

Fundamentos de Señales Telefónicas y Codificación de Voz en Matlab

Darwin Cristhian Turpo Quispe, Luque Llanqui Vladimir Williams, Maldonado Lima Roger Jhon

Escuela Profesional de Ingeniería en Telecomunicaciones

Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa

Repositorio: https://github.com/DarwinTQ/lab_sistemas_telefonia/tree/main/lab01

I. INTRODUCCIÓN

La transición de la telefonía analógica a la digital se basa en principios de procesamiento de señales que garantizan la eficiencia y calidad de la comunicación. Dos de los pilares de esta tecnología son la señalización DTMF para la marcación y la modulación PCM para la digitalización de la voz.

El objetivo de este laboratorio es comprender y simular estos fundamentos. Primero, se aborda la generación de tonos DTMF, visualizando su composición como la suma de dos sinusoides y verificando sus componentes espectrales. Segundo, se explora el proceso de digitalización de una señal de voz mediante PCM, analizando los efectos del error de cuantización. Finalmente, se compara la cuantización uniforme con la no uniforme, implementada a través de la técnica de companding Ley-A, para evaluar su impacto en la calidad de la señal de voz mediante métricas objetivas (SNQ) y subjetivas (MOS).

II. MARCO TEÓRICO

A. Tonos DTMF (Dual-Tone Multi-Frequency)

Sistema de señalización por tonos utilizado en telefonía donde cada dígito está representado por dos tonos sinusoidales simultáneos:

- Frecuencias bajas: 697, 770, 852, 941 Hz
- Frecuencias altas: 1209, 1336, 1477, 1633 Hz

B. Modulación PCM (Pulse Code Modulation)

Proceso de digitalización de señales analógicas:

- Muestreo: $f_s \geq 2f_{max}$ (Teorema de Nyquist)
- Cuantización: $Q = \frac{2^N - 1}{A}$
- Codificación: Representación binaria

C. Companding

Técnica de compresión-expansión:

- Ley A: $y = \frac{1 + \ln(A)}{A} |x|$ para $|x| < \frac{1}{A}$
- Ley μ : $y = \frac{\ln(1 + \mu)}{\ln(1 + \mu|x|)}$

D. Métricas de Calidad

- SNQ: $SNQ = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{señal}}{P_{error}} \right)$
- MOS: Escala subjetiva 1-5

Identify applicable funding agency here. If none, delete this.

III. DESARROLLO

A. Generación y Análisis de Tonos DTMF

Los parámetros iniciales, como una frecuencia de muestreo $f_s = 8000$ Hz y una duración de 0.5 segundos por tono.

TABLE I
MATRIZ DE FRECUENCIAS DTMF

| | 1209 Hz | 1336 Hz | 1477 Hz | 1633 Hz |
|--------|---------|---------|---------|---------|
| 697 Hz | 1 | 2 | 3 | A |
| 770 Hz | 4 | 5 | 6 | B |
| 852 Hz | 7 | 8 | 9 | C |
| 941 Hz | * | 0 | # | D |

B. Modulación PCM y Codificación de Voz

Carga de Señal: Se cargó un archivo de audio 'voz_prueba.wav' o, en su defecto, se generó una señal sintética. La señal fue normalizada.

PCM Uniforme: Se aplicó cuantización uniforme a la señal de voz utilizando diferentes resoluciones: 4, 8 y 12 bits. Se comparó gráficamente la señal original con la señal cuantizada.

PCM con Companding Ley-A: La señal de voz original fue primero comprimida usando la Ley-A con un valor estándar de $A = 87.6$. Posteriormente, se aplicó una cuantización uniforme de 8 bits a la señal comprimida.

Evaluación de Calidad: Se calculó y comparó la SNQ para la PCM uniforme de 8 bits y para la PCM de 8 bits con companding Ley-A. Con base en los valores de SNQ, se estimó una puntuación MOS para cada caso.

Análisis Espectral y Auditivo: Finalmente, se reprodujeron las señales de audio (original, PCM uniforme y PCM con companding) para una comparación auditiva y se graficaron sus respectivos espectros de frecuencia.

IV. RESULTADOS

A. Análisis de Tonos DTMF

La figura 1 muestra la forma de onda de la señal DTMF para el dígito '5' en el dominio del tiempo. Se observa una señal periódica compleja, resultado de la suma de dos sinusoides.

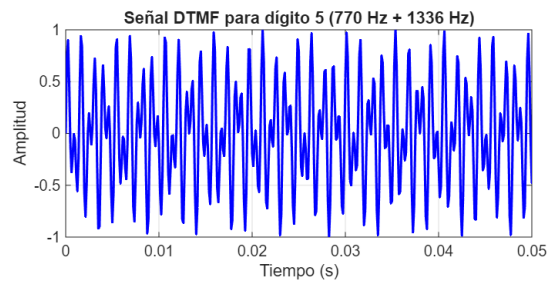


Fig. 1. Forma de onda DTMF para el dígito '5'.

