



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA ELECTRÓNICA

TÍTULO DE TESIS:

SÍNTESIS DE INTEGRADORES DE ORDEN FRACCIONARIO
USANDO HARDWARE ANALÓGICO REPROGRAMABLE
Y SU APLICACIÓN EN UN OSCILADOR CAÓTICO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

LIC. EN ING. EN MECATRÓNICA

PRESENTA:

CIRO FABIÁN BERMÚDEZ MÁRQUEZ

ASESOR:

DR. JESÚS MANUEL MUÑOZ PACHECO



PUEBLA, PUEBLA, SEPTIEMBRE, 2020

Agradecimientos

Agradezco a mi familia por el apoyo incondicional que siempre me han brindado, es debido a ellos que estoy cumpliendo esta meta.

Agradezco especialmente a mi madre Juana Márquez Huerta por siempre haber estado presente cuando la necesité.

Agradezco inmensamente a mi novia Julisa Verdejo Palacios porque es debido a ella que comencé con este trabajo.

Agradezco a mi asesor de tesis, el Dr. Jesús Manuel Muñoz Pacheco por su paciencia, confianza, apoyo y conocimientos compartidos.

Agradezco al jurado de tesis por sus recomendaciones, las cuales propiciaron una mejora en la calidad del manuscrito.

Agradezco al CONACYT que a través del programa Ciencia Básica me otorgó una beca para el desarrollo de esta tesis de licenciatura mediante el proyecto no. 258880 de nombre SÍNTESIS DE INTEGRADORES DE ORDEN FRACCIONARIO USANDO HARDWARE ANALÓGICO REPROGRAMABLE Y SU APLICACIÓN EN UN OSCILADOR CAÓTICO.

Los autores agradecen al Laboratorio Nacional de Supercómputo del Sureste de México perteneciente a la red de laboratorios nacionales CONACYT, por los recursos computacionales, el apoyo y la asistencia técnica.

Agradezco a la Facultad de Ciencias de la Electrónica de la BUAP, a mis profesores y compañeros por ayudarme en cada paso de esta travesía.

Índice general

Agradecimientos	I
Índice general	V
Índice de figuras	VII
Índice de tablas	XI
Resumen	XV
1. Introducción	1
1.1. Justificación	2
1.2. Objetivos	4
1.2.1. Objetivo general	4
1.2.2. Objetivos específicos	4
2. Fundamentos teóricos	5
2.1. Definición de Grünwald-Letnikov	5
2.1.1. Definición de derivada de Grünwald-Letnikov	6
2.1.2. Definición de integral de Grünwald-Letnikov	6
2.1.3. Método numérico para la definición de GL	6
2.2. Definición de Riemann-Liouville	7
2.2.1. Definición de integral de Riemann-Liouville	7
2.2.2. Definición de derivada de Riemann-Liouville	8
2.3. Transformada de Laplace de integrales y derivadas fraccionarias	8
2.4. Expansión de fracciones continuas (CFE)	8
2.4.1. Análisis de error de la CFE	12
2.5. Escalamiento en frecuencia	16
2.6. Teoría de filtros	17
2.6.1. Filtros de primer orden	17
2.6.2. Filtros de segundo orden	19

3. Implementación de integradores fraccionarios	23
3.1. ¿Qué es una FPAA?	23
3.2. Características de la tarjeta y requerimientos	23
3.2.1. Alimentación de la tarjeta	23
3.2.2. Instalación de drivers	24
3.2.3. Jumpers por defecto	24
3.2.4. Tamaño variable de cadena de FPAAs	25
3.2.5. DIP Switches	26
3.2.6. Filtros Rauch y buffers de salida	27
3.2.7. Circuito de prueba	29
3.3. AnadigmDesigner2	30
3.3.1. Comunicación con AD2	30
3.3.2. Equivalencia de conexiones en tarjeta y en software	32
3.3.3. Configuración de relojes	34
3.4. Lookup Table	35
3.5. NI ELVIS II+	38
3.5.1. ¿Qué es la NI ELVIS II+?	38
3.5.2. Instalación	38
3.5.3. Puesta en marcha y calibración	38
3.5.4. Diagramas de Bode	40
3.5.5. Ejemplo práctico	41
3.6. Implementación con aproximación de primer orden	44
3.6.1. Filtro bilineal configuración polo y cero	44
3.6.2. Filtro bilineal configuración pasabajas y pasaaltas	52
3.7. Implementación con aproximación de segundo	56
3.7.1. Filtro bicuadrático configuración polo cero	56
4. Oscilador caótico utilizando integradores de orden fraccionario	65
4.1. Oscilador caótico basado en funciones no lineales saturadas (SNLF)	65
4.2. Función deestabilizadora	65
4.3. Variables de estado del oscilador en orden fraccionario	66
4.4. Implementación en FPAA	67
4.4.1. Configuración bilineal polo y cero	68
4.4.2. Configuración bilineal suma de filtros	69
5. Conclusiones	75
A. Códigos	77
B. Gráficas de análisis de integrador fraccionario con CFE	85

Índice general	v
----------------	---

C. Esquemático de QuadApex v2.0	95
---------------------------------	----

Bibliografía	97
--------------	----

Índice de figuras

2.1. Diagramas de Bode comparativos de integrador fraccionario $\alpha = 0.5$, funciones de transferencia de primero hasta quinto orden.	12
2.2. Diagrama de Bode comparativo de función de transferencia escalada. .	17
2.3. Singularidades de filtros de primer orden en el plano s	18
2.4. Definición de los parámetros ω_0 y Q de un par de polos conjugados. . .	20
2.5. Singularidades de filtros de segundo orden en el plano s	21
3.1. Esquemático simplificado de DIP Switches.	26
3.2. Diferentes representaciones de filtro Rauch.	27
3.3. Esquemático del buffer de salida.	29
3.4. Información de la placa desplegada por AD2.	32
3.5. Equivalencias de pines físicos en AD2.	33
3.6. Conexiones necesarias al activar DIP switches.	33
3.7. Ventana de configuración de frecuencias de reloj en AD2.	34
3.8. Circuito en AD2 utilizando lookup table.	37
3.9. Medición en osciloscopio de lookup table.	37
3.10. Gráfica generada con código A.3.	37
3.11. Diagrama de conexiones de NI ELVIS II+.	39
3.12. Puertos y switches de NI ELVIS II+.	39
3.13. Puestos BNC de osciloscopio de NI ELVIS II+.	41
3.14. Fuentes de alimentación en NI ELVIS II+ y FGEN.	41
3.15. Diagrama esquemático de filtro pasabajos activo.	42
3.16. Diagrama de Bode experimental utilizando el NI ELVIS II+.	43
3.17. Diagramas de Bode comparativos, respuesta ideal, simulación y experimental.	43
3.18. Diagrama de Bode de ecuación (3.26) para un integrador fraccionario con $k_f = 2\pi 1000$ y $\alpha = 0.5$	45
3.19. Ventana de configuración de parámetros FilterBilinear.	46
3.20. Gráfica de mérito, análisis de orden fraccionario dependiente de n para implementación con CAM FilterBilinear.	48

3.21. Implementación de integrador de orden fraccionario utilizando la aproximación de primer orden.	49
3.22. Configuración de Clocks: FPAA1 con aproximación de primer orden. . .	49
3.23. Configuración de los CAM con aproximación de primer orden.	50
3.24. Resultados experimentales de respuesta en frecuencia con $\alpha = 0.5$	50
3.25. Diagrama de bode de comparativo, respuesta teórica contra experimental, $k_f = 2\pi 1000$ y $\alpha = 0.5$	51
3.26. Análisis transitorio de aproximación de primer orden.	51
3.27. Medición experimental de análisis transitorio con error de saturación. .	52
3.28. Gráfica de mérito, análisis de orden fraccionario dependiente de n para implementación con suma de filtros.	54
3.29. Implementación de integrador de orden fraccionario utilizando la aproximación de primer orden configuración suma de filtros.	55
3.30. Configuración de Clocks: FPAA1 con aproximación de primer orden para implementación con suma de filtros.	55
3.31. Configuración de los CAM con aproximación de primer orden para implementación con suma de filtros.	55
3.32. Resultados experimentales de respuesta en frecuencia con $\alpha = 0.5$ configuración de dos filtros y punto suma.	56
3.33. Diagrama de Bode de comparativo, respuesta teórica contra experimental configuración de dos filtros y punto suma, $k_f = 2\pi 1000$ y $\alpha = 0.5$. .	56
3.34. Diagrama de Bode de ecuación (3.47) para un integrador fraccionario con $k_f = 2\pi 1000$ y $\alpha = 0.5$	58
3.35. Gráfica de mérito, análisis de orden fraccionario dependiente de n para implementación con CAM FilterBiquad teórica INCORRECTA.	61
3.36. Implementación de integrador de orden fraccionario utilizando la aproximación de segundo orden.	61
3.37. Configuración de Clocks: FPAA1 con aproximación de segundo orden. .	62
3.38. Configuración de los CAM con aproximación de segundo orden.	62
3.39. Resultados experimentales de respuesta en frecuencia con $\alpha = 0.5$	62
3.40. Diagrama de Bode de comparativo, respuesta teórica contra experimental, $k_f = 2\pi 1000$ y $\alpha = 0.5$	63
4.1. Función no lineal saturada de dos enrollamientos.	66
4.2. Solución de sistema de orden fraccionario de la ecuación (4.3).	67
4.3. Diagrama de implementación en AD2 configuración bilineal polo y cero. .	68
4.4. Configuración de clocks de todos los FPAA.	69
4.5. Configuración de los CAM de FPAA1.	69
4.6. Configuración de los CAM de FPAA2.	69

