7 o MSB hacia el DAC)
18	RC7	Salida 7 del puerto C (para control del transceptor)
19	Vss	Conexión a tierra
20	Vdd	Alimentación a +5V
21	-	No usado
22	RB1	Salida 1 puerto B (señal hacia indicador de Modo)
23	RB2	Salida 2 puerto B (señal hacia indicador Tiene_palabra)
24	RB3	Salida 3 puerto B (señal hacia indicador Duda_pendiente)
25	RB4	Entrada 4 puerto B (entrada de señal botón Siguiente)
26	RB5	Entrada 5 puerto B (entrada de señal botón Toggle)
27	RB6	Entrada 6 puerto B (entrada de señal botón Modo)
28	RB7	Entrada 7 puerto B (entrada de señal IRQ del transceptor)

En la tabla 5 se muestran las características que motivaron la elección del PIC16F873A para este proyecto.

Tabla 5. Características del PIC16F873A que motivaron su elección.

Característica	Uso en este sistema
ADC de 8 ó 10 bits	Se usa el canal 0 con una resolución de 8 bits
Temporizadores de 8 bits	Se usa el temporizador 0 para fijar el período de muestreo y definir la base de tiempo de los eventos temporizados
Interrupción por cambios en parte alta del puerto B	Permite tomar acciones cuando el usuario presiona los botones o cuando el transceptor activa la entrada IRQ
Enlace SPI integrado	Permite la comunicación con el transceptor mediante comandos de programación sencillos
22 pines de entrada/salida	Se logró una maximización de recursos al usarlos casi en su totalidad
Diferentes frecuencias de operación con cristal externo	Permite establecer un compromiso entre una buena resolución de tiempo y un bajo consumo energético

En la figura 18 se incluye el diagrama del módulo esclavo, el cual se diferencia del maestro en los indicadores visuales y en los botones de mando.

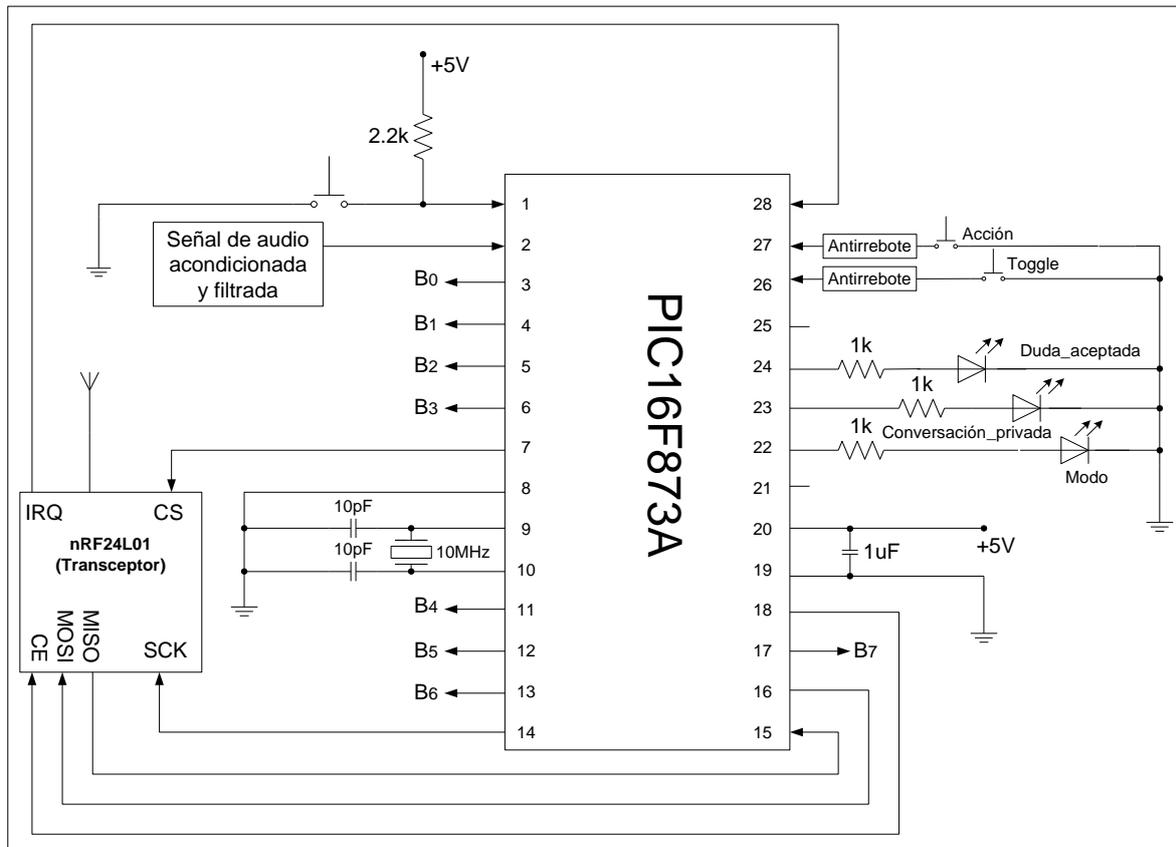


Figura 18. Esquema de conexión del microcontrolador en módulo esclavo.

5.2.4. Módulo de transmisión/recepción inalámbrica

El circuito integrado que se encarga de la transmisión y recepción inalámbrica de la voz y comandos de control es el transceptor nRF24L01 de *Nordic Semiconductor*, empresa noruega de semiconductores especializada en el diseño en las áreas de comunicaciones inalámbricas y multimedia.

En la tabla 6 se exponen las características que motivaron la elección del nRF24L01.

Tabla 6. Características del nRF24L01 que motivaron su elección.

Característica	Uso en este sistema
Dimensiones reducidas con encapsulado QFN20	Forma cuadrada con 4mm de lado y diseñado para montaje superficial lo cual contribuye con la portabilidad
Alta frecuencia portadora de 2.4GHz	Permite el uso de una antena de 20.5mm x 3.6mm que favorece la portabilidad
Bajo consumo de potencia	Potencia de salida configurable, capacidad para distintos modos de <i>stand by</i> y bajo consumo en operación normal
Bajo costo	Transceptor y circuitería externa de muy bajo costo (alrededor de 5 USD)

En la figura 19 se incluye el diagrama del transceptor y su circuitería.

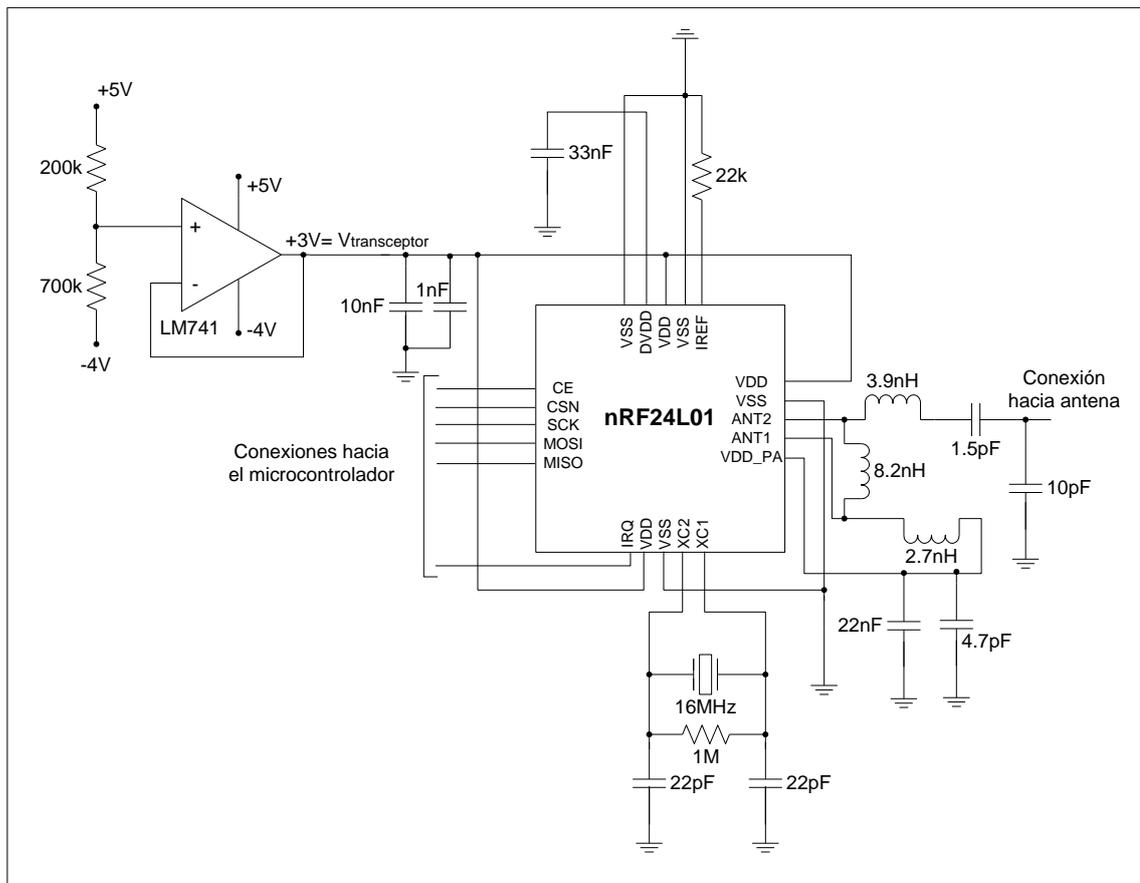


Figura 19. Diagrama del circuito del módulo transceptor.

El nRF24L01 opera con una portadora de 2.4GHz mediante modulación del tipo GFSK. Integra un sintetizador de frecuencia, un amplificador de potencia, un oscilador de cristal, un modulador y un demodulador. Soporta el enlace SPI (a una tasa máxima de 10Mbps) para comunicación a través de 4 pines, y dos pines más para complementar el control de sus funciones.

El transceptor requiere componentes externos, entre ellos resistencias, capacitores e inductancias. Para el montaje el fabricante sugiere el uso de componentes de montaje superficial de dimensiones 0402, y el montaje del circuito completo en un PCB de dos capas con plano de tierra.

Requiere además de un cristal oscilador de 16MHz y una antena de 50Ω. El cristal usado es el RFD58002, que es de montaje superficial y es recomendado por *Nordic Semiconductor*. La antena usada es la Mica 2.4GHz de la empresa *Antenova*, que es de montaje superficial, presenta una impedancia de 50Ω y está diseñada para operar a frecuencias de entre 2.4GHz y 2.5GHz.

A pesar de que el transceptor requiere una tensión de alimentación de 3V éste acepta en sus entradas de datos y control tensiones de hasta 5.25V, y los

valores de V_{OH} , V_{OL} , V_{IH} y V_{IL} son tales que no requieren de ninguna interfaz adicional entre éste y el microcontrolador.

5.2.5. Módulo de conversión de digital a analógico

En la figura 20 se observa el diagrama del circuito que compone el módulo de conversión de digital a analógico.

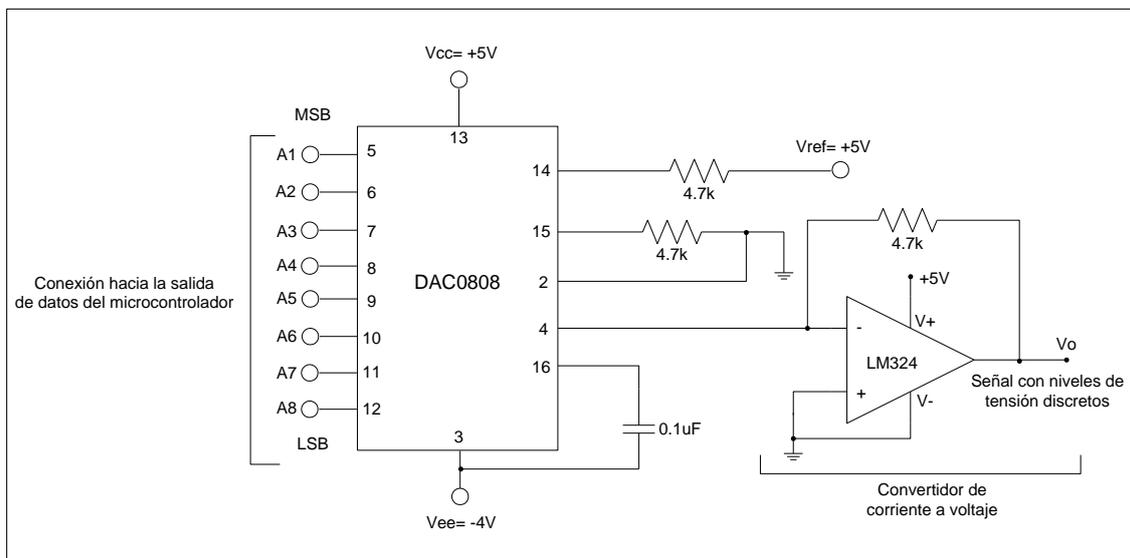


Figura 20. Diagrama del circuito del módulo de conversión de digital a analógico.