La figura 2 muestra el espectro de frecuencias de la señal DTMF para el dígito '5'. Se identifican claramente los picos en las frecuencias correspondientes a 770 Hz y 1336 Hz, confirmando la composición dual-tone de la señal.

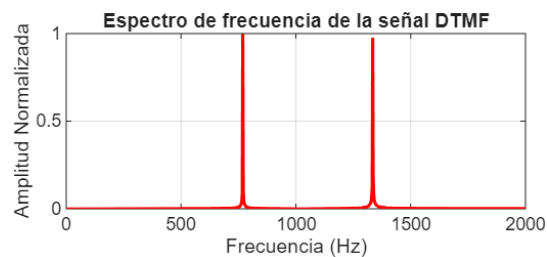


Fig. 2. Espectro de frecuencias DTMF para el dígito '5'.

La figura 3 muestra la forma de onda de la señal DTMF para el dígito '1' en el dominio del tiempo. Se observa una señal periódica compleja, resultado de la suma de dos sinusoides.

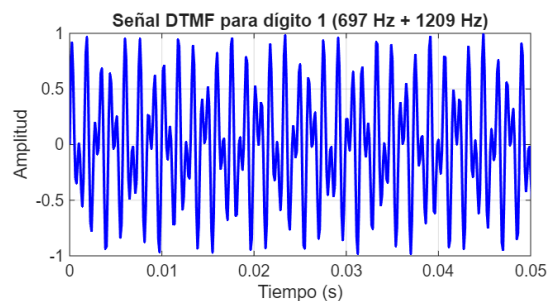


Fig. 3. Forma de onda DTMF para el dígito '1'.

La figura 4 muestra el espectro de frecuencias de la señal DTMF para el dígito '1'. Se identifican claramente los picos en las frecuencias correspondientes a 697 Hz y 1209 Hz, confirmando la composición dual-tone de la señal.

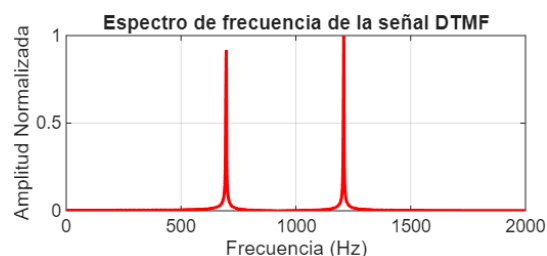


Fig. 4. Espectro de frecuencias DTMF para el dígito '1'.

La figura 5 muestra la forma de onda de la señal DTMF para el dígito 'C' en el dominio del tiempo. Se observa una señal periódica compleja, resultado de la suma de dos sinusoides.

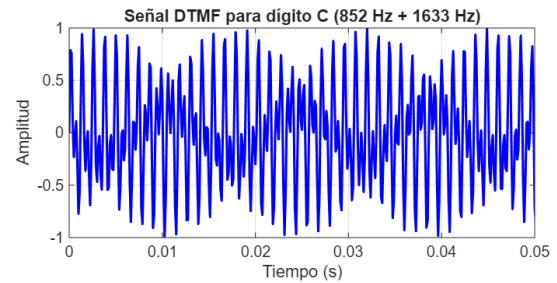


Fig. 5. Forma de onda DTMF para el dígito 'C'.

La figura 6 muestra el espectro de frecuencias de la señal DTMF para el dígito 'C'. Se identifican claramente los picos en las frecuencias correspondientes a 852 Hz y 1477 Hz, confirmando la composición dual-tone de la señal.

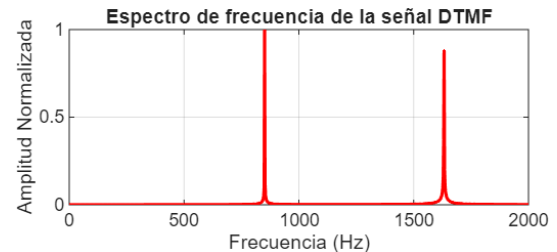


Fig. 6. Espectro de frecuencias DTMF para el dígito 'C'.

B. Modulación PCM y Codificación de Voz

Creación del archivo de audio voz_prueba.wav con una señal de voz sintética.

```
=== GRABADORA DE VOZ ===
Frecuencia: 8000 Hz
Duración: 5 segundos
Archivo: voz_prueba.wav
```

Preparando grabación...

Grabando durante 5 segundos...

HABLE AHORA...

Grabación completada.