4.7. Configuración de los CAM de FPAA3.	70
4.8. Configuración de los CAM de FPAA4.	70
4.9. Función de saturación $k = 2$, $s = 1$ y $\beta = 1.5$	70
4.10. Vistas de plano fase del comportamiento del oscilador caótico con $\alpha = 0.8$ y dos enrollamientos.	71
4.11. Respuesta en el dominio temporal de oscilador caótico con $\alpha = 0.8$ y dos enrollamientos.	71
4.12. Diagrama de implementación en AD2 configuración bilineal suma de filtros.	72
4.13. Configuración de clocks de todos los FPAA.	72
4.14. Configuración de los CAM de FPAA1.	72
4.15. Configuración de los CAM de FPAA2.	73
4.16. Configuración de los CAM de FPAA3.	73
4.17. Configuración de los CAM de FPAA4.	73
4.18. Vistas de plano fase del comportamiento del oscilador caótico con $\alpha = 0.8$ y dos enrollamientos.	74
4.19. Respuesta en el dominio temporal de oscilador caótico con $\alpha = 0.8$ y dos enrollamientos.	74
 B.1. Diagramas de magnitud de aproximaciones de integrador fraccionario general.	86
B.2. Diagramas de fase de aproximaciones de integrador fraccionario general.	87
B.3. Diagramas de error de magnitud de aproximaciones de integrador fraccionario general.	88
B.4. Diagramas de error de fase de aproximaciones de integrador fraccionario general.	89
B.5. Diagramas de magnitud normalizada de aproximaciones de integrador fraccionario general.	90
B.6. Diagramas de fase normalizada de aproximaciones de integrador fraccionario general.	91
B.7. Diagramas de error de magnitud normalizada de aproximaciones de integrador fraccionario general.	92
B.8. Diagramas de error de fase normalizada de aproximaciones de integrador fraccionario general.	93
 C.1. Diagrama esquemático de QuadApex v2.0	95

Índice de tablas

2.1.	Aproximaciones racionales de $\frac{1}{s^{0.5}}$	11
2.2.	Máximo error absoluto de magnitud en dB variando α y orden de función de transferencia.	13
2.3.	Máximo error absoluto de fase en grados variando α y orden de función de transferencia.	13
2.4.	Máximo error absoluto de magnitud normalizado en % variando α y orden de función de transferencia.	14
2.5.	Máximo error absoluto de fase normalizado en % variando α y orden de función de transferencia.	14
2.6.	Promedio de error absoluto de magnitud normalizado en % variando α y orden de función de transferencia.	15
2.7.	Promedio error absoluto de fase normalizado en % variando α y orden de función de transferencia.	15
3.1.	Resumen de jumper de la placa.	25
3.2.	DIP Switches	26
3.3.	CAMs básicos de AD2.	31
3.4.	Equivalencias de IOCell en AD2 a físicos pines en tarjeta en FPAA. . .	32
3.5.	Conexiones de DIP switches.	33
3.6.	Valores para configurar un filtro bilineal como integrador de orden fraccionario en el rango de ordenes de 0.1 a 0.95.	47
3.7.	Rango de frecuencias absolutas dependiente de F_c y el valor de n	47
3.8.	Valores para configurar implementación suma de pasabajas y paaltas de ordenes de 0.1 a 0.95.	53
3.9.	Valores para configurar implementación de segundo orden FilterBiquad de ordenes de 0.1 a 0.95.	60
3.10.	Resumen de configuraciones para aproximación de integradores fraccionarios utilizando la CFE.	63
4.1.	Conexiones de DIP switches, jumpers y cables externos.	67

4.2. Valores para configurar un filtro bilineal como integrador de orden fraccionario con $\alpha = 0.8$	68
4.3. Valores para configurar implementación suma de pasabajas y paaltas de ordenes de 0.1 a 0.95.	71

Lista de códigos

A.1. Función syms2tf	77
A.2. Función cfetf	77
A.3. Generar lookup table	78
A.4. Simulación spice pasabajas	78
A.5. Diagramas de Bode comparativos ideal vs spice vs experimental	78
A.6. A10_calculo_valores_FilterBilinear	79
A.7. A11_rango_de_frecuencias_absolutas_FilterBilinear	80
A.8. A12_grafica_analisis_de_frecuencias_FilterBilinear	80
A.9. B10_calculo_valores_suma_filtros	81
A.10.B12_grafica_analisis_de_frecuencias_suma_filtros	81
A.11.C10_calculo_valores_FilterBiquad	82
A.12.Función saturación	82

Resumen

Este trabajo de tesis presenta un análisis teórico de la expansión de fracciones continuas o Continued Fraction Expansion (CFE) para su utilización en la creación de integradores de orden fraccionario. Se realiza el análisis del error que esta aproximación presenta y se genera una metodología de diseño de acuerdo al orden fraccionario mediante la utilización de un algoritmo recursivo.

Utilizando hardware analógico embebido (FPAA) y por medio del dispositivo NI ELVIS II+ se realiza la implementación física de los integradores de orden fraccionario y se realiza la medición de su respuesta en frecuencia por medio de diagramas de Bode. Utilizando los resultados se realiza un análisis comparativo teórico contra experimental y se desarrollan gráficas de mérito para facilitar el proceso de diseño posterior.

Finalmente se utilizan las metodologías obtenidas para realizar la implementación de un oscilador caótico de orden fraccionario.

Capítulo 1

Introducción

El caos se refiere a un tipo de comportamiento dinámico complejo que posee algunas características muy especiales, tales como extrema sensibilidad a pequeñas variaciones de la condición inicial, trayectorias encerradas en el espacio de fase pero con un exponente de Lyapunov positivo, un espectro de potencia continuo entre muchas otras. En pocas palabras, el caos es simplemente un comportamiento impredecible de un sistema determinista. Es de interés resaltar que los sistemas caóticos ya eran conocidos desde hace mucho tiempo atrás y que no fue hasta hace poco que se logró demostrar que el caos puede ser controlado y debido a esto impactar en muchas áreas, tanto en áreas cercanas a la electrónica como técnicas de modulación, sistemas de comunicación, técnicas de encriptación de datos, como también en áreas relacionadas a los sistemas biológicos, reacciones químicas, toma de decisiones críticas en política, economía, eventos militares, etc [1]. El caos es un fenómeno que ocurre en muchos sistemas no lineales, donde la naturaleza determinista de la estructura se conjuga con la irregularidad del comportamiento, esto significa que, a pesar del hecho de que el sistema se describe mediante un conjunto de ecuaciones diferenciales ordinarias, donde todos los términos son perfectamente conocidos, su comportamiento es irregular y muy sensible a las condiciones iniciales. La primera evidencia de imprevisibilidad en los sistemas deterministas se encuentra en el trabajo del matemático y científico Henri Poincaré sobre el movimiento celestial, mientras que la primera formulación del caos en un modelo matemático expresado por un conjunto de ecuaciones diferenciales ordinarias que exhiben el caos se debe al matemático y meteorólogo Edward Lorenz que se encontraba estudiando un modelo de movimiento del aire en la atmósfera y descubrió cómo pequeñas variaciones en los valores iniciales de las variables de su modelo dieron como resultado predicciones meteorológicas divergentes [2]. Para el momento de esos estudios faltaba una prueba experimental definitiva del caos y la tecnología y poder de cómputo no eran suficientes para pensar aún en soluciones y aún más distantes las aplicaciones. Debido al constante avance de la electrónica, hoy en día somos capaces de sintetizar mediante dispositivos electrónicos sistemas caóticos, utilizando técnicas de modelado