Se utiliza el circuito integrado DAC0808 para realizar la conversión. Este es un DAC de 8 bits de entrada paralela (para datos de 0 a 255), presenta como salida una corriente que fluye hacia adentro de su respectivo pin, por lo que requiere de un convertidor de corriente a voltaje para obtener una tensión proporcional al dato binario que se está convirtiendo.

Con base en pruebas experimentales se determinó que el rango de valores binarios de entrada que permite una operación lineal del DAC va de 0 a 200, esto debido al V_{ee} de $-4V$ que se usó por las limitaciones en la alimentación, el cual restringe la excursión de la señal de salida. Esta es una de las razones por las cuales la señal de audio es acondicionada y saturada entre 0 y 4V en una etapa anterior, para asegurar que cada muestra de audio transmitida nunca sea mayor a 200 en el receptor.

5.2.6. Filtro de reconstrucción y CAS de salida

Posterior a la conversión hacia formato analógico de la señal de audio es necesario filtrarla para suavizar la forma de la señal, la cual tiene saltos abruptos entre un nivel de tensión y otro producto de la discretización. Estos saltos abruptos corresponden a componentes de alta frecuencia que se eliminan a través de un filtro paso-bajo.

Otro proceso que es necesario realizar con la señal una vez que ha sido filtrada es acondicionarla para que tenga los niveles óptimos de forma que pueda ser convertida en sonido con el uso de parlantes, que específicamente se trata de dos audífonos que posee el usuario. En la figura 21 se incluye el circuito que corresponde a esta etapa.

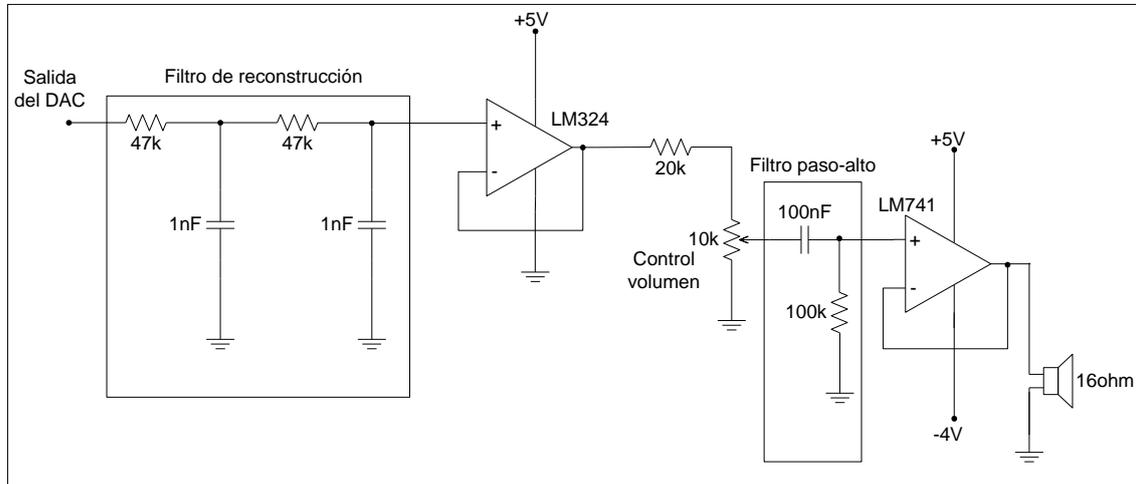


Figura 21. Diagrama del filtro de reconstrucción y el CAS de salida.

El filtro de reconstrucción consiste de dos etapas de filtro pasivo paso-bajo RC conectadas en cascada, cada una con una frecuencia de corte cercana a los 3.4kHz. Posterior al filtro hay un seguidor de tensión implementado con un amplificador operacional del LM324.

Una vez que la señal ha sido filtrada se atenúa con un divisor de voltaje compuesto por una resistencia de 20k Ω y un potenciómetro de 10k Ω que permite al usuario controlar el volumen del sonido, seguido de un filtro paso-alto cuya frecuencia de corte es aproximadamente 16Hz, que para fines prácticos no representa una pérdida de información de la señal de audio, pero permite eliminar el nivel de CD.

Finalmente la señal se pasa a través de un seguidor de tensión que constituye una *bufferización* hacia la bocina o audífonos, necesaria pues éstos representan una carga considerable con una impedancia conjunta de alrededor de 16 Ω .

5.3. Descripción del software

El protocolo de comunicación detallado se presenta en el apéndice A.1 de este documento. Los algoritmos programados en el microcontrolador permiten ejecutar los pasos del protocolo.

5.3.1. Definición de los códigos de control

De acuerdo con el protocolo de comunicación existen 9 códigos de control, los cuales se resumen en la tabla 7.

Tabla 7. Códigos de control que conforman el protocolo de comunicación.

Nombre del código	Dirección de flujo de dato	Código asignado en hexadecimal
Cambio a modo pedir palabra	Maestro → Esclavo	D7
Duda planteada	Esclavo → Maestro	DC
Duda aceptada	Maestro → Esclavo	E1
Discutir duda	Maestro → Esclavo	E4
Cambio de palabra	Maestro ↔ Esclavo	F2
Fin de duda	Maestro → Esclavo	F5
Continuar	Maestro → Esclavo	F8
Conversación privada	Maestro → Esclavo	FB
Aceptar conversación privada	Esclavo → Maestro	FE

Para asignar los códigos de control se partió de la premisa de que éstos fueran datos que en decimal se encontraran en el rango de 200_{10} a 255_{10} (fuera del rango de las muestras de audio digitalizadas). Esto evita que alguna muestra de audio se interprete como comando de control.

Hay al menos dos bits diferentes entre cada par de comandos para disminuir las probabilidades de que un código sea interpretado como otro debido a la inversión accidental de un bit durante la transmisión. En la tabla 8 se incluye la representación en binario de cada código.

Tabla 8. Representación binaria de los códigos de control.

Código	B ₇	B ₆	B ₅	B ₄	B ₃	B ₂	B ₁	B ₀
Cambio a modo pedir palabra	1	1	0	1	0	1	1	1
Duda planteada	1	1	0	1	1	1	0	0
Duda aceptada	1	1	1	0	0	0	0	1
Discutir duda	1	1	1	0	0	1	0	0
Cambio de palabra	1	1	1	1	0	0	1	0
Fin de duda	1	1	1	1	0	1	0	1
Continuar	1	1	1	1	1	0	0	0
Conversación privada	1	1	1	1	1	0	1	1
Aceptar conversación privada	1	1	1	1	1	1	1	0

5.3.2. Configuración y uso del transceptor

Se requiere configurar ciertas características del transceptor tales como la potencia de salida a la que se desea transmitir, la tasa de bits de transmisión, características de interrupción en la salida IRQ, modo de funcionamiento, entre otras.

La configuración del transceptor consiste en un proceso de escritura en sus respectivos registros, otras acciones que se pueden realizar con ellos vienen dadas en la tabla 9.

Tabla 9. Comandos para el nRF24L01.

Nombre del comando	Formato de instrucción (binario)	Tamaño del dato (bytes)	Operación
R_REGISTER	000A AAA	Desde 1 hasta 5	Leer registro (en donde AAAAA representa la dirección del registro)
W_REGISTER	001A AAA	Desde 1 hasta 5	Escribir registro (en donde AAAAA representa la dirección del registro)
R_RX_PAYLOAD	0110 0001	Desde 1 hasta 32	Leer dato recibido (en operación de receptor)
W_TX_PAYLOAD	1010 0000	Desde 1 hasta 32	Escribir dato a transmitir (en operación de transmisor)
FLUSH_TX	1110 0001	N/A	Limpiar FIFO de transmisor
FLUSH_RX	1110 0010	N/A	Limpiar FIFO de receptor
REUSE_TX_PL	1110 0011	N/A	Reutilizar el último dato enviado
NOP	1111 1111	N/A	No operación

Estos comandos deben ingresarse al transceptor mediante el enlace SPI. Debe usarse la señal de habilitación de dispositivo periférico (SS) en bajo y el formato exige iniciar con el MSB hasta finalizar con el LSB (consistente con el formato que ofrece el PIC16F873A) y para la lectura se utiliza el flanco positivo de SCK.

Los comandos que se utilizaron para la comunicación con el transceptor que ofrece el compilador PICC son los siguientes:

- `spi_write(dato)`: permite enviar un *dato* de 8 bits desde el microcontrolador hacia el transceptor con el enlace SPI.
- `spi_read()`: permite extraer un dato desde el transceptor hacia el microcontrolador mediante SPI y asignarlo a una variable de 8 bits.

Se configuró el hardware SPI del PIC para funcionar como Maestro en lo que respecta a la relación microcontrolador-transceptor, con un muestreo de dato en el flanco positivo de SCK y con una tasa de transferencia de datos entre éste y el transceptor de 625 kb/s.

5.3.3. Algoritmos y rutinas del programa

Se utilizó el lenguaje de programación PICC por la practicidad que presenta para el manejo de hardware con funciones implementadas (ADC, SPI, interrupciones del temporizador y de cambio en puerto B), y por las facilidades que presenta un lenguaje de alto nivel en cuanto a comandos y operaciones básicas.

Debido a que los módulos Maestro y Esclavo requieren cada uno una lógica diferente para ejecutar acciones diferenciadas en la conferencia, se desarrolló un programa para cada uno de ellos. Sin embargo, se desarrollaron algunos métodos o rutinas comunes para ambos módulos, ya que los dos requieren de ciertas funciones equivalentes.

- Métodos del programa:

1) Lee_adc: hace la conversión de analógico a digital de la señal de audio. En la figura 22 se incluye el diagrama de flujo.

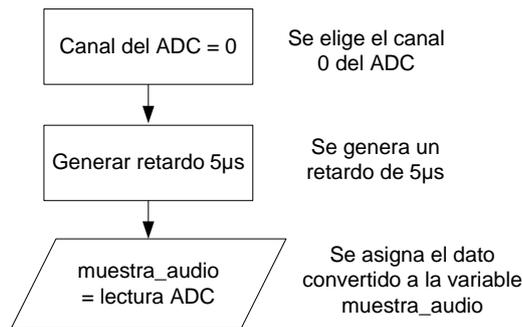


Figura 22. Rutina para conversión de A/D.

2) Configura_TRANSCEIVER_transmisor: configura al transceptor en modo de transmisión escribiendo los parámetros necesarios en su registro de configuración, además levanta una bandera que indica que el módulo está configurado como transmisor. En la figura 23 se incluye el diagrama de flujo.

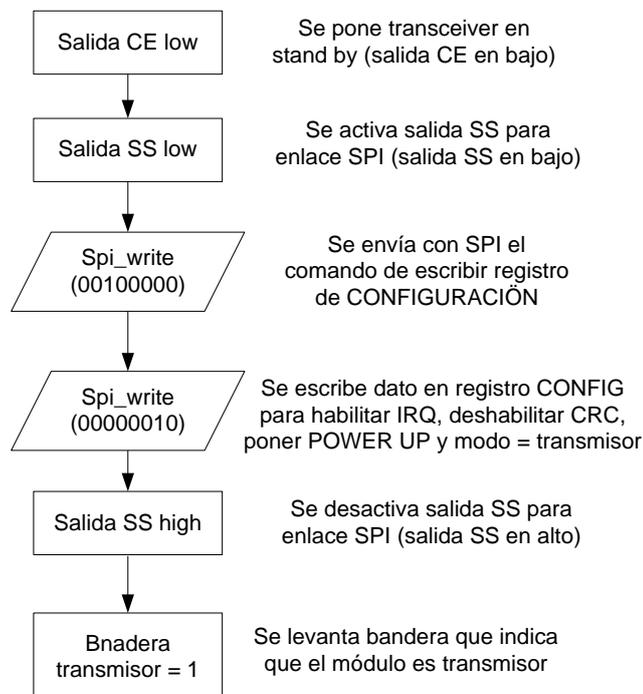


Figura 23. Rutina de configuración de transceptor hacia modo transmisor.

3) Configura_TRANSCEIVER_receptor: pone al transceptor en modo de recepción. Es muy similar al método anterior, en lo único que cambia es en el dato que se escribe en el registro de configuración, que en éste se quita el modo de *stand by* y que la bandera que indica que el módulo es transmisor más bien se baja. En la figura 24 se observa el diagrama de flujo.