Archivo guardado: voz_prueba.wav

Duración: 5.00 segundos

Muestras: 40000

Error al guardar el archivo: Unrecognized field na

¿Reproducir grabación? (s/n): s

Reproduciendo...

=== PROCESO COMPLETADO ===

El archivo voz_prueba.wav está listo para usar.

MODULACIÓN PCM Y CODIFICACIÓN DE VOZ

El archivo voz_prueba.wav está listo para usar

```

SNQ PCM Uniforme 8-bit: 39.88 dB
SNQ PCM + Companding A-law 8-bit: -3.09 dB
Reproduciendo voz original...
Reproduciendo voz con PCM uniforme 8-bit...
Reproduciendo voz con companding A-law...

```

```

--- CALIDAD DE VOZ ESTIMADA ---

```

```

PCM Uniforme 8-bit: MOS = 4.5

```

```

PCM + Companding: MOS = 2.5

```

```

>> parte2

```

```

SNQ PCM Uniforme 8-bit: 39.88 dB

```

```

SNQ PCM + Companding A-law 8-bit: -3.09 dB

```

```

Reproduciendo voz original...

```

```

Reproduciendo voz con PCM uniforme 8-bit...

```

```

Reproduciendo voz con companding A-law...

```

```

--- CALIDAD DE VOZ ESTIMADA ---

```

```

PCM Uniforme 8-bit: MOS = 4.5

```

```

PCM + Companding: MOS = 2.5

```

```

>>

```

La figura 7 muestra PCM uniforme con 4, 8 y 12 bits respectivamente. Se observa que a medida que aumenta la cantidad de bits, la señal cuantizada se aproxima más a la señal original, reduciendo el error de cuantización.

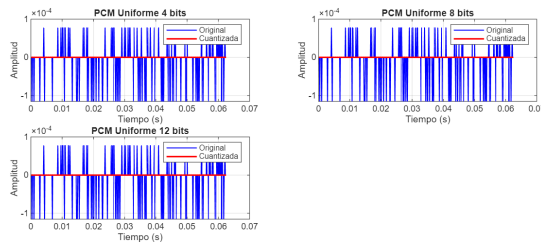


Fig. 7. PCM uniforme con 4, 8 y 12 bits.

La figura 8 muestra Espectro voz original, espectro PCM uniforme 8 bits, espectro error de cuantización y espectro PCM + companding A-law. Se observa que la PCM con companding A-law presenta un espectro más cercano al de la señal original, indicando una mejor preservación de las características de la voz.

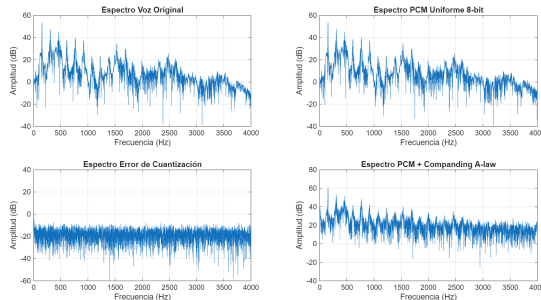


Fig. 8. Espectros de voz original, PCM uniforme 8 bits, error de cuantización y PCM + companding A-law.

V. CONCLUSIONES

- Se comprobó que la señalización DTMF funciona mediante la combinación de dos frecuencias específicas, lo que permite identificar de manera única cada dígito telefónico.
- En la modulación PCM, se verificó que el número de bits de cuantización influye directamente en la calidad de la señal digitalizada: a mayor número de bits, menor error y mejor calidad de voz.
- El uso de técnicas de companding (Ley A o Ley μ) mejora la relación señal/ruido de cuantización y permite obtener una mejor calidad percibida sin necesidad de incrementar el número de bits.
- Se comprobó que la elección de la frecuencia de muestreo (f_s) es crítica para evitar aliasing. Esto confirma lo establecido por el teorema de Nyquist-Shannon, que asegura una reconstrucción fiel de la señal cuando $f_s \geq 2f_{max}$.
- El laboratorio permitió comprender de manera práctica cómo los procesos de muestreo y cuantización influyen directamente en la calidad del audio digital. Se comprobó que una reducción en el número de bits de cuantización genera un incremento en el error y en la distorsión de la señal, afectando la fidelidad de la voz y su inteligibilidad.

REFERENCES

- [1] IEEE, "IEEE Conference Templates," [En línea]. Disponible en: <https://www.ieee.org/conferences/publishing/templates>. [Accedido: 16 sep. 2025].
- [2] MathWorks, "MATLAB Graphics Documentation," [En línea]. Disponible en: <https://la.mathworks.com/help/matlab/graphics.html>. [Accedido: 16 sep. 2025].
- [3] Anthropic, "Claude AI Assistant," [En línea]. Disponible en: <https://claude.ai>. [Accedido: 16 sep. 2025].