e implementación es posible crear representaciones de estos, no obstante, todas estas se basan en aproximaciones que aún no han sido exploradas en su totalidad. Por otro lado, el cálculo fraccionario es un tema que tiene más de 300 años de antigüedad y que se remonta a cartas enviadas a Leibniz por parte de Bernoulli y de L'Hôpital preguntando acerca de la derivada a la $1/2$ e indagando sobre su significado. Con el paso de los años la teoría de cálculo fraccionario se fue desarrollando pasando por las manos de nombres conocidos como: Euler, Lagrange, Laplace, Fourier hasta llegar a Liouville, Riemann, Grünwald, Letnikov, Caputo entre muchos otros [3]. Pero aún con todo ese desarrollo no fue hasta hace poco que la comunidad científica comenzó a interesarse por esta rama del cálculo y la razón principal de este cambio es que los cálculos necesarios para cualquier posible implementación eran demasiado complejos y lentos, un panorama totalmente diferente se vive en la actualidad, el rápido avance de la tecnología ha logrado realizar avances notables en esta área. El rango de aplicaciones para el cálculo fraccionario es inmenso, por mencionar algunas de las más recientes, la modelación de derivadas fraccionarias para obtener una mejor representación comportamental de un sistema industrial metalúrgico [4], la incorporación de dinámica de orden fraccionaria para mejorar la robustez de un control PI/PID para motores DC [5, 6], la modelación de señales biológicas como ECG, EMG y EEG debido a su respuesta de magnitud de 20dB, modelos fisiológicos basados en ecuaciones diferenciales lineales que describen fenómenos complejos en el cuerpo humano como la oxigenación de la sangre entre otros [7]. El cálculo fraccionario y los sistemas caóticos se complementan al añadir un nivel de profundidad en la creación de osciladores caóticos modelados como un conjunto de ecuaciones diferenciales no lineales fraccionarias las cuales son materia prima para la creación de nuevas aplicaciones y áreas de desarrollo.

1.1. Justificación

Los osciladores caóticos son una área de oportunidad emergente cuyas aplicaciones han aumentado en los últimos años, a principios del siglo XX se comenzó a explorar el uso de osciladores caóticos para la detección de señales pequeñas basados en la propiedad de extrema sensibilidad a pequeños cambios de la condición inicial que estos presentan [8], y en la seguridad de sistemas de comunicación ya sea en tiempo continuo o discreto [9]. Casi al mismo tiempo los sistemas de orden fraccionario comenzaron nuevamente a formar parte del interés de la comunidad científica y se abrieron las puertas al control de sistemas de orden fraccionario y cómo implementarlos [10, 11]. Los intentos de implementaciones físicas de sistemas de orden fraccionario han avanzado mucho recientemente y se pueden categorizar en digitales, los cuales utilizan sistemas discretos basados en microprocesadores o FPGAs cuya complejidad radica en poder generar un software robusto que sea lo suficiente confiable [12]. Por el otro lado se

encuentran las implementaciones analógicas, las cuales son de gran interés en este trabajo. En la literatura de esta área podemos encontrar implementaciones basadas en la construcción de capacitores electrolíticos especiales que se aproximan al comportamiento fraccionario pero cuya fabricación es compleja [13], métodos electro-químicos que trabajan con compuestos de difícil manipulación y tienen ordenes que no pueden modificarse fácilmente [14], finalmente y en lo que se enfocará este trabajo se encuentran las aproximaciones de funciones racionales en un ancho de banda determinado utilizando los métodos de Newton, Oustaloup, Carlson, Matsuda o expansión de fracciones continuas (CFE) [15, 16, 17]. Una vez que la función de transferencia es obtenida, esta se sintetiza utilizando diferentes metodologías, como la realización pasiva que hace uso de resistencias, capacitores e inductores, con el inconveniente de poder ajustarse a los valores comerciales, o la realización activa, que utiliza las técnicas de diseño basadas en amplificadores operacionales [18, 19]. Una alternativa a estas metodologías es la sintetización utilizando dispositivos analógicos embebidos programables FPAA (Field Programmable Analog Array). Las FPAA han demostrado ser una arquitectura prometedora que facilita mucho el proceso de implementación de circuitos analógicos debido a que su interfaz se basa en Módulos Analógicos Configurables (CAM), los cuales son bloques que pueden interconectarse fácilmente y representan desde circuitos sencillos como integradores, derivadores, sumadores o inversores hasta circuitos más complejos como filtros completos y multiplicadores [20]. Sin embargo en el ámbito tanto de integradores fraccionarios como de osciladores caóticos aún existen metodologías nuevas por explorar, en algunos artículos científicos ya se ha mostrado cómo implementar un integrador de orden fraccionario utilizando la aproximación de Oustaloup y CAMs de filtros bilineales [21], no obstante la cantidad de recursos para crear un solo integrador es muy grande, lo cual da pie a ser mejorado utilizando aproximaciones diferentes, para este trabajo, la expansión de fracciones continuas. La implementación de osciladores caóticos basados en sistemas de ecuaciones diferenciales de orden entero utilizando una FPAA ya ha sido explorada en años recientes [22], sin embargo los basados en sistemas de ecuaciones diferenciales de orden fraccionario aun se encuentran en una etapa temprana y son ideales para ser estudiados. Las aplicaciones de los osciladores caóticos van en aumento y ser capaces de implementarlos se ha vuelto una tarea relevante. Sistemas similares a estos en la actualidad se están utilizando en aplicaciones médicas, como en la detección de señales cardíacas [23] y en la creación de radares UWB que tienen un futuro prometedor en la medicina [24].

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Diseño e implementación electrónica de integradores de orden fraccionario mediante la expansión de fracciones continuas para su aplicación en sistemas caóticos.

1.2.2. Objetivos específicos

- Analizar el método de expansión de fracciones continuas para generar una metodología de diseño en MATLAB.
- Caracterizar el error de la expansión de fracciones continuas para generar reglas de diseño.
- Diseñar e implementar en FPAA integradores de orden fraccionario con aproximaciones de ordenes superiores.
- Medir la respuesta en frecuencia de los integradores de orden fraccionario y comparar los resultados experimentales y teóricos.
- Diseñar e implementar de FPAA un oscilador caótico de orden fraccionario.

Capítulo 2

Fundamentos teóricos

Cuando se comienza el estudio de cálculo de orden entero es necesario familiarizarse con la notación de los operadores matemáticos de la derivada y la integral, con el cálculo fraccionario ocurre lo mismo. La notación más utilizada para el cálculo de orden entero es la dada por Leibniz en (1686), donde el operador diferencial de n -ésimo orden esta definido como: $\frac{d^n}{dt^n}$, D_t^n o simplemente D^n con $n \in \mathbb{N}$. Utilizando el mismo razonamiento, puede definirse su operador inverso (anti-derivada) de manera que el operador inverso de la derivada de n -ésimo orden está dado por: ${}_a D_t^{-n}$, donde $n \in \mathbb{N}$ y $a \in \mathbb{R}$ representa el límite inferior del dominio de la región donde se aplica dicho operador.

Para generalizar el operador diferencial e integral para orden fraccionario se considera que este puede definirse para parámetros de orden real o incluso complejo. Esto implica que los operadores pueden definirse respectivamente como: D^α y ${}_a D_t^\alpha$ con $\alpha \in \mathbb{R}$.

Es importante tener presente que no una hay una única definición para los operadores diferencial e integral fraccionarios, sino varias expresiones definidas por diferentes autores, entre las mas usadas se encuentran la definición de Grünwald-Letnikov (GL), la de Riemann-Liouville (RL) y la de Caputo (Ca), cada una de estas con sus ventajas y desventajas desde el punto de vista del análisis matemático, complejidad computacional e implementación [3].