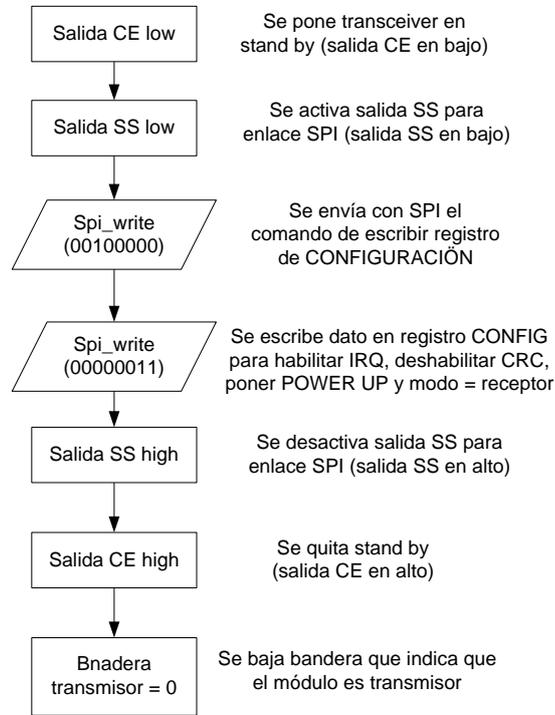


Figura 24. Rutina de configuración de transceptor hacia modo receptor.

4)Envia_dato_desde_transceiver: con éste el transceptor envía inalámbricamente un dato de 8 bits, el cual es un parámetro del método. En la figura 25 se incluye el diagrama de flujo.

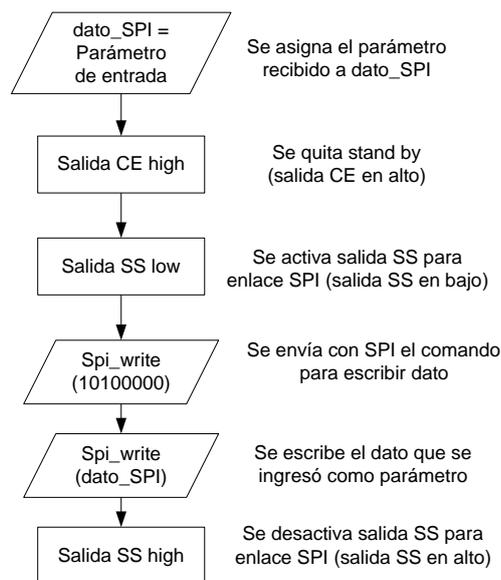


Figura 25. Rutina para enviar dato con transceptor.

5) *Saca_dato_digital*: recibe como parámetro un dato de 8 bits y se encarga de enviar cada bit hacia el DAC. En la figura 26 se incluye el diagrama de flujo.

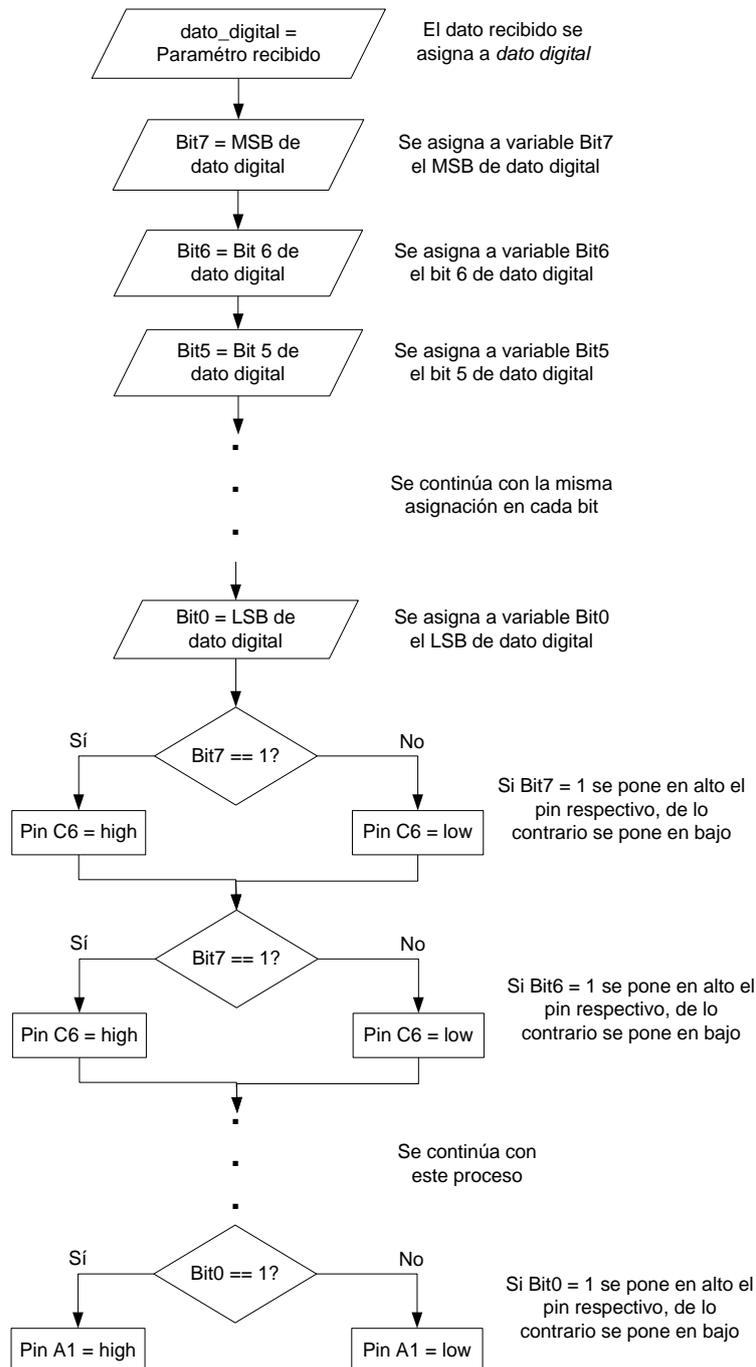


Figura 26. Rutina para enviar dato hacia el DAC.

6) *Base_tiempo*: permite obtener una base de tiempo de 0.25 segundos mediante una estructura de contadores anidados. Es necesaria para llevar a cabo los eventos temporizados como el tiempo para dudas, tiempos para envíos periódicos de códigos y parpadeo de indicadores visuales. En la figura 27 se incluye el diagrama de flujo.

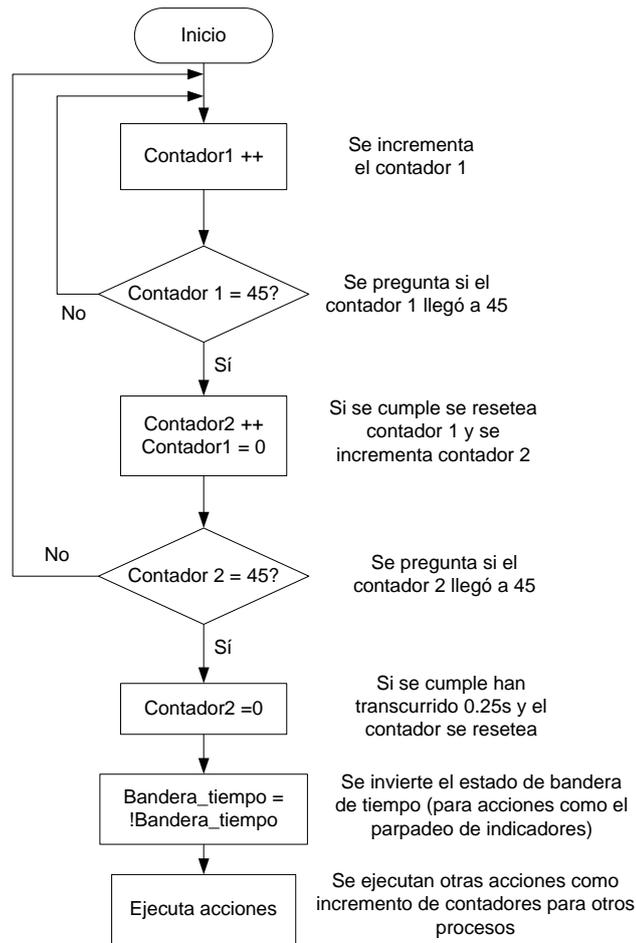


Figura 27. Rutina para base de tiempo de 0.25s.

7) `Extrae_dato_desde_transceiver`: el método devuelve un dato de 8 bits correspondiente al dato extraído desde el transceptor. En la figura 28 se incluye el diagrama de flujo.

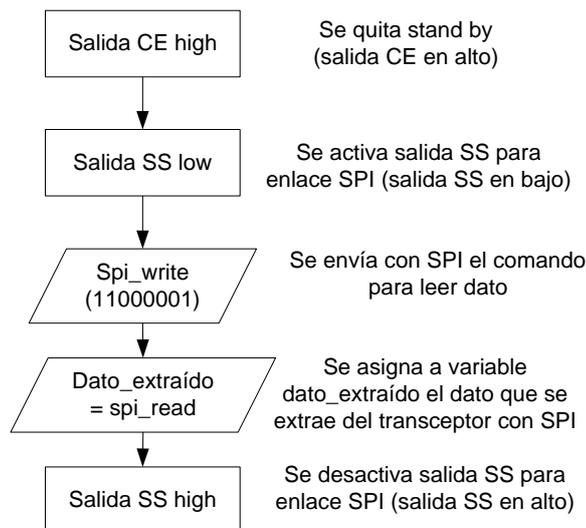


Figura 28. Rutina para extraer dato desde transceptor.

- Interrupciones:

El flujo de la programación que permite ejecutar los pasos del protocolo lo llevan las interrupciones de cambio en puerto B y la del temporizador 0. Al producirse estas interrupciones, de acuerdo con el estado de la variable *modo*, el estado de las banderas indicadoras y el valor de contadores auxiliares, se toman las acciones y se ejecutan los comandos necesarios.

En este punto difiere por completo la lógica entre el programa del módulo maestro y el del esclavo (aunque en ambos programas se utiliza la misma estructura).

La interrupción del temporizador 0 de ambos módulos consiste en establecer primero el valor del temporizador que permite mediante su desborde obtener el período de muestreo, luego se invoca al método “base de tiempo” que genera una base de tiempo de 0.25s y luego de esto se pregunta por el modo de conferencia presente, de acuerdo con éste y los estados de banderas y contadores se ejecutan las acciones respectivas.

En la interrupción de cambio en puerto B (Int RB) se prueba el estado de las entradas de botones y del pin IRQ. Con el estado de dichos pines se puede determinar quién produjo la interrupción (los botones tienen prioridad sobre la IRQ). En un segundo nivel jerárquico se pregunta por el modo presente en la exposición, y finalmente se ejecutan las acciones respectivas de dicho modo.

Los diagramas de flujo para ambas interrupciones se muestran en el apéndice A.2, las figura 41 y 42 corresponden a la interrupción del temporizador 0 para el maestro y esclavo respectivamente, y la figura 43 corresponde a la interrupción de cambio en puerto B.

- Banderas de estado y contadores:

Como parte fundamental para dirigir la lógica de programa se utilizan varias banderas y contadores que permiten complementar la información que brinda el modo en el que se encuentra la conferencia. En el apéndice A.3 se presenta un listado y explicación de las banderas y los contadores utilizados.

Capítulo 6: Análisis de resultados

6.1. Restricciones del módulo DAC

Para determinar la respuesta estática del módulo de conversión de digital a analógico (DAC) se conectó a sus entradas de datos un dip switch y se midió su salida con un voltímetro, como se muestra en la figura 29.

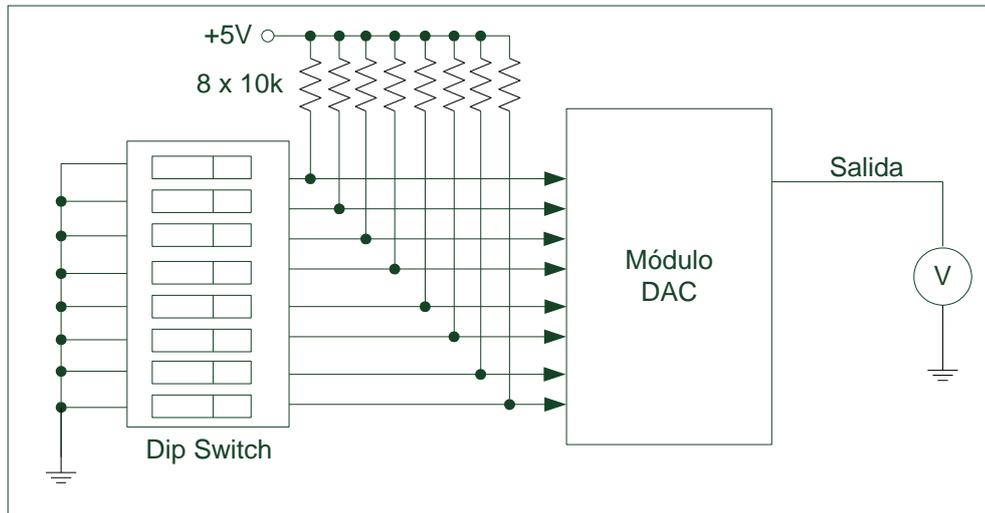


Figura 29. Circuito para medir la respuesta estática del módulo DAC.

Se midió el voltaje de salida para todas las combinaciones de datos de entrada correspondientes a valores en binario desde 0 hasta 255. El resultado de las mediciones se graficó y es el que se muestra en la figura 30.

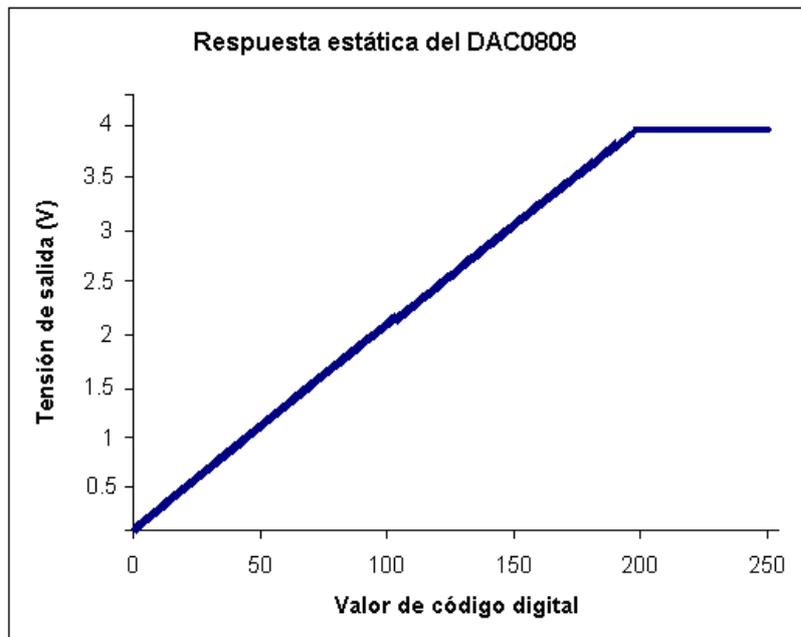


Figura 30. Respuesta estática del modulo DAC.

No es factible la utilización de todo el rango de datos que los 8 bits ofrece, sino que las muestras de audio para ser convertidas a analógico deben estar en el rango comprendido entre 0 y 200_{10} . Por lo tanto, se debió limitar la señal de audio acondicionada entre 0 y 4V, para que las muestras digitalizadas se ubiquen siempre en el rango permitido.

El motivo de esta limitación del rango es que en la terminal V_{ee} del DAC0808 el dispositivo se conecta a un potencial de $-4V$ por las limitantes en el suministro de alimentación del sistema, por lo cual su salida a su vez está confinada entre 0 y 4V.

Para obtener la respuesta dinámica del módulo DAC se conectaron las salidas de bits del microcontrolador a las entradas de datos del DAC. En el PIC se programó una rutina para direccionar hacia sus salidas una secuencia con datos de 0 a 255, regresando a 0 y así sucesivamente. La salida del DAC se conectó a un osciloscopio digital y la respuesta obtenida se observa en la figura 31.

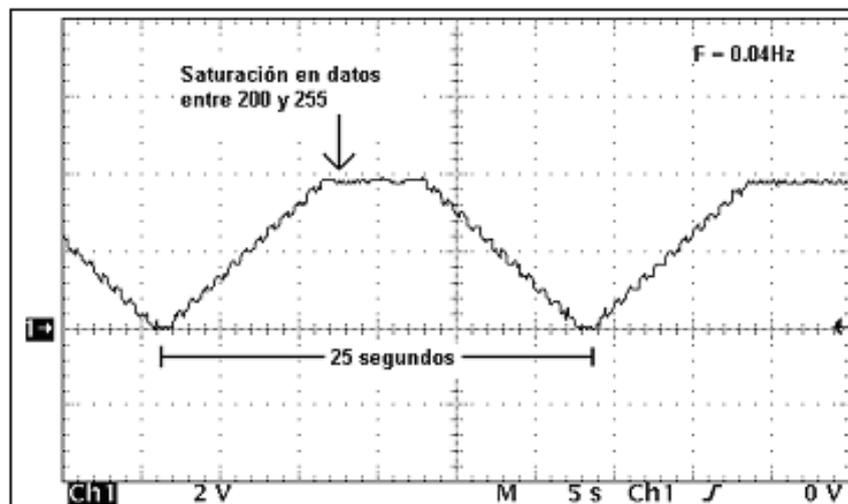


Figura 31. Respuesta dinámica del DAC con datos de 0 a 255.

Se reafirmó la necesidad de usar datos para la conversión dentro del rango de 0 a 200, pues para los datos mayores se da una saturación, que se debe a las limitaciones en la alimentación del sistema.

Para descartar saturaciones de los datos en el rango de 0 a 200 se realizó la misma conexión de la medición anterior pero esta vez se programó la secuencia para que su valor máximo fuera igual 200. El resultado con dos frecuencias de prueba se muestra en la figura 32. En esta figura se aprecia que el rango de 0 a 200 es válido para realizar la conversión a analógico.

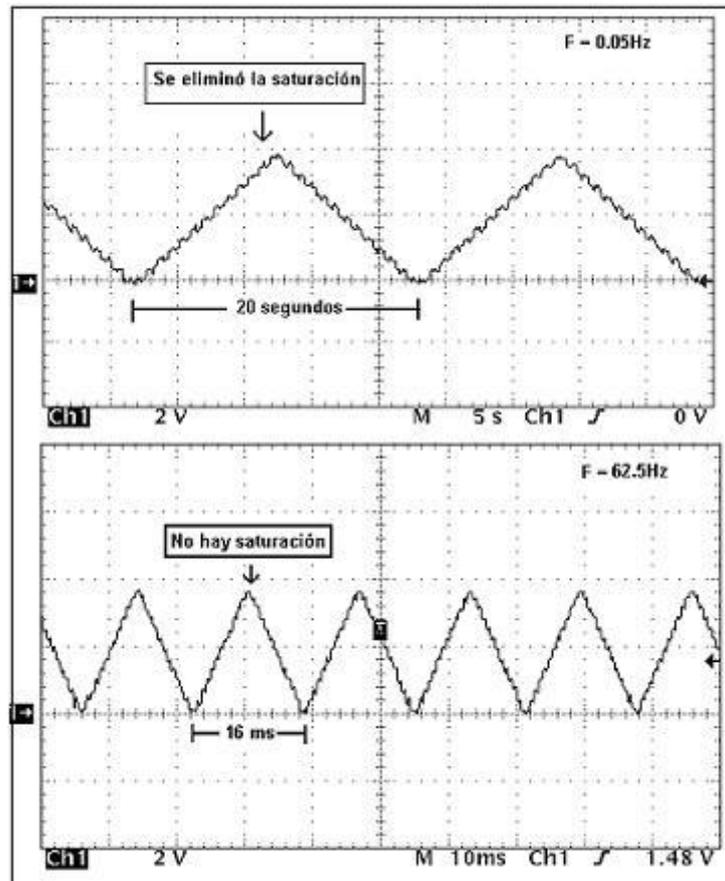


Figura 32. Respuesta dinámica del DAC con datos de 0 a 200.

6.2. CAS de entrada

En la figura 33 se presenta la señal de voz acondicionada de una persona hablando a volumen normal.

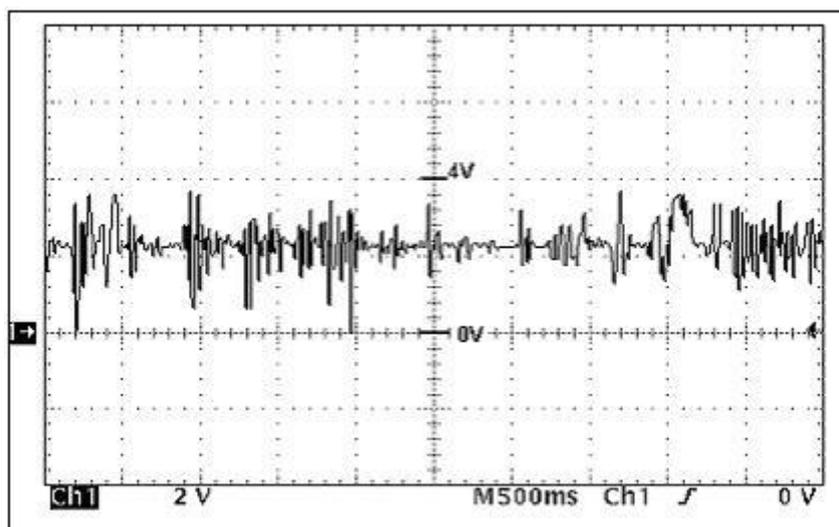


Figura 33. Señal de audio (persona hablando a volumen normal) acondicionada.

Así se corroboró el funcionamiento del circuito acondicionador de señal, pues la señal de audio está centrada en un valor medio de alrededor de 2V y

sus niveles se mantienen entre 0 y 4V, lo cual supone un proceso de conversión A/D correcto en la etapa siguiente.

Se concluye también que el nivel de amplificación que se logró en la señal de audio es adecuado, ya que para el usuario hablando a volumen normal no se dio ningún recorte de la señal, pero sí se logró una amplificación tal que permite aprovechar el rango del convertidor A/D.

En la figura 34 se observa la voz acondicionada de una persona hablando a un volumen muy alto.

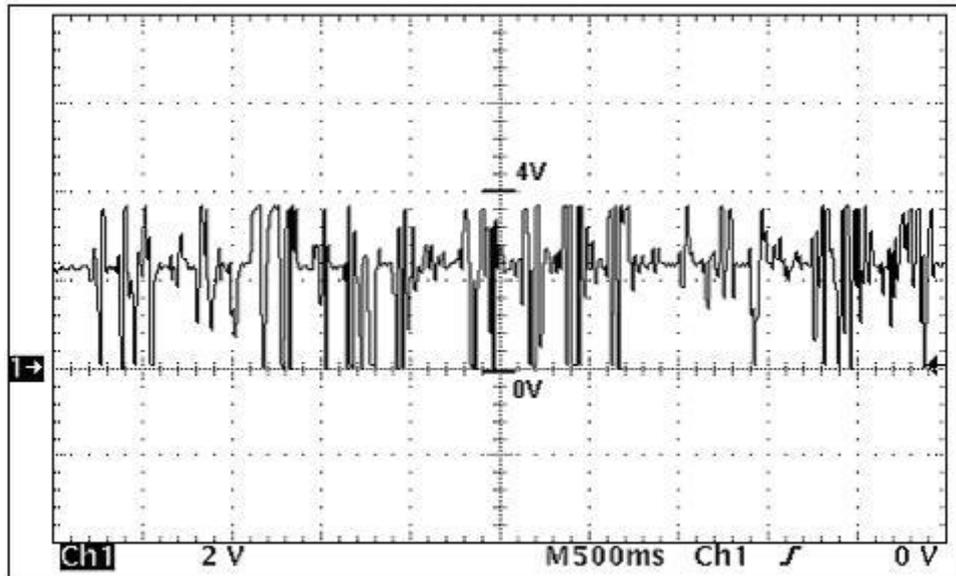


Figura 34. Señal de audio (persona gritando) acondicionada.

Se comprobó que los valores de tensión de salida del CAS nunca llegan a estar fuera del rango de entre 0 y 4V, acorde con lo esperado. Esto asegura conservar la integridad del microcontrolador pues se tiene la certeza de que no se presenten niveles de tensión fuera del rango que el PIC16F873A acepta y también se cumple con el requerimiento impuesto por el DAC en cuanto a los niveles máximos de tensión aprovechables.

6.3. Entrada y salida de voz al microcontrolador

Se programó en el microcontrolador una rutina de prueba que convirtiera a digital la señal de audio acondicionada y que entregara cada muestra hacia el módulo DAC. Para observar el comportamiento del sistema se montó el circuito de medición de la figura 35.

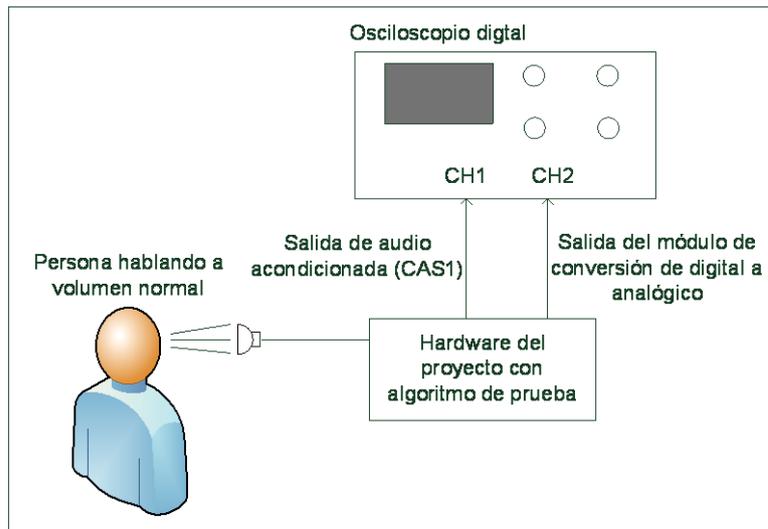


Figura 35. Circuito de medición para módulos ADC y DAC.