2.1. Definición de Grünwald-Letnikov

Comenzamos considerando que para el caso de orden entero la n -ésima derivada para una función f con $n \in \mathbb{N}$ y $j > n$ esta dada por:

$$f^{(n)}(t) = \frac{d^n f}{dt^n} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{h^n} \sum_{j=0}^n (-1)^j \binom{n}{j} f(t - jh) \quad (2.1)$$

donde $\binom{n}{j}$ representa el coeficiente binomial dado por la expresión:

$$\binom{n}{j} = \frac{n!}{j!(n-j)!} \quad (2.2)$$

considerando valores negativos de n tenemos:

$$\binom{-n}{j} = \frac{-n(-n-1)(-n-2)\cdots(-n-j+1)}{j!} = (-1)^j \begin{bmatrix} n \\ j \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

donde $\begin{bmatrix} n \\ j \end{bmatrix}$ esta definido como:

$$\begin{bmatrix} n \\ j \end{bmatrix} = \frac{2(n+1)\cdots(n+j-1)}{j!} \quad (2.4)$$

2.1.1. Definición de derivada de Grünwald-Letnikov

Generalizando la ecuación (2.1) podemos escribir la definición de derivada de orden fraccionario de orden α , ($\alpha \in \mathbb{R}$) como:

$$D_t^\alpha f(t) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{h^\alpha} \sum_{j=0}^{\infty} (-1)^j \binom{\alpha}{j} f(t-jh) \quad (2.5)$$

donde para calcular el coeficiente binomial podemos utilizar la relación entre la función Gamma de Euler y el factorial definido como:

$$\binom{\alpha}{j} = \frac{\alpha!}{j!(\alpha-j)!} = \frac{\Gamma(\alpha+1)}{\Gamma(j+1)\Gamma(\alpha-j+1)} \quad (2.6)$$

donde la función Gamma de Euler con $r > 0$ esta definida como:

$$\Gamma(r) = \int_0^{\infty} t^{r-1} e^{-t} dt \quad (2.7)$$

2.1.2. Definición de integral de Grünwald-Letnikov

Utilizando la ecuación (2.5) se puede definir un operador de tipo integral para la función f sobre el dominio temporal (a, t) considerando $n = \frac{t-a}{h}$ donde $a \in \mathbb{R}$ como:

$${}_a D_f^{-\alpha} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{h^\alpha} \sum_{j=0}^{\left[\frac{t-a}{h}\right]} (-1)^j \binom{n}{j} f(t-jh) \quad (2.8)$$

2.1.3. Método numérico para la definición de GL

Utilizando como base la ecuación (2.5) esta se puede discretizar para los puntos kh , ($k = 1, 2, \dots$) de la siguiente manera:

$$\left(\frac{L_m}{h}\right) D_{t_k}^\alpha f(t) \approx \frac{1}{h^\alpha} \sum_{j=0}^k (-1)^j \binom{\alpha}{j} f(t_{k-j}) \quad (2.9)$$

donde L_m es el tamaño de memoria (memory length), $t_k = kh$, h es el paso de tiempo del cálculo y $(-1)^j \binom{\alpha}{j}$ son coeficientes binomiales $C_j^{(\alpha)}$ ($j = 0, 1, \dots$). Para su cálculo utilizamos la siguiente expresión:

$$C_0^{(\alpha)} = 1, \quad C_j^{(\alpha)} = \left(1 - \frac{1+\alpha}{j}\right) C_{j-1}^{(\alpha)} \quad (2.10)$$

Entonces, la solución numérica general de la ecuación diferencial fraccionaria:

$${}_a D_t^\alpha y(t) = f(y(t), t) \quad (2.11)$$

puede expresarse como:

$$y(t_k) = f(y(t_{k-1}), t_{k-1}) h^\alpha - \sum_{j=1}^k C_j^{(\alpha)} y(t_{k-j}) \quad (2.12)$$

Para el término de la memoria expresada por la sumatoria, el principio de memoria corta puede utilizarse. Para esto el índice superior de la sumatoria en la ecuación (2.12) se cambiará por ν con las siguientes consideraciones: se utiliza $\nu = k$ para $k < \left(\frac{L_m}{h}\right)$ y $\nu = \left(\frac{L_m}{h}\right)$ para $k \geq \left(\frac{L_m}{h}\right)$. Sin el principio de memoria corta se utiliza $\nu = k$ para toda k .

2.2. Definición de Riemann-Liouville

Para esta definición consideramos la fórmula de Cauchy para la integral repetida que esta dada por:

$$f^{(-n)}(t) = \int_a^t \int_a^{\sigma_1} \dots \int_a^{\sigma_{n-1}} f(\sigma_n) d\sigma_n \dots d\sigma_2 d\sigma_1 = \frac{1}{(n-1)!} \int_a^t \frac{f(\tau)}{(t-\tau)^{1-n}} d\tau \quad (2.13)$$

2.2.1. Definición de integral de Riemann-Liouville

Utilizando las propiedades de la función Gamma de Euler con el factorial y la ecuación (2.13) se puede escribir la definición de integral fraccionaria como:

$${}_a D_t^{-\alpha} f(t) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_a^t \frac{f(\tau)}{(t-\tau)^{1-\alpha}} d\tau \quad (2.14)$$

para $\alpha < 0$ y $a \in \mathbb{R}$. No obstante para el caso de $0 < \alpha < 1$ y $f(t)$ siendo una función casual, esto es, $f(t) = 0$ para $t < 0$, la integral fraccionaria esta definida como:

$${}_0D_t^{-\alpha}f(t) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^t \frac{f(\tau)}{(t-\tau)^{1-\alpha}} d\tau, \quad \text{para } 0 < \alpha < 1, \quad t > 0 \quad (2.15)$$

2.2.2. Definición de derivada de Riemann-Liouville

De la ecuación (2.14) se puede escribir la definición de derivada fraccionaria de orden α de la siguiente manera:

$${}_aD_t^\alpha f(t) = \frac{1}{\Gamma(n-\alpha)} \frac{d^n}{dt^n} \int_a^t \frac{f(\tau)}{(t-\tau)^{\alpha-n+1}} d\tau \quad (2.16)$$

donde $(n-1 < \alpha < n)$. Pero igual que con la integral si consideramos $0 < \alpha < 1$ y $f(t)$ una función casual, la derivada de orden fraccionaria se puede reescribir como:

$${}_0D_t^\alpha f(t) = \frac{1}{\Gamma(n-\alpha)} \frac{d^n}{dt^n} \int_0^t \frac{f(\tau)}{(t-\tau)^{\alpha-n+1}} d\tau \quad (2.17)$$

2.3. Transformada de Laplace de integrales y derivadas fraccionarias

La transformada de Laplace de la integral fraccionaria ya sea para Riemann-Liouville o para Grünwald-Letnikov esta definida como:

$$\mathcal{L}\{{}_0D_t^{-p}f(t)\} = s^{-p}F(s) \quad (2.18)$$

y dadas condiciones iniciales cero la transformada de Laplace de la derivada fraccionaria de orden r para Grünwald-Letnikov, Riemann-Liouville y Caputo se reduce a:

$$\mathcal{L}\{{}_0D_t^r f(t)\} = s^r F(s) \quad (2.19)$$

2.4. Expansión de fracciones continuas (CFE)

A una expresión de la forma:

$$a_1 + \frac{b_1}{a_2 + \frac{b_2}{a_3 + \frac{b_3}{a_4 + \ddots}}} \quad (2.20)$$

se le conoce como una fracción continua. En general $a_1, a_2, a_3, \dots, b_1, b_2, b_3$ pueden ser cualquier número real o complejo, y el número de términos pueden ser finito o infinito.

Una manera más conveniente de escribir la ecuación (2.20) es:

$$a_1 + \frac{b_1}{a_2 + \frac{b_2}{a_3 + \frac{b_3}{a_4 + \dots}}} \quad (2.21)$$

y es la que se encuentra normalmente en libros y artículos. Ambas notaciones son muy similares y se puede pasar de una a otra sin mayor complicación.

De la ecuación (2.21) se pueden formar las siguientes fracciones:

$$c_1 = \frac{a_1}{1}, \quad c_2 = a_1 + \frac{b_1}{a_2}, \quad c_3 = a_1 + \frac{b_1}{a_2 + \frac{b_2}{a_3}}, \quad \dots \quad (2.22)$$

las cuales se obtienen, en sucesión, de cortar el proceso de expansión después del primer, segundo, tercer, $\dots$ término. Estas fracciones son llamadas primer, segundo, tercer, $\dots$ convergente, respectivamente, de la fracción continua. El n -ésimo convergente es:

$$c_n = a_1 + \frac{b_1}{a_2 + \frac{b_2}{a_3 + \dots + \frac{b_{n-1}}{a_n}}} \quad (2.23)$$

En 1776 Lagrange obtuvo la expansión de fracciones continuas para la ecuación $(1+x)^\alpha$ como se muestra a continuación [25]:

$$(1+x)^\alpha = \frac{1}{1 - \frac{\alpha x}{1 + \frac{\frac{1(1+\alpha)}{1 \cdot 2} x}{1 + \frac{\frac{1(1-\alpha)}{2 \cdot 3} x}{1 + \frac{\frac{2(2+\alpha)}{3 \cdot 4} x}{1 + \frac{\frac{2(2-k)}{4 \cdot 5} x}{1 + \frac{\frac{3(3+\alpha)}{5 \cdot 6} x}{1 + \dots}}}}}}}} \quad (2.24)$$

y expresada de manera más compacta:

$$(1+x)^\alpha = \frac{1}{1 - \frac{\alpha x}{1 + \frac{\frac{1(1+\alpha)}{1 \cdot 2} x}{1 + \frac{\frac{1(1-\alpha)}{2 \cdot 3} x}{1 + \frac{\frac{2(2+\alpha)}{3 \cdot 4} x}{1 + \frac{\frac{2(2-\alpha)}{4 \cdot 5} x}{1 + \dots}}}}}} \quad (2.25)$$

la ecuación (2.25) puede reescribirse convenientemente multiplicando un m en el numerador y en el denominador como se muestra a continuación:

$$(1+x)^\alpha = \frac{1}{1-} \frac{\alpha x}{1} + \frac{\textcolor{red}{2} \cdot \frac{1(1+\alpha)}{1 \cdot 2} x}{\textcolor{red}{2} \cdot 1} + \frac{\textcolor{blue}{3} \cdot \textcolor{red}{2} \cdot \frac{1(1-\alpha)}{2 \cdot 3} x}{\textcolor{blue}{3} \cdot 1} + \frac{\textcolor{blue}{3} \cdot \frac{2(2+\alpha)}{3 \cdot 4} x}{1} + \dots \quad (2.26)$$

hay que notar que cada denominador esta compuesto por 2 términos, esto se puede ver claramente en la ecuación (2.24), y que tomando en cuenta el término del numerador, m se agrega en 3 lugares distintos. Si se eligen $m_1 = 2$, $m_2 = 3$, $m_3 = 2$, $\dots$ de manera que se simplifique la ecuación obtenemos:

$$(1+x)^\alpha = \frac{1}{1-} \frac{\alpha x}{1} + \frac{(1+\alpha)x}{2} + \frac{(1-\alpha)x}{3} + \frac{(2+\alpha)x}{2} + \frac{(2-\alpha)x}{5} + \dots \quad (2.27)$$

La ecuación (2.27) se puede encontrar en distintos artículos [17, 16], no obstante programar un algoritmo que obtenga la aproximación de $(1+x)^\alpha$ hasta el n -ésimo convergente resulta poco intuitiva. Para este fin la ecuación (2.25) resulta más sencilla y contiene un patrón que puede explotarse.

El n -ésimo término de la expansión de fracciones continuas para la ecuación (2.25) se puede calcular utilizando la siguiente ecuación:

$$\frac{\psi(n) [\psi(n) + (-1)^n \alpha]}{(n-1)n} \quad (2.28)$$

donde la función $\psi(x)$ para $x \geq 2$, $x \in \mathbb{Z}^+$ esta definida como¹:

$$\psi(x) = \left\lfloor \frac{x}{2} \right\rfloor \quad (2.29)$$

La ecuación (2.28) puede utilizarse de manera recursiva desde el n -ésimo término hasta el segundo sin olvidar que a cada término se le debe sumar un uno. También vale la pena resaltar que el primer término de la expansión es $\frac{1}{1-} \frac{\alpha x}{1}$.

Sustituyendo $x = s - 1$ y limitando el número de términos de la ecuación (2.25) obtenemos la aproximación racional para s^α y para obtener la aproximación racional de $\frac{1}{s^\alpha}$ la expresión tiene que ser simplemente invertida. En el apéndice A.2 se muestra un programa escrito en MATLAB que calcula la aproximación para un integrador fraccionario de orden α eligiendo el número de términos n utilizando el método de CFE descrito previamente.

En general la aproximación utilizando la CFE para un integrador fraccionario $\frac{1}{s^\alpha}$ utilizando los primeros dos términos resulta en una función de transferencia de primer orden como se muestra a continuación:

¹ $\lfloor x \rfloor$ es la función redondeo hacia el entero inferior anterior.

$$\underset{(c_2)}{\frac{1}{s^\alpha}} \approx \frac{(1-\alpha)s + (1+\alpha)}{(1+\alpha)s + (1-\alpha)} \quad (2.30)$$

Al utilizar un número impar de términos el grado del numerador de la función de transferencia siempre será mayor en uno al del denominador, además de que el coeficiente de mayor grado del numerador siempre tendrá signo negativo, esto resulta problemático en la implementación y debido a estas observaciones es recomendable solo trabajar con un número par de términos.

La aproximación de segundo orden tiene la forma:

$$\underset{(c_4)}{\frac{1}{s^\alpha}} \approx \frac{(\alpha^2 - 3\alpha + 2)s^2 + (8 - 2\alpha^2)s + (\alpha^2 + 3\alpha + 2)}{(\alpha^2 + 3\alpha + 2)s^2 + (8 - 2\alpha^2)s + (\alpha^2 - 3\alpha + 2)} \quad (2.31)$$

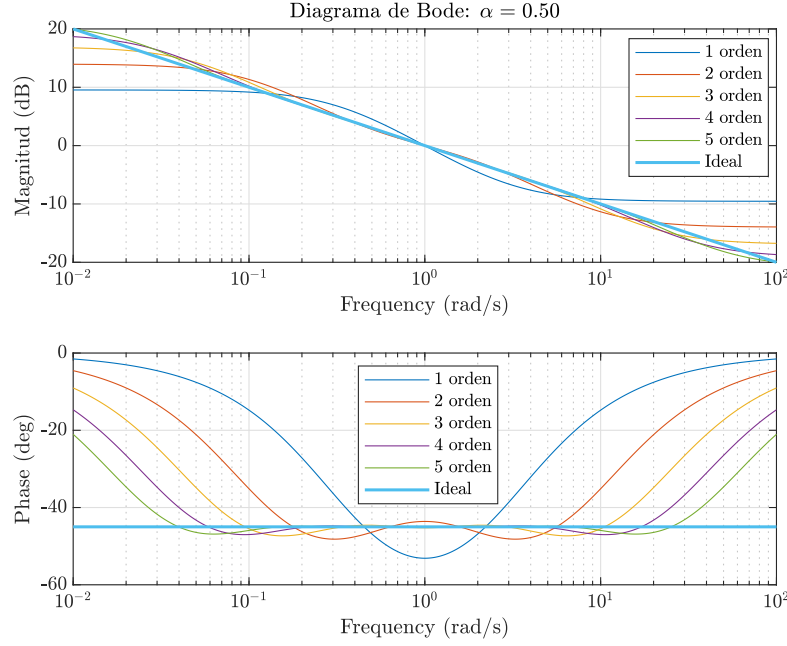
la ventaja de utilizar la aproximación de CFE consiste en que convertimos el problema de orden fraccionario a uno de orden entero de manera sistemática. Tomemos como ejemplo un integrador de orden fraccionario con $\alpha = 0.5$, sus aproximaciones son las mostradas en la Tabla 2.1 y sus correspondientes diagramas de Bode se muestran en la Figura 2.1.

Tabla 2.1: Aproximaciones racionales de $\frac{1}{s^{0.5}}$

Orden	No. de términos	Aproximación racional
1	2	$\frac{s+3}{3s+1}$
2	4	$\frac{s^2+10s+5}{5s^2+10s+1}$
3	6	$\frac{s^3+21s^2+35s+7}{7s^3+35s^2+21s+1}$
4	8	$\frac{s^4+36s^3+126s^2+84s+9}{9s^4+84s^3+126s^2+36s+1}$
5	10	$\frac{s^5+55s^4+330s^3+462s^2+165s+11}{11s^5+165s^4+462s^3+330s^2+55s+1}$

Analizando la Figura 2.1 se puede resaltar que en general la aproximación aumenta su ancho de banda conforme el orden de la función de transferencia aumenta y que de mismo modo el error con respecto al integrador ideal disminuye, lo cual era de esperarse, el ancho de banda útil es de 10^{-1} rad/s hasta 10^1 rad/s, es decir aproximadamente dos décadas, no obstante un análisis más profundo es necesario para notar otras peculiaridades que ocurren en este tipo de aproximaciones.