En la figura 36 se observan los resultados obtenidos con el circuito de medición.

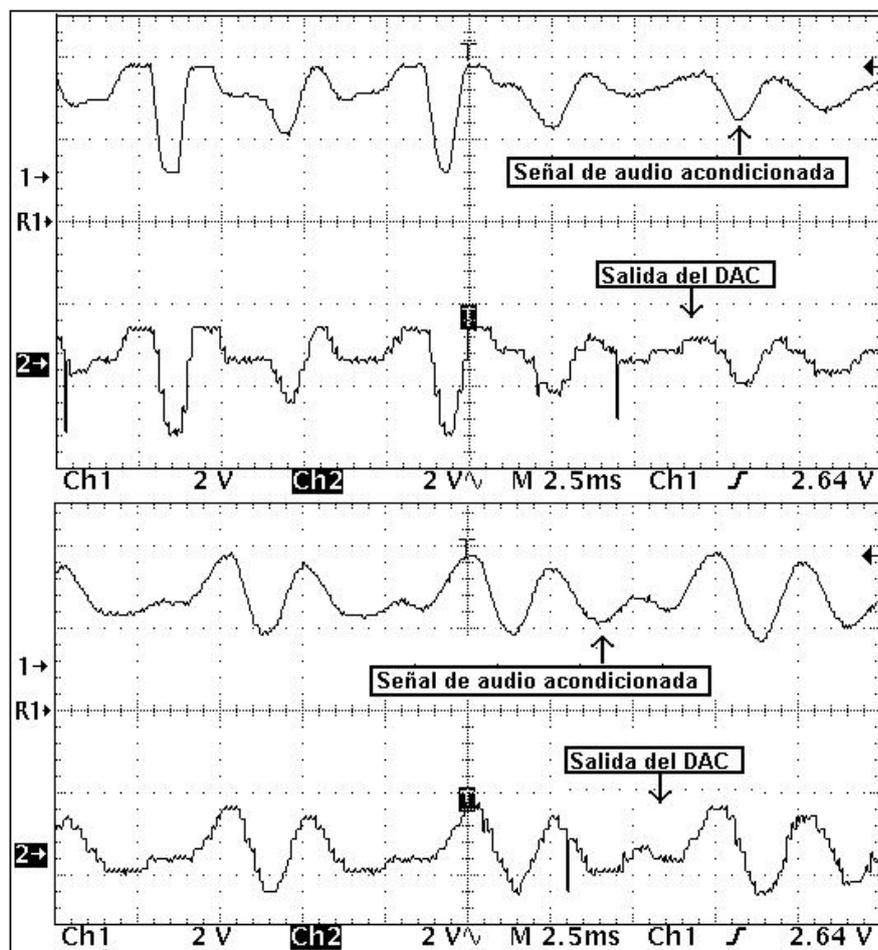


Figura 36. Comparación de señal de audio acondicionada y salida del DAC.

Se confirma el buen funcionamiento del proceso de conversión de voz de analógico a digital, así como el procesamiento de los datos digitales por parte del DAC0808, comprobando con ello la adecuada implementación de esos módulos.

Se comprueba entonces que tanto el hardware como el software que compone estas etapas funciona de manera correcta, pues la señal del canal 2 del osciloscopio sigue la misma forma de la señal del canal 1, con la diferencia de que está formada por niveles discretos de tensión, de acuerdo con lo esperado.

6.4. Filtro de reconstrucción

Se utilizó el mismo circuito de medición de la figura 35 pero en el canal 2 del osciloscopio se conectó la salida del filtro de reconstrucción del módulo DAC. En la figura 37 se muestran los resultados.

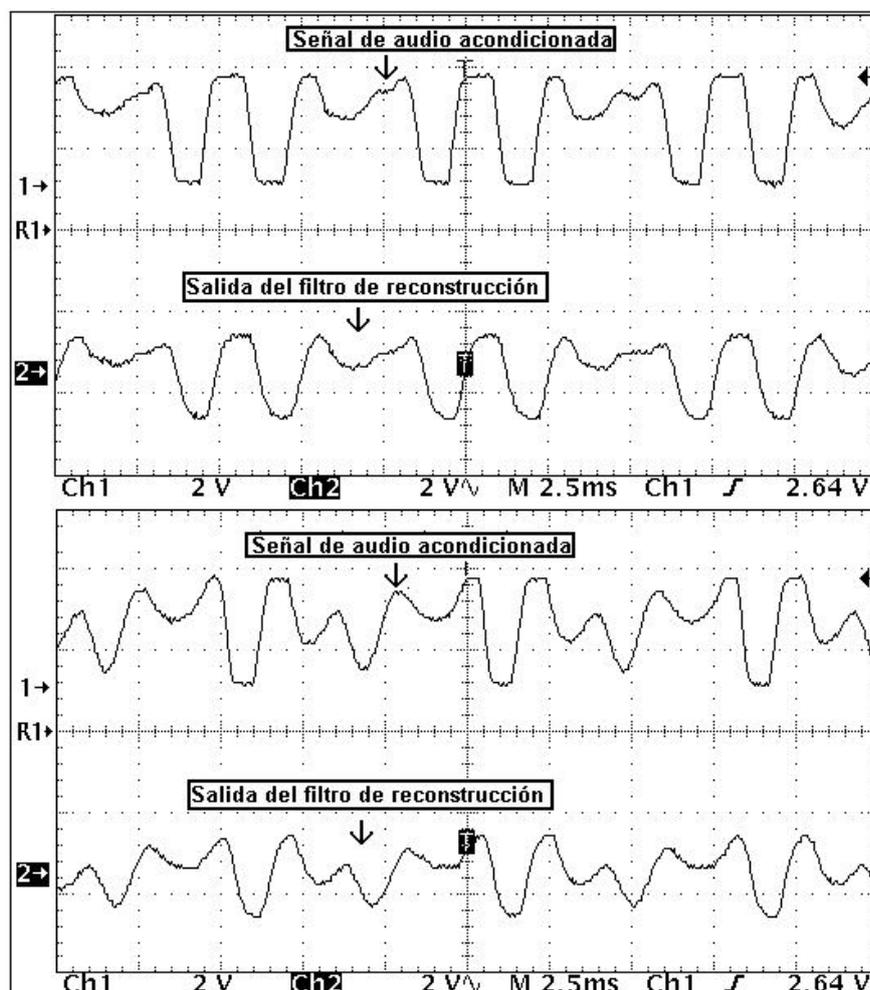


Figura 37. Comparación de señal acondicionada y salida filtro de reconstrucción.

El filtro de reconstrucción funcionó adecuadamente, pues la forma de la señal de audio de entrada y de la señal discretizada y filtrada presentan una gran similitud, lo cual supone una reproducción aceptable de la onda de sonido original en el receptor que se traduce en la inteligibilidad del audio transmitido.

Los resultados anteriores permiten comprobar el cumplimiento de objetivos referentes a la programación de los módulos involucrados en las pruebas. También se puede concluir con esos resultados que para las señales de audio probadas se logró el procesamiento de un ancho de banda suficiente para aplicaciones de transmisión de voz.

6.5. Comunicación PIC-transceptor

Se programó en el microcontrolador una rutina de prueba que enviara mediante el enlace SPI el dato 10011001_2 seguido del dato 11010011_2 , ambos inmediatamente después de la toma de cada muestra de audio. En la figura 38 se observan los resultados.

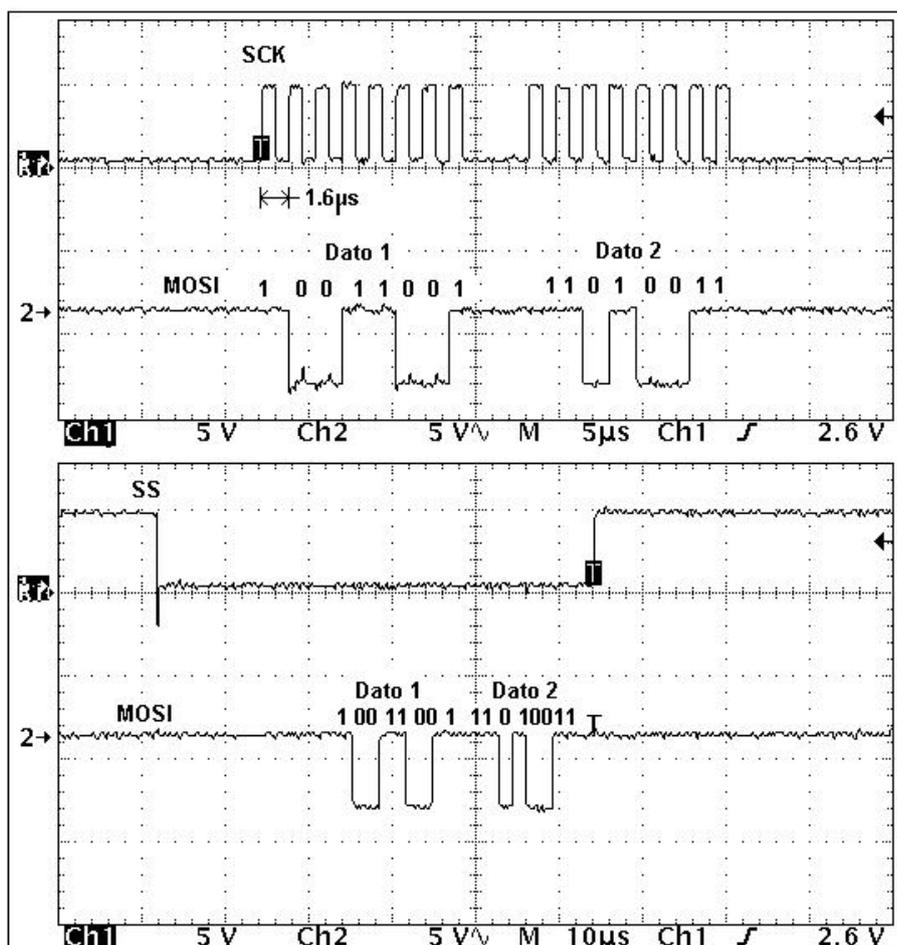


Figura 38. Señales de prueba del enlace SPI.

Se comprueba el adecuado funcionamiento del envío de datos hacia el transceptor a través del enlace SPI ya que la señal de SCK y SS presentan la sincronía esperada con los datos enviados a través de la línea MOSI. Además de esto, los datos y la tasa con que son enviados (625 kb/s) son los correctos de acuerdo con la rutina de prueba.

6.6. Consumo de potencia

En la tabla 10 se observa una comparación de la corriente demandada por el circuito (sin el módulo transceptor) con el uso de un cristal de 20MHz (usado en etapas iniciales) y con uno de 10MHz (de uso final). Se incluye el valor de la R_{flujo} (ver figura 15) requerida en cada caso y la potencia total disipada por el circuito.

Tabla 10. Comparación de consumo con diferentes cristales osciladores.

Frecuencia de cristal (MHz)	R_{flujo} (Ω)	Potencia que disipa R_{flujo} (mW)	Corriente total del sistema (mA)	Potencia total (mW)
20	150	106.6	29.8	268.2
10	500	32	14.0	126.0

Se corroboró que la frecuencia de operación del microcontrolador es un factor crítico que incide de forma directa en el consumo de potencia del sistema. Se observa que con el cambio del cristal oscilador se logró reducir el consumo de potencia en un factor de 2.12, lo cual contribuye a aumentar la autonomía del sistema.

La R_{flujo} usada con un cristal de 10MHz presenta un consumo de 32mW, lo cual representa un 25.4% del consumo total solamente en esta resistencia, cuya única función es crear un flujo de corriente para permitir el adecuado funcionamiento del regulador de tensión LM317.

Este hecho hace ver la necesidad de cambiar el esquema del circuito de alimentación en futuras optimizaciones del sistema en donde se elimine la necesidad de contar con esta resistencia. Lo que obligó a utilizar el esquema de alimentación propuesto en el presente proyecto fue el uso del circuito integrado DAC0808 cuya tensión mínima entre las terminales V_{cc} y V_{ee} es de 9V según los requerimientos brindados por el fabricante.

Para futuras optimizaciones es recomendable sustituir el DAC0808 por otro DAC, idealmente por uno cuyo voltaje de alimentación sea de 5V, lo cual permitiría el uso de un único regulador de tensión a +5V para éste y el resto de los componentes y evitaría la necesidad de la R_{flujo} al usar la misma referencia a 0V que el resto de los componentes.