Figura 2.1: Diagramas de Bode comparativos de integrador fraccionario $\alpha = 0.5$, funciones de transferencia de primero hasta quinto orden.



2.4.1. Análisis de error de la CFE

Si se varia el orden α del integrador y el orden de la función de transferencia aproximada podemos notar que entre más pequeño sea α más se alejada la aproximación con respecto a un integrador fraccionario ideal, esto considerando el ancho de banda útil (ver Figuras B.1, B.2). Para cuantificar lo anterior existen dos tipos de errores de interés, el error sin normalizar y el error normalizado.

El error en dB de la magnitud sin normalizar se puede calcular utilizando la siguiente ecuación:

$$\text{error}_{\text{dB}} = 20 \log_{10} \left| \frac{H(j\omega)}{G(j\omega)} \right| \quad (2.32)$$

donde $H(j\omega)$ es el integrador ideal $\frac{1}{s^\alpha}$ y $G(j\omega)$ es la función de transferencia aproximada del integrador utilizando CFE $(c_n) \frac{1}{s^\alpha}$ hasta el n -ésimo convergente.

El error en grados de la fase sin normalizar se obtiene utilizando la siguiente ecuación:

$$\text{error}_{\text{deg}} = \angle H(j\omega) - \angle G(j\omega) \quad (2.33)$$

Debido a que un integrador fraccionario ideal es en esencia un polo en el origen elevado a una potencia, este tiene un comportamiento de -20α dB/década en magnitud y de -90α grados en fase [26]. Para normalizar el error este hecho resulta importante ya que la magnitud del integrador ideal en 0.1 rad/seg para cualquier α siempre será 20α dB y para 10 rad/seg de -20α dB, de manera similar la fase permanece constante

en -90α grados para cualquier α .

Entonces la ecuación para el error normalizado de magnitud es:

$$\text{error}_{\text{norm de mag}} = \frac{20 \log_{10} \left| \frac{H(j\omega)}{G(j\omega)} \right|}{20\alpha} = \frac{\log_{10} \left| \frac{H(j\omega)}{G(j\omega)} \right|}{\alpha} \quad (2.34)$$

y la ecuación para el error normalizado de fase es:

$$\text{error}_{\text{norm de fase}} = \frac{\angle H(j\omega) - \angle G(j\omega)}{90\alpha} \quad (2.35)$$

Para comparar los errores de manera precisa se debe calcular el valor absoluto de los errores para tener una medida de cuanto se aleja del integrador fraccionario ideal. En las Tablas 2.2 y 2.3 se muestran los errores absolutos máximos sin normalizar para la magnitud y la fase dependiente de α y el orden de la función de transferencia, estos datos se puede corroborar dirigiéndose a las gráficas de las Figuras B.3 y B.4.

Tabla 2.2: Máximo error absoluto de magnitud en dB variando α y orden de función de transferencia.

α/Orden	1 ^{er}	2 ^{do}	3 ^{er}	4 ^{to}	5 ^{to}
0.1	0.4587	0.3333	0.2427	0.0620	0.0220
0.2	0.8931	0.6524	0.4665	0.1172	0.0423
0.3	1.2792	0.9426	0.6527	0.1596	0.0591
0.4	1.5942	1.1889	0.7838	0.1848	0.0710
0.5	1.8155	1.3748	0.8449	0.1904	0.0767
0.6	1.9193	1.4807	0.8259	0.1767	0.0755
0.7	1.8769	1.4676	0.7232	0.1458	0.0669
0.8	1.6464	1.2410	0.5415	0.1021	0.0510
0.9	1.1460	0.7507	0.2939	0.0513	0.0284

Tabla 2.3: Máximo error absoluto de fase en grados variando α y orden de función de transferencia.

α/Orden	1 ^{er}	2 ^{do}	3 ^{er}	4 ^{to}	5 ^{to}
0.1	6.7092	2.8727	0.6548	0.5632	0.2796
0.2	13.2833	5.5250	1.2598	1.0838	0.5338
0.3	19.5614	7.7297	1.7677	1.5208	0.7390
0.4	25.3200	9.2514	2.1362	1.8358	0.8760
0.5	30.2099	9.8632	2.3294	1.9960	0.9311
0.6	33.6307	9.3936	2.3198	1.9760	0.8975
0.7	34.4722	7.8155	2.0880	1.7611	0.7756
0.8	30.6494	5.3543	1.6237	1.3492	0.5739
0.9	19.0601	2.5243	0.9255	0.7528	0.3080

A simple vista se podría creer que el error máximo aumenta conforme aumenta α , no obstante esto es falso debido a que no se está teniendo en cuenta la escala de la

gráfica y por lo tanto las Tablas 2.2 y 2.3 únicamente nos dan información del total de error y no del porcentaje. Para tomar en cuenta la escala es necesario normalizar el error y calcular el valor absoluto de este. Las gráficas de la respuesta de magnitud y fase normalizadas se pueden encontrar en las Figuras B.5 y B.6, y las gráficas de los errores normalizados en las Figuras B.7 y B.8.

En las Tablas 2.4 y 2.5 se muestran los porcentajes del máximo error absoluto normalizados para la magnitud y la fase. Un análisis de estas tablas arroja conclusión que en efecto, **el porcentaje de error es mayor cuanto más pequeño sea α** , esto es de gran interés para poder generar reglas de diseño en la implementación de circuitos integradores fraccionarios.

Tabla 2.4: Máximo error absoluto de magnitud normalizado en % variando α y orden de función de transferencia.

α /Orden	1 ^{er}	2 ^{do}	3 ^{er}	4 ^{to}	5 ^{to}
0.1	22.9364	16.6661	12.1365	3.1006	1.1022
0.2	22.3267	16.3092	11.6624	2.9299	1.0576
0.3	21.3204	15.7107	10.8780	2.6595	0.9850
0.4	19.9281	14.8618	9.7974	2.3094	0.8869
0.5	18.1555	13.7481	8.4493	1.9044	0.7669
0.6	15.9941	12.3390	6.8823	1.4724	0.6290
0.7	13.4063	10.4826	5.1656	1.0415	0.4779
0.8	10.2900	7.7565	3.3847	0.6380	0.3190
0.9	6.3665	4.1706	1.6328	0.2848	0.1578

Tabla 2.5: Máximo error absoluto de fase normalizado en % variando α y orden de función de transferencia.

α /Orden	1 ^{er}	2 ^{do}	3 ^{er}	4 ^{to}	5 ^{to}
0.1	74.5462	31.9184	7.2756	6.2574	3.1070
0.2	73.7962	30.6945	6.9988	6.0212	2.9653
0.3	72.4496	28.6284	6.5472	5.6324	2.7370
0.4	70.3334	25.6983	5.9338	5.0995	2.4334
0.5	67.1331	21.9182	5.1765	4.4355	2.0692
0.6	62.2790	17.3955	4.2958	3.6593	1.6620
0.7	54.7178	12.4056	3.3143	2.7954	1.2312
0.8	42.5686	7.4365	2.2552	1.8739	0.7971
0.9	23.5310	3.1165	1.1426	0.9293	0.3802

Dado que el máximo error ocurre en un rango de frecuencias muy corto es recomendable conocer de igual manera el error promedio. En las Tablas 2.6 y 2.7 se muestra el error promedio normalizado, este tipo de error presenta el mismo efecto de porcentaje de error con respecto a α que el máximo error normalizado. De los datos de las tablas anteriores se puede resaltar que en cuanto a magnitud, utilizar una aproximación de segundo orden en lugar de una de primero disminuye el error un 5.86 % para $\alpha = 0.1$

y un 2.96 % para $\alpha = 0.9$, en fase el cambio es aún mas notorio, el error disminuye un 26.71 % para $\alpha = 0.1$ y un 5.61 % para $\alpha = 0.9$. No obstante si se detiene a pensar detenidamente, con un $\alpha = 0.9$ y una aproximación de primer orden el error promedio es de 4.22 % en magnitud y de 6.55 % en fase, el cual, para algunas aplicaciones puede resultar aceptable y cambiar por una aproximación de segundo orden no representaría una gran mejora, lo contrario ocurre con un $\alpha = 0.1$, al cambiar a una aproximación de segundo orden el error se reduce significativamente, aproximadamente a la mitad en magnitud y a un cuarto en fase, en este caso en definitiva vale la pena cambiar.

Tabla 2.6: Promedio de error absoluto de magnitud normalizado en % variando α y orden de función de transferencia.

α /Orden	1 ^{er}	2 ^{do}	3 ^{er}	4 ^{to}	5 ^{to}
0.1	13.4397	7.5755	2.4058	0.5407	0.2754
0.2	13.1089	7.3398	2.2960	0.5155	0.2639
0.3	12.5614	6.9432	2.1189	0.4751	0.2454
0.4	11.8034	6.3812	1.8827	0.4217	0.2203
0.5	10.8454	5.6502	1.5991	0.3580	0.1897
0.6	9.7075	4.7507	1.2822	0.2875	0.1548
0.7	8.4275	3.6945	0.9478	0.2133	0.1168
0.8	6.8606	2.5119	0.6123	0.1387	0.0772
0.9	4.2249	1.2563	0.2916	0.0667	0.0377

Tabla 2.7: Promedio error absoluto de fase normalizado en % variando α y orden de función de transferencia.

α /Orden	1 ^{er}	2 ^{do}	3 ^{er}	4 ^{to}	5 ^{to}
0.1	34.9335	8.2174	2.6873	1.3313	0.3667
0.2	34.0430	7.8450	2.5975	1.2737	0.3498
0.3	32.5319	7.2389	2.4512	1.1805	0.3226
0.4	30.3547	6.4219	2.2473	1.0556	0.2864
0.5	27.4424	5.4308	1.9840	0.9042	0.2431
0.6	23.6947	4.3175	1.6640	0.7329	0.1948
0.7	18.9857	3.1492	1.2933	0.5488	0.1439
0.8	13.2152	2.0009	0.8821	0.3598	0.0929
0.9	6.5510	0.9388	0.4450	0.1742	0.0441

De ser necesario para convertir el error de magnitud normalizado de % a dB se utiliza la siguiente ecuación:

$$\text{error}_{\text{dB}} = 20\alpha \cdot \left(\frac{\%_{\text{error mag}}}{100} \right) \quad (2.36)$$

y para el error de fase normalizado de % a grados:

$$\text{error}_{\text{deg}} = 90\alpha \cdot \left(\frac{\%_{\text{error fase}}}{100} \right) \quad (2.37)$$

2.5. Escalamiento en frecuencia

Debido a que el ancho de banda del integrador fraccionario utilizando la aproximación de CFE es de aproximadamente dos décadas y se encuentra en un rango de frecuencia muy bajo, de 0.1 rad/s hasta 10 rad/s, el cual es un rango poco útil en aplicaciones reales, es necesario escalar la respuesta en frecuencia.

El escalamiento en frecuencia es el proceso de correr la respuesta en frecuencia de una red por arriba o por abajo del eje de frecuencia mientras se mantiene igual la impedancia [26].

El escalamiento de frecuencia se consigue multiplicando ésta por un factor de escalamiento k_f mientras se mantiene la impedancia igual. Si consideramos p la variable de frecuencia compleja actual y s la escalada, el proceso de escalamiento se define por la siguiente relación [27]:

$$s = k_f p \quad (2.38)$$

la ecuación (2.38) también se puede ver de la siguiente manera:

$$k_f = \frac{s}{p} = \frac{j\omega'}{j\omega} = \frac{\omega'}{\omega} \quad (2.39)$$

donde ω' es la frecuencia escalada y ω es la frecuencia actual de referencia.

Para entender de mejor manera el escalamiento en frecuencia estudiemos el siguiente ejemplo, consideremos la siguiente función de transferencia:

$$N(p) = \frac{20p}{p^2 + 12p + 20} \quad (2.40)$$

la cual corta el eje de la frecuencia en 0.1 rad/s y 200 rad/s. Si deseamos que la respuesta en magnitud permanezca idéntica pero desplazada a la derecha en un factor de cien, es decir, que las frecuencias escaladas corten el eje de frecuencia en 10 rad/s y 20k rad/s, entonces $k_f = \frac{10}{0.1} = 100$, sustituyendo la ecuación (2.38) en (2.40):

$$N(s) = \frac{200sk_f^{-1}}{s^2k_f^{-2} + 12sk_f^{-1} + 20} = \frac{200k_f s}{s^2 + 12k_f s + 20k_f^2} \quad (2.41)$$

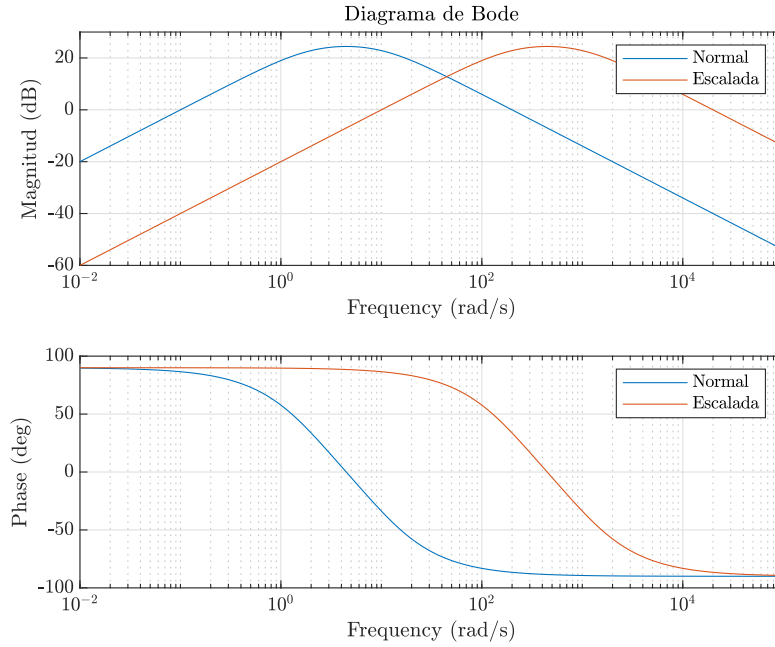
entonces la función de transferencia escalada resulta:

$$N(s) = \frac{200(100)s}{s^2 + 12(100)s + 20(100)^2} \quad (2.42)$$

En la Figura 2.2 se muestra el resultado de aplicar el escalamiento en frecuencia a la ecuación 2.40. Si se desea aplicar el escalamiento en Hz, simplemente se tiene que tener en consideración el factor de conversión, como ejemplo, si se desea que las frecuencias que corten el eje de la frecuencia sean 0.1 Hz y 200 Hz entonces:

$$k_f = \frac{0.1 \text{ Hz} \cdot \frac{2\pi \text{ rad/s}}{1 \text{ Hz}}}{0.1 \text{ rad/s}} = 2\pi \quad (2.43)$$

Figura 2.2: Diagrama de Bode comparativo de función de transferencia escalada.



Esta metodología se puede aplicar a cualquier función de transferencia y tiene la ventaja de solo ser necesario modificar el factor de escalamiento k_f una vez obtenida la expresión escalada.

2.6. Teoría de filtros

Las funciones de transferencia obtenidas de la CFE pueden ser llevadas al mundo real utilizando filtros, ya sean activos, pasivos, de primer orden (bilineales), segundo orden (bicuadráticos) o de ordenes superiores usando una combinación de ambos. Por esta razón es de interés estudiar brevemente la teoría de filtros, tener presente las estructuras matemáticas más comunes en el diseño de filtros y sus principales características.