Para determinar el tiempo de autonomía del sistema se tomó como base la curva de descarga teórica de una batería Duracell de 9V, la cual se presenta en la figura 39. [3]



Figura 39. Característica de descarga teórica de una batería Duracell de 9V.

El parámetro que se utilizó para establecer una medida objetiva del tiempo de autonomía de acuerdo con la descarga de la batería fue el tiempo en que ésta tarda en llegar a 7.34V. Para ello se partió de los valores de V_{OL} máximo del PIC16F873A y el V_{IL} máximo del transceptor nRF24L01 que se muestran en la tabla 11.

Tabla 11. Valores de V_{OL} máximo del microcontrolador y V_{IL} máximo del transceptor.

V_{OL} máximo del PIC16F873A	V_{IL} máximo del nRF24L01
0.6 V	$0.3V_{transceptor}$

Para un adecuado funcionamiento del sistema debe determinarse el mínimo valor del voltaje de alimentación proporcionado por la batería con el que se cumpla la correspondencia de los dos parámetros de la tabla 11 (para asegurar que el transceptor interprete de manera adecuada un cero lógico proveniente del microcontrolador). Se tiene que el voltaje de alimentación del transceptor obedece a la ecuación 6.1:

$$V_{transceptor} = \frac{3}{5} V_{cc} \quad (6.1)$$

de acuerdo con el circuito de la figura 19, donde V_{cc} es el voltaje de alimentación con respecto de la tierra de referencia. Además, la inecuación que debe ser satisfecha para cumplir con la restricción es la de la expresión 6.2:

$$V_{OL\max} \leq V_{IL\max} \quad (6.2)$$

al sustituir los valores de la tabla 11 y de la expresión (6.1) en (6.2) se obtiene finalmente que:

$$3.34 \leq V_{cc} \quad (6.3)$$

lo cual establece que el voltaje mínimo de la batería, que es igual a la suma de los 4V de la referencia y el V_{cc} mínimo obtenido, es de 7.34V.

En la figura 39 no se incluye ninguna curva que corresponda al consumo de 14mA presentado en este sistema, por lo que podría extrapolarse una curva ubicada entre la de 50mA y la de 10mA con una pendiente tal que la ubique más cercana a la curva de 10mA. A pesar de esto, sin precisar los valores exactos, la curva permite ver que fácilmente se logra cumplir con el objetivo de las 6 horas mínimas de autonomía.

Como complemento para evaluar el cumplimiento del objetivo de autonomía se realizó una prueba que consistió en alimentar el sistema (sin el módulo transceptor) con una batería nueva para medir el tiempo que tardaba en dejar de funcionar. El tiempo total fue de aproximadamente 11 horas.

Se aclara que no es factible usar como parámetro de tensión mínima de batería el voltaje de alimentación del microcontrolador ni el del transceptor, ya que el PIC16F873A operando a 10MHz permite una tensión de alimentación mínima de 3V, lo que corresponde a un voltaje de batería de 7V, y el transceptor nRF24L01 permite una tensión mínima de 1.9V, correspondiente a una tensión de batería de 7.17V, ambas menores que el parámetro elegido para el análisis.

6.7. Algoritmos del programa

En la tabla 12 se observa un resumen de los resultados del espacio de memoria del microcontrolador PIC16F873A ocupado por los programas compilados (módulos maestro y esclavo). Se presenta la cantidad de memoria de programa (ROM) y memoria de datos (RAM) usadas. En ambos casos el resultado se presenta como porcentaje calculado sobre la memoria total disponible.

Tabla 12. Espacio de memoria del PIC16F873A ocupado por los programas.

Programa	Memoria de programa relativa al total disponible (%)	Memoria de datos relativa al total disponible (%)
Módulo maestro	23	23
Módulo esclavo	24	25

La memoria usada no supera un cuarto del espacio total disponible en el microcontrolador en todos los casos, lo cual permite futuras optimizaciones y cambios a pesar de que el sistema se programó en su totalidad, y da una

medida de la eficiencia que se logró en el uso del espacio de memoria disponible.

En lo referente al funcionamiento de los algoritmos, el desempeño de algunos módulos del software fue probado. El adecuado funcionamiento del envío de datos con SPI, la conversión de analógico a digital y el método para sacar datos hacia el DAC fue corroborado con los resultados experimentales de las secciones anteriores.

En lo referente a las interrupciones, a partir del comportamiento de los indicadores visuales y la visualización de señales en respuesta a la manipulación de los botones de mando se determinó que dentro de las limitaciones que implica la ausencia del transceptor el sistema funcionó acorde con lo esperado.

6.8. Costo y portabilidad

Con el fin de hacer un recuento de la cantidad y el costo total de los componentes se incluye en la tabla 13 el listado de los componentes de cada módulo con sus respectivos precios.

Tabla 13. Listado y costo de los componentes de cada módulo.

Cantidad	Número de parte	Descripción	Proveedor	Precio unitario (USD)	Precio total (USD)
1	PIC16F873A	Microcontrolador	Digikey	7.15	7.15
1	NRF24L01	Transceptor de 2.4GHz	Nordic Semiconductor	2.05	2.05
1	RFD58002	Cristal SMT 16MHz	RF Digital	0.48	0.48
1	Mica 2.4GHz	Antena para 2.4GHz	Antenova	2.00	2.00
1	LM324	Set 4 Amp. Operacionales	Digikey	0.50	0.50
2	μ A741	Amplificador operacional	Digikey	0.84	1.68
1	LM317	Regulador de tensión	Digikey	0.53	0.53
1	-	Cristal oscilador 10MHz	Digikey	0.40	0.40
1	DAC0808	Convertidor D/A	Digikey	1.74	1.74
3	-	LED rojo	Mercado local	0.30	0.90
3	-	Pushbutton N.A.	Mercado local	0.40	1.20
4	-	Capacitores 1 μ F, 50V	Mercado local	0.12	0.48
5	-	Capacitores 100nF	Mercado local	0.10	0.50
2	-	Capacitores 1nF	Mercado local	0.08	0.16
2	-	Capacitores 10pF	Mercado local	0.02	0.04
10	-	Resistencias 1k Ω	Mercado local	0.02	0.20
6	-	Resistencias 10k Ω	Mercado local	0.02	0.12
4	-	Resistencias 47k Ω	Mercado local	0.02	0.08
10	-	Resistencias 100k Ω	Mercado local	0.02	0.20
3	-	Resistencias 4.7k Ω	Mercado local	0.02	0.60
9	-	Capacitores montaje sup.	Digikey	0.01	0.09
3	-	Inductancias montaje sup.	Digikey	0.01	0.03
2	-	Resistencias montaje sup.	Digikey	0.01	0.02
1	-	Batería Duracell de 9V	Mercado local	3.00	3.00
1	-	Audífonos	Mercado local	2.50	2.50
1	-	Micrófono	Mercado local	2.50	2.50
Total					29.15

Se logró el diseño de un prototipo de bajo costo con respecto de los sistemas comerciales que se tenían como referencia. Esto porque cada módulo del sistema Spokeman MA 2200 de la empresa KEC tiene un precio que supera en 4.72 veces al del prototipo diseñado, mientras que el precio de cada módulo del sistema de conferencias inalámbrico infrarrojo de la empresa TOA es alrededor de 31.4 veces más alto que el de este prototipo.

En la figura 40 se muestra una fotografía de la circuitería del prototipo de uno de los módulos.

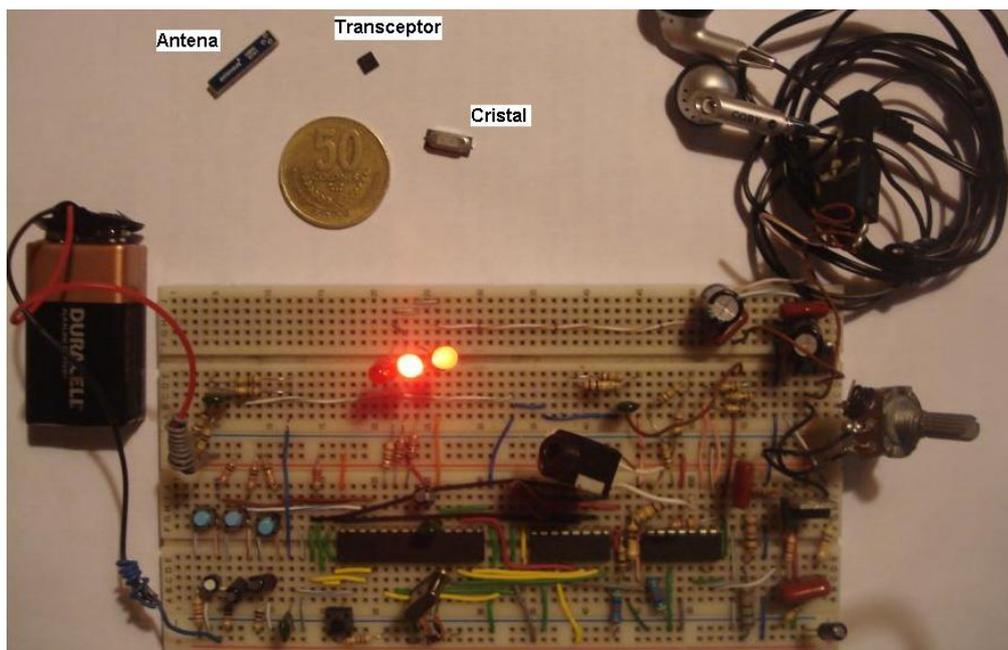


Figura 40. Fotografía de la circuitería de prototipo de un módulo.

Para estimar las dimensiones del panel de control en la implementación final, en la tabla 14 se incluyen las dimensiones de sus componentes principales (excepto los de módulo transceptor por sus reducidas dimensiones).

Tabla 14. Dimensiones de componentes principales de panel de control.

Componente	Dimensiones		
	Largo (cm)	Ancho (cm)	Profundidad (cm)
PIC16F873A	3.5	0.8	0.38
DAC0808	2.1	0.8	0.38
LM324	2.1	0.8	0.38
LM741	1.1	0.8	0.38
LM317	1.7	1.0	0.40
Batería 9V	4.7	2.7	1.8

El sistema cumple con características para ser considerado portátil pues se estima que en su implementación final el panel de control (incluyendo el espacio de la batería) tendrá un área de alrededor de 40cm², y tendrá forma rectangular con un ancho de 5cm, un largo de 8cm y una profundidad de 2.5cm. Se estima que el peso total de este panel (incluida la batería) sea de unos 150 gramos.

Capítulo 7: Conclusiones y recomendaciones

7.1. Conclusiones

El sistema desarrollado cumple con las siguientes características:

1. Es de bajo costo con respecto de otros disponibles en el mercado pues su precio total es de 29.15 dólares.
2. Es portátil pues se estima que el panel de control tendrá un área de 40cm^2 , un peso de 150g y su alimentación es proporcionada por una batería de 9V.
3. Es de bajo consumo con una disipación de potencia estimada de 126mW y con grandes posibilidades de optimización en este aspecto.
4. Permite una autonomía estimada de más de 6 horas debido a su bajo consumo.
5. Tiene las funcionalidades para que en una etapa futura sea capaz de transmitir audio con un ancho de banda de hasta 3.5kHz que permite la inteligibilidad de la voz humana.
6. El procesamiento que se realiza con la voz permite que en una etapa futura se transmita el audio con una SNR de al menos 43.9dB por utilizarse más de 7 bits para representar la señal en formato digital.
7. Cuenta con un protocolo de comunicación que cubre las necesidades básicas de las conferencias.

7.2. Recomendaciones

1. Sustituir el DAC0808 del módulo DAC por un convertidor cuya alimentación sea de 5V, para replantear el esquema de alimentación del sistema por uno más sencillo y que a la vez permita un menor consumo de potencia y un mejor desempeño.
2. Sustituir del módulo acondicionador de señal de salida (conexión hacia los audífonos) el amplificador LM324 por un amplificador de audio para lograr un mejor desempeño de esta etapa.
3. Una vez implementado el sistema es recomendable hacer pruebas exhaustivas para determinar si es necesario hacer modificaciones al protocolo de comunicación en caso de detectar pasos innecesarios o que no presenten un funcionamiento óptimo.
4. Evaluar la posibilidad de sustituir componentes por sus equivalentes en presentación para montaje superficial para contribuir aun más con la portabilidad del sistema.

Bibliografía y referencias

- [1] Alvarado, Pablo. Procesamiento digital de señales. Notas de clase, 2007. URL <<http://www.ie.itcr.ac.cr/palvarado/PDS/pds.pdf>> [Consulta: 8 de enero de 2008].
- [2] Cadavid M. Diana, Rodríguez P. Laura (Colombia). Trabajo de grado: Implementación de un sistema didáctico de transmisión por fibra óptica usando WDM. [en línea]: Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad del Valle [Cali], 2004. <<http://www.univalle.edu.co>> [Consulta: 9 de enero de 2008].
- [3] Duracell (Argentina). Ficha técnica: Batería 9V, alcalina, MN1300. [en línea]: Duracell <http://www.duracell.com/ar/comunes_alcalinas.asp> [consulta: 3 de junio de 2008].
- [4] E-A-R (Europa). Glosario de términos: La Ciencia y Tecnología del Sonido. [en línea]: E-A-R. <<http://www.e-a-r.info/es>> [Consulta: 24 de mayo de 2008].
- [5] Junta de Extremadura. Consejería de Educación (España). Ficha de Prevención: Problemas de la voz en docentes. [en línea]: Dirección General de Personal Docente. [Extremadura]. <<http://profex.educarex.es/profex/index.jsp>> [Consulta: 8 de enero de 2008].
- [6] KEC innovations (Singapur). Brochure: Spokeman Voice Amplifier MA2200. [en línea]: KEC innovations, 2004. <<http://www.kecinnovations.com>> [Consulta: 9 de enero de 2008].
- [7] Pérez R. Javier. Proyecto de graduación: Sistema de distribución inalámbrico de sonido para auditorios (I Etapa). Cartago: Instituto Tecnológico de Costa Rica. Junio, 2007.
- [8] See/Hear (Estados Unidos). Dispositivos de ayuda auditiva. [en línea]: Texas School for the Blind and visually Impaired [Texas], 2003. <<http://www.tsbvi.edu/Outreach/seehear/winter03/ald-span.htm>> [Consulta: 15 de junio de 2008].
- [9] Stremler, Ferrel. Sistemas de comunicación. 2ª ed. México: Addison-Wesley Publishing Company, Inc. 1989.
- [10] TOA Electronics, Inc (Estados Unidos). Ficha técnica: TS700 Series Portable Conference System. [en línea]: TOA Electronics, Inc. <<http://www.toaelectronics.com/>> [Consulta: 9 de enero de 2008].
- [11] Tomasi, Wayne. Sistemas de comunicaciones electrónicas. 2ª ed. México: Prentice Hall Hispanoamericana, S.A; 1994.
- [12] Universidad del País Vasco (España). El sonido y las ondas. [en línea]: Grupo de Acústica [País Vasco], 2003. <<http://www.ehu.es/acustica/>> [Consulta: 9 de enero de 2008].

[13] Universidad del País Vasco (España). La voz humana. [en línea]: Grupo de Acústica [País Vasco], 2003. <<http://www.ehu.es/acustica/>> [Consulta: 9 de enero de 2008].

Apéndices

A.1. Protocolo de comunicación

- Modo conferencia normal

1. Se encienden los dispositivos.
2. Se da a todos un tiempo de 0.5 segundos para estabilización.
3. Se configura el Maestro → Transmisor y los Esclavos → Receptores.
4. Se pone para Maestro y Esclavos a la variable **Modo = conferencia_normal**
5. Se activa la interrupción del ADC en el Maestro (inicia conversión A/D de la señal de audio entrante al PIC).
6. Se envía con SPI cada muestra de audio (8 bits) a la entrada del transceptor del Maestro.
7. Se envía cada muestra por el aire.
8. En los Esclavos cada muestra se extrae mediante SPI al llegar al transceptor (mediante interrupción externa) y luego se saca por los respectivos pines del PIC hacia el DAC para escuchar el sonido.
9. El proceso continúa hasta que el Maestro presione el **botón de Modo**.

- Modo de preguntas (pedir la palabra)

1. Al presionar el **botón de Modo** el Maestro envía el **código de cambio_a_modos_pedir_palabra** (8 bits) hacia los Esclavos.
2. Los Esclavos y el Maestro ponen variable **Modo = Pedir_palabra**.
3. El Maestro se configura como Receptor.
4. Los Esclavos se configuran como transmisores.
5. Cuando un Esclavo presiona el **botón de Acción**, éste envía un **código de duda_planteada** (que es el mismo para cualquier Esclavo) e inmediatamente se configura como receptor.
6. Al llegarle al Maestro ese código, estando en el modo presente, se incrementa un **contador de dudas planteadas**, el Maestro se configura como transmisor y transmite un **código de duda_aceptada** junto con el número que el contador tiene en ese momento.
7. Este código sólo lo toma el Esclavo que tuvo duda (porque al haber solicitado la palabra estará pendiente de si fue o no aceptado), y lo asigna a la **variable Número de Participante con duda**, así él tendrá derecho a la primera duda, éste luego se configura como receptor y variable **Modo = discusión**, se enciende su indicador visual de duda_aceptada.

Posible excepción:

- a. Si pasan más de 0.5 segundos sin ser la duda aceptada el Esclavo se vuelve a configurar como transmisor para tener derecho a solicitar la duda de nuevo, el usuario lo sabrá pues su indicador no se encenderá.
8. El Maestro se vuelve a configurar como receptor para seguir atendiendo dudas y continúa con este proceso (aumentando el contador y asignando el número de duda en el orden que llegan las solicitudes) hasta que se cumpla el **tiempo para dudas** (alrededor de 10 segundos).

Posibles excepciones:

- a. El hecho de que dos o más Esclavos transmitan solicitud de duda exactamente al mismo tiempo es muy difícil, ya que los datos se transmiten a 1Mbit/s, y son sólo 8 bits, de modo que la transmisión dura alrededor de 8µs. A pesar de ello, si esto ocurre, lo que pasa es que llega un código inentendible al Maestro, con lo que éste no interpretará que se le está solicitando la palabra y no pasa nada, luego de ello los usuarios que solicitaron duda verán que no les fue aceptada y podrán seguir intentando hasta que su indicador les señale que ya están en cola.
 - b. Cuando un Esclavo X solicitó la palabra y queda como receptor, los otros Esclavos siguen estando como transmisores, de modo que al Esclavo X podrían llegarle transmisiones de los otros. Esto no es problema pues corresponderán a código que éste no espera, de modo que no lo afectan.
9. Una vez que se cumple el tiempo para dudas todos los Esclavos se pasan al **modo = discusión**.
10. Todos los Esclavos se configuran como receptores y el Maestro como transmisor. Al Maestro se le asigna **modo = discusión**.

• Modo discusión de dudas:

1. El indicador duda_pendiente del Maestro parpadeará hasta que las dudas se hayan atendido por completo.
2. Cuando el Maestro presiona el botón **Siguiente** para discutir la duda que sigue en el orden que dicta el **contador de dudas resueltas** (que inicia por el primero hasta igualar al valor al que llegó el otro contador), enviará un **código de discutir duda** seguido del número correspondiente, el cual le indicará al Esclavo respectivo que es su turno. El Maestro se configura como receptor.
3. Ese Esclavo se configura como transmisor y se inicia en dicho módulo la conversión A/D de la salida de audio y su transmisión por el aire, de modo que los demás Esclavos y el Maestro podrán escucharlo sacando cada muestra de audio por los pines respectivos del PIC hacia el DAC.

Posible excepción:

- a. Si en este momento se unen a la conferencia nuevos Esclavos éstos estarán configurados como receptores y podrán escuchar la charla sin problema.
4. Cuando el Esclavo quiere intercambiar el uso de la palabra presiona el **botón Toggle** y envía el **código de cambio de palabra** que lo configura a él como Rx y al Maestro como Tx. Si el Maestro decide cambiar de participante, presiona el **botón Siguiente**, lo cual incrementa su contador, transmite **código de fin de duda** y luego el **código de discutir duda** seguida del número de contador, así hasta agotar todas las dudas. Si no desea cambiar de participante podrá presionar Toggle e intercambiar la palabra (configurarse él como receptor y al Esclavo como transmisor).

Posible excepción:

- a. Si en este momento se unen a la conferencia nuevos Esclavos o bien los que se habían recientemente unido simplemente

escucharán todo, los códigos que les ingresen no serán mayor problema pues lo interpretarán como audio, y al ser sólo dos muestras ni siquiera será perceptible para los usuarios.

- b. Si un Esclavo está hablando y el Maestro quiere quitarle la palabra sin que el Esclavo lo desee, el Maestro podrá hacerlo presionando el **botón Toggle** pues el Esclavo automáticamente estará preguntando cada 1 segundo (con el código de **duda planteada** reutilizado acá para evitar el uso de muchos códigos) si tiene derecho a seguir hablando, y la acción siguiente será permitirlo o no por medio de un **código de Continúe** o el **código de fin de duda** respectivamente que el Maestro emitirá como contestación.
5. Cuando todas las dudas se resuelvan el expositor lo sabrá pues el indicador de duda pendiente de su módulo se apagará, éste entonces decidirá si finaliza la exposición o bien si quiere ingresar a conversación privada con un Esclavo, lo cual indicará el usuario del Maestro de forma explícita al participante con que desea hablar.
 - a. Si efectivamente desea que haya conversación privada presionará el **botón de Modo** y se transmite el código de **conversación privada**. Éste y los Esclavos se pondrán en dicho modo.
 6. El Esclavo indicado presionará el **botón de Acción** (debe hacerlo antes de que pasen 5 segundos) y trasmite **código de aceptar conversación privada** al Maestro, el cual lo acepta también con el envío del código de **aceptar conversación privada** y quedan ligados. Al pasar 5 segundos los demás Esclavos se configuran como receptores.

- Modo conversación privada

1. En este modo, cualquiera que esté hablando (Maestro o Esclavo elegido) transmitirán de forma automática cada 1 segundo el **código de aceptar conversación privada**, el cual deshabilita a cualquier usuario que pueda unirse a la conferencia en ese momento.
2. Ante la llegada del código de aceptar conversación privada todos los Esclavos que no sean el elegido tendrán una especie de *Mute* en sus audífonos (las muestras de audio tendrán un valor nulo) de modo que no podrán oír esa conversación.
3. El Maestro y el Esclavo elegido se intercambiarán la palabra por medio del **botón Toggle** que cada uno posee y simplemente se configuran cada uno como transmisor o receptor según corresponda.

A.2. Diagramas de flujo de interrupciones del microcontrolador

En la figura 41 se incluye el diagrama de flujo de la rutina de interrupción del temporizador 0 del módulo maestro.

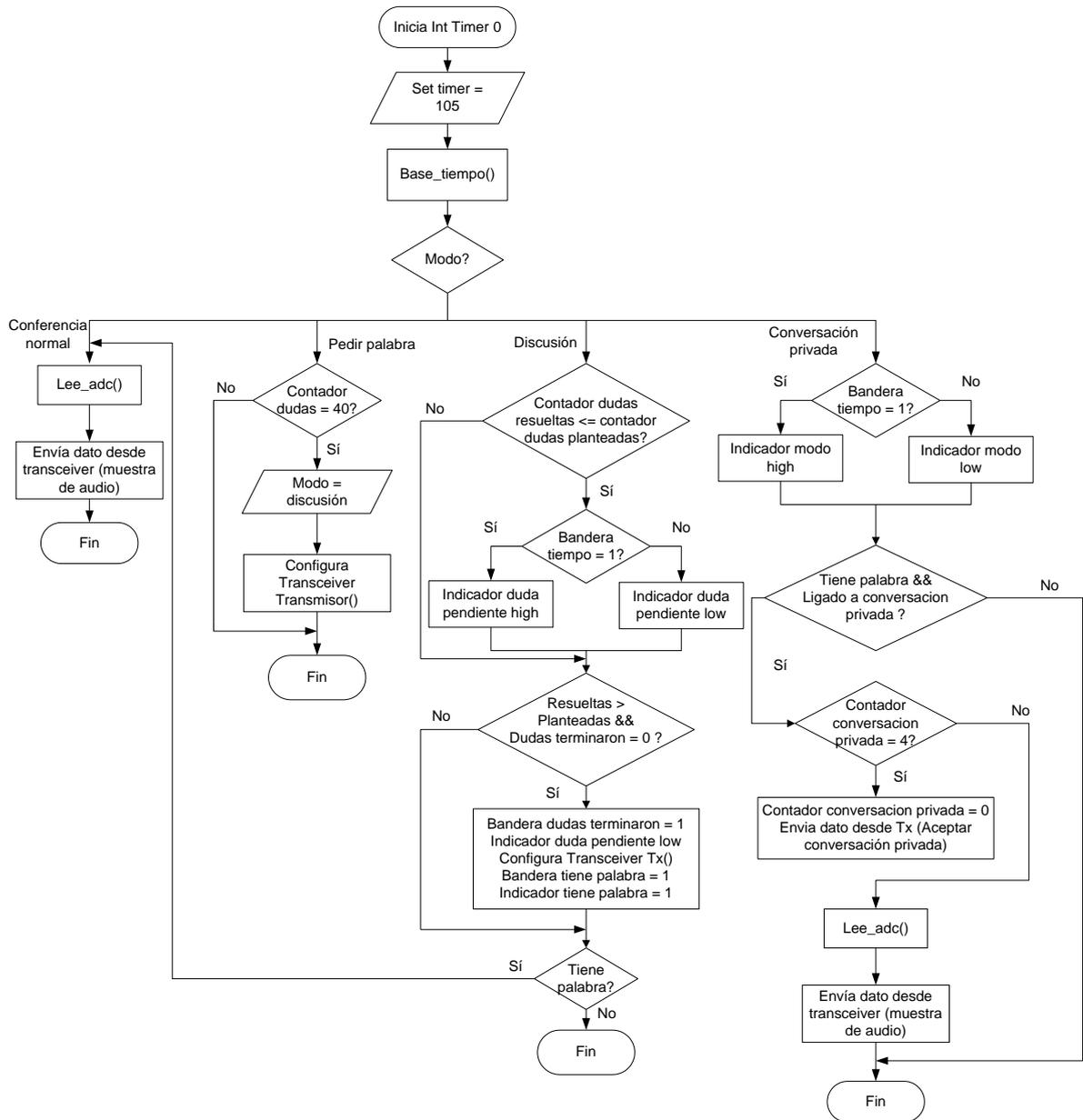


Figura 41. Interrupción del temporizador 0 en módulo maestro.

En la figura 42 se incluye el diagrama de flujo de la rutina de interrupción del temporizador 0 del módulo esclavo.

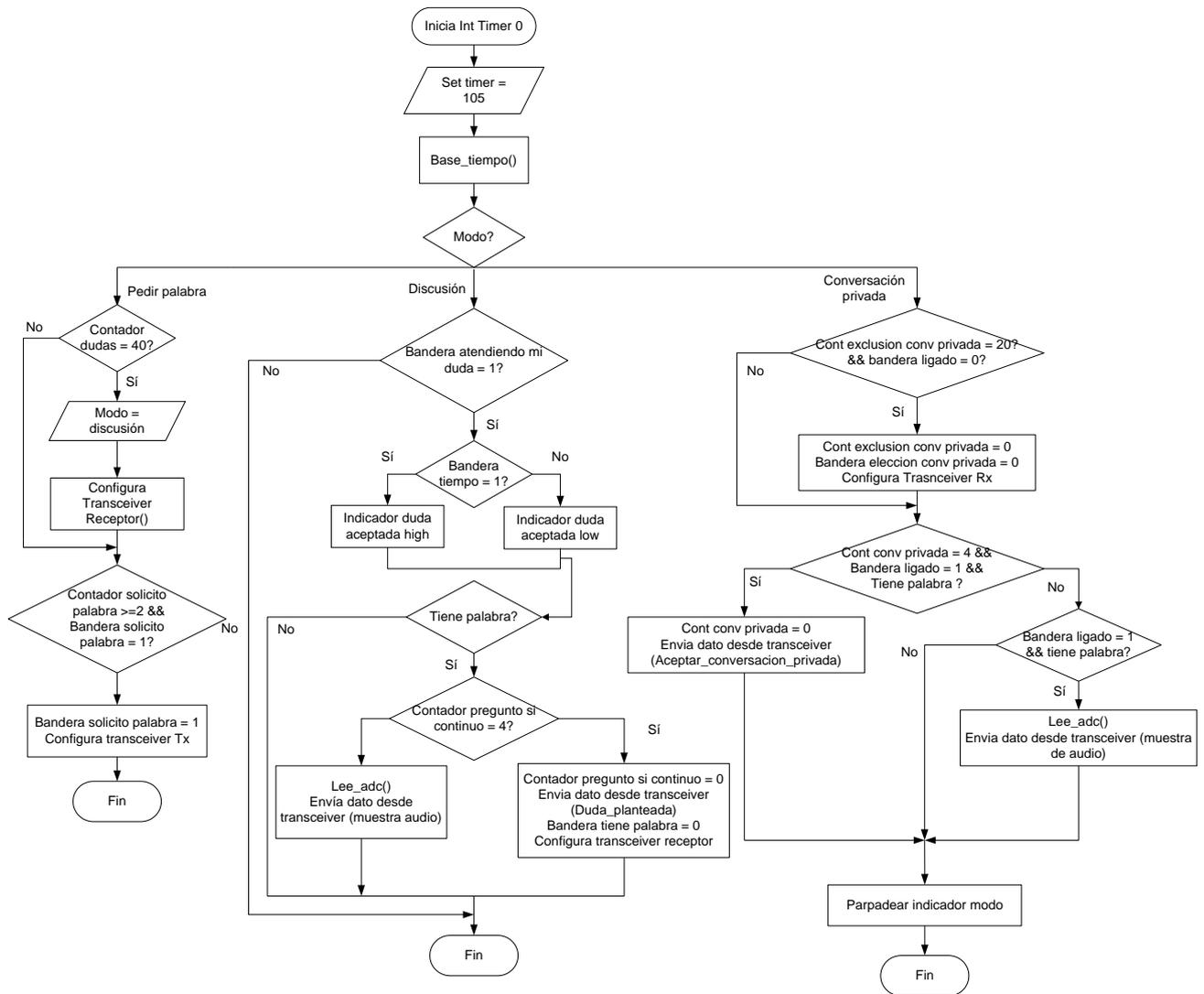


Figura 42. Interrupción del temporizador 0 en módulo esclavo.

En la figura 43 se incluye el diagrama de flujo de la rutina de interrupción de cambio en puerto B.

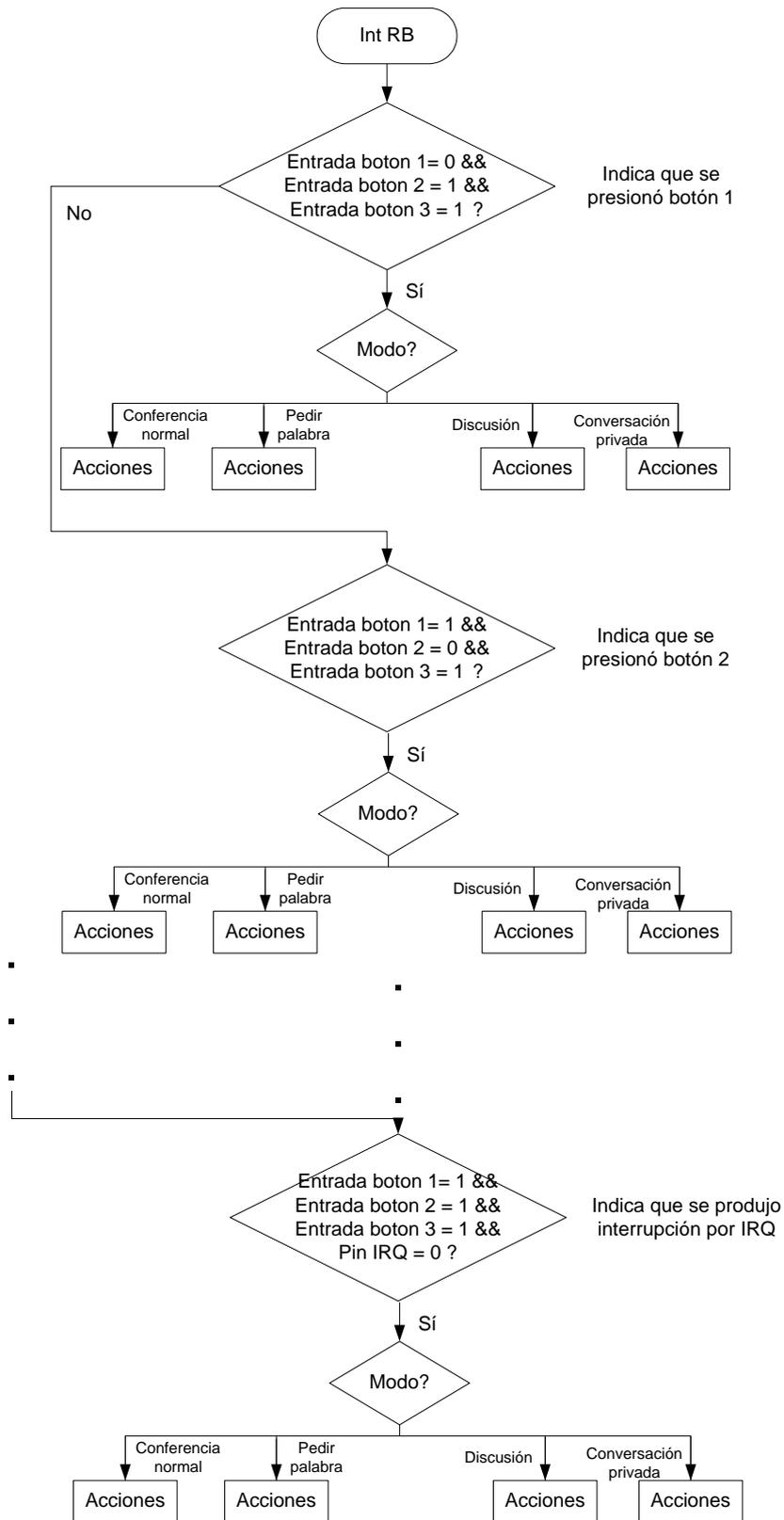


Figura 43. Estructura general de interrupción RB.

A.3. Descripción de banderas de estado y contadores

- **Bandera_base_tiempo:** el estado de esta bandera es invertido cada 0.25s y se utiliza para los indicadores visuales que requieren un parpadeo (utilizada en módulos maestro y esclavo).
- **Bandera_tiene_palabra:** esta bandera se utiliza en ambos módulos. Se activa cuando el usuario tiene la palabra y se desactiva en caso contrario.
- **Bandera_quitar_palabra:** esta bandera la utiliza el módulo maestro, pues se activa cuando el expositor desea quitarle la palabra a un participante que está hablando en el modo de dudas.
- **Bandera_dudas_terminaron:** esta bandera del módulo maestro indica que se han atendido las dudas en su totalidad.
- **Bandera_ligado:** esta bandera se activa en el maestro y también en el esclavo que es aceptado para realizar una conversación privada con el expositor.
- **Bandera_transmisor:** esta bandera del módulo maestro y del esclavo indica que dicho módulo está configurado como transmisor, si está inactiva significa que el módulo está configurado como receptor.
- **Bandera_solicitó_palabra:** esta bandera se activa en los módulos esclavos que solicitaron la palabra en el modo para dudas.
- **Bandera_duda_aceptada:** bandera de módulos esclavos que indica con su estado activo que la duda de dicho participante fue aceptada.
- **Bandera_discutir_duda:** el estado activo de esta bandera le indica a todos los módulos esclavos que pidieron la palabra que el módulo maestro ha enviado el código para discutir una duda (de modo que esperan al siguiente dato para determinar a cuál le corresponderá tener la palabra).
- **Bandera_atendiendo_mi_duda:** esta bandera se activa en el módulo esclavo cuya duda está siendo atendida.
- **Bandera_elección_conversación_privada:** esta bandera se levanta en los módulos esclavos cuando el módulo maestro envía el código de conversación privada. Se desactiva al cabo de 5 segundos en los módulos que no fueron elegidos para conversación privada, en el módulo elegido se mantiene activa.
- **Bandera_espero_confirmación:** esta bandera se activa cuando el módulo esclavo elegido para conversación privada envía la solicitud al módulo maestro y queda en espera de que este último le confirme para quedar ligados.
- **Contador_dudas:** este contador presente en ambos módulos permite pasar del modo de pedir palabra hacia el modo para discutir dudas 10 segundos después de haber entrado al modo de pedir palabra (cuando llega a un valor de 40 pues se incrementa cada 0.25s).

- Contador_dudas_planteadas: este contador del módulo maestro se incrementa con cada duda que es planteada y aceptada, de modo que al pasar al modo de discutir dudas este contador tiene registrado el número de dudas totales.
- Contador_dudas_resueltas: presente en el módulo maestro. Se incrementa cada vez que una duda es resuelta y permite saber cuándo todas las dudas han sido atendidas al comparar su valor con el contador anterior.
- Contador_conversación_privada: presente en ambos módulos. Permite al módulo que tenga la palabra durante una conversación privada enviar cada 1 segundo un dato que evite que participantes que recién se incorporen a la conferencia escuchen esta conversación.
- Contador_solicitó_palabra: este contador presente en los módulos esclavos permite la opción de volver a solicitar la palabra a aquellos módulos que por algún motivo su duda no haya sido aceptada 0.5s después de haberla planteado.
- Contador_pregunto_si_continúo: este contador de los módulos esclavos permite que éstos verifiquen de forma periódica si tienen permiso de seguir hablando en el modo de discusión de dudas.
- Contador_exclusión_conversación_privada: permite establecer una base de tiempo después de la cual, aquellos módulos esclavos que no hayan sido elegidos para conversación privada entren en un estado en el que no pueden escuchar la conversación.