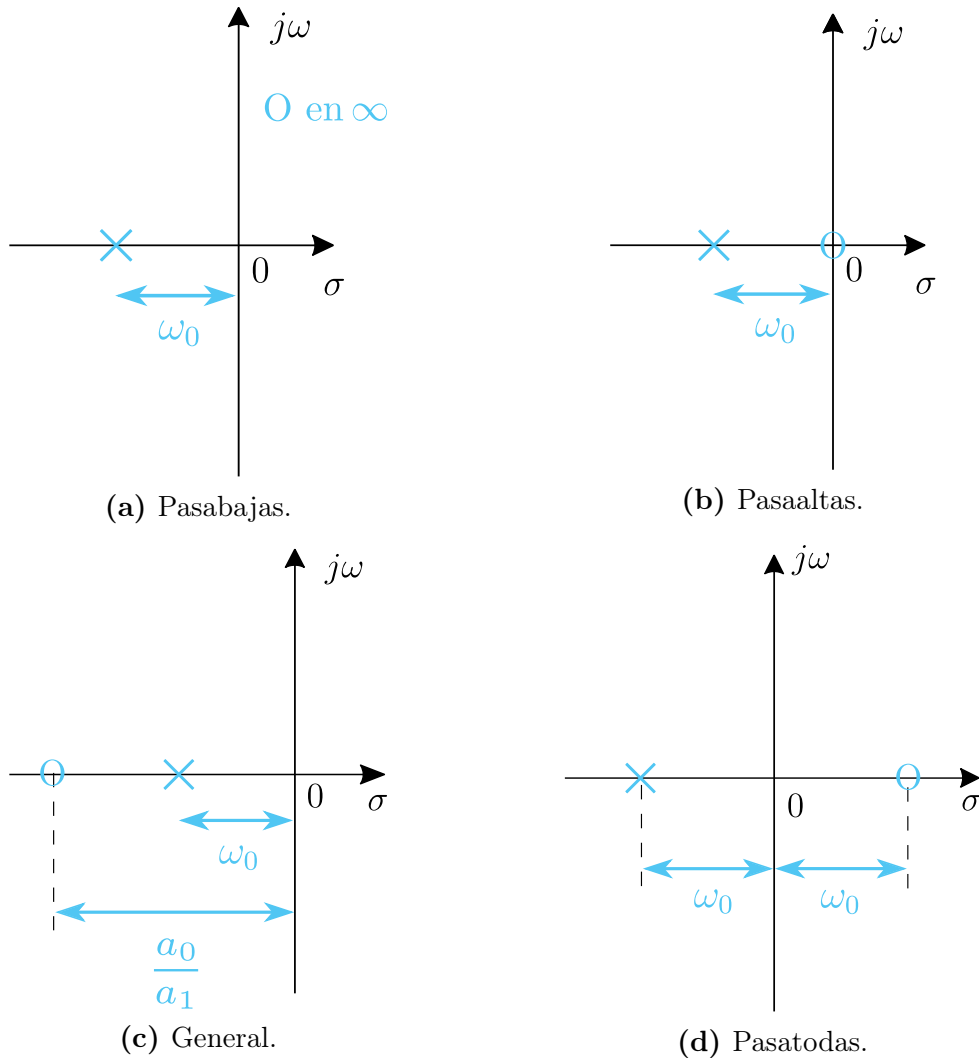
2.6.1. Filtros de primer orden

La función de transferencia general de primer orden está dada por la siguiente ecuación:

$$T(s) = \frac{a_1 s + a_0}{s + \omega_0} \quad (2.44)$$

esta función de transferencia bilineal se caracteriza por tener un polo en $s = -\omega_0$, un cero en $s = -\frac{a_0}{a_1}$ y una ganancia de alta frecuencia que tiende a a_1 . Los coeficientes del numerador, a_0 y a_1 , determinan el tipo de filtro, ya sea pasabajas (LP), pasaaltas (HP), pasatodas (AP) o general. La realización activa provee considerablemente más versatilidad que su contra parte pasiva, en muchos casos la ganancia puede ser ajustada a un valor deseado, y algunos parámetros de las funciones de transferencia también sin afectar otros. La impedancia de salida de los circuitos activos es muy baja, haciendo que la colocación en cascada sea muy fácil. Sin embargo, los amplificadores operacionales limitan la operación a altas frecuencias de los circuitos activos [28]. En la Figura 2.3 se muestra la ubicación del polo y el cero de los diferentes tipos de filtros que se pueden formar para la configuración bilineal.

Figura 2.3: Singularidades de filtros de primer orden en el plano s .



Diferentes tipos de filtros nacen de ubicar el cero de la función de transferencia bilineal general (2.44) en distintos lugares, un cero en el infinito genera un filtro pasabajas de primer orden, y un cero en el origen un filtro pasaaltas. Un cero colocado

simétricamente relativo al eje $j\omega$ genera un pasatodas. Las ecuaciones básicas de los filtros de primer orden son las siguientes:

- Pasabajas (LP)

$$T(s) = \frac{a_0}{s + \omega_0} \quad (2.45)$$

- Pasaaltas (HP)

$$T(s) = \frac{a_1 s}{s + \omega_0} \quad (2.46)$$

- Pasatodas (AP)

$$T(s) = -a_1 \frac{s - \omega_0}{s + \omega_0} \quad (2.47)$$

2.6.2. Filtros de segundo orden

La función de transferencia general de un filtro de segundo orden o biquadrática se expresa en lo general en la forma estándar:

$$T(s) = \frac{a_2 s^2 + a_1 s + a_0}{s^2 + \left(\frac{\omega_0}{Q}\right)s + \omega_0^2} \quad (2.48)$$

donde ω_0 y Q determinan los polos de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$p_{1,2} = -\frac{\omega_0}{2Q} \pm j\omega_0 \sqrt{1 - \left(\frac{1}{4Q^2}\right)} \quad (2.49)$$

al parámetro ω_0 se le conoce como frecuencia de polo, y representa la distancia radial entre el origen y el polo en el plano complejo s . Q es el factor de calidad de polo y determina la distancia de los polos desde el eje $j\omega$, una representación gráfica de estos parámetros se muestra en la Figura 2.4, entre más grande sea el valor de Q , más cerca estarán los polos el eje $j\omega$, y la respuesta del filtro se vuelve más selectiva. Un valor infinito para Q localiza a los polos sobre el eje $j\omega$ y puede producir oscilaciones sostenidas en la realización del circuito. Un valor negativo de Q implica que los polos se encuentran en la mitad derecha del plano s , lo cual ciertamente produce oscilaciones. Los ceros del filtro de segundo orden están determinados por los coeficientes del numerador, a_0 , a_1 y a_2 , en otras palabras los coeficientes del numerador determinan el tipo de filtro de segundo orden [28].

Para un filtro pasabajas (LP) de segundo orden, los dos ceros están en $s = \infty$ y su respuesta de magnitud muestra un pico para $Q > \frac{1}{\sqrt{2}}$. Para un pasaaltas (HP) los ceros están en $s = 0$ y su respuesta de magnitud también muestra un pico para $Q > \frac{1}{\sqrt{2}}$. Para un pasabanda (BP) un cero esta en $s = \infty$ y el otro en $s = 0$, la respuesta de magnitud tiene un pico en $\omega = \omega_0$, por lo tanto, la frecuencia central del filtro pasabandas es igual

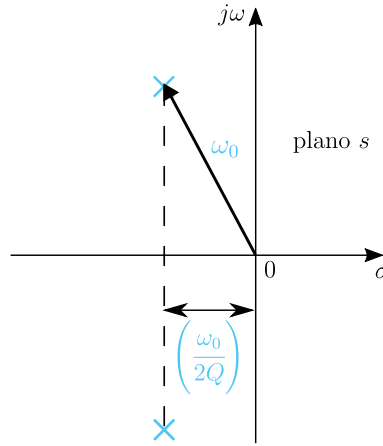
a la frecuencia de polo ω_0 . La selectividad de del filtro pasabanda de segundo orden es usualmente medida por su ancho de banda de 3 dB. Este es la diferencia entre las dos frecuencias ω_1 y ω_2 en las cuales la respuesta de magnitud es 3 dB por debajo de su valor máximo el cual ocurre en ω_0 . La ecuación que describe a las frecuencias ω_1, ω_2 es la siguiente:

$$\omega_1, \omega_2 = \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{1}{4Q^2}\right)} \pm \frac{\omega_0}{2Q} \quad (2.50)$$

Entonces el ancho de banda BW se define como:

$$BW = \omega_2 - \omega_1 = \frac{\omega_0}{Q} \quad (2.51)$$

Figura 2.4: Definición de los parámetros ω_0 y Q de un par de polos conjugados.



Las ecuaciones básicas de filtros de segundo orden son las siguientes:

- Pasabajas (LP)

$$T(s) = \frac{a_0}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q}s + \omega_0^2} \quad (2.52)$$

- Pasaaltas (HP)

$$T(s) = \frac{a_2 s^2}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q}s + \omega_0^2} \quad (2.53)$$

- Pasabandas (BP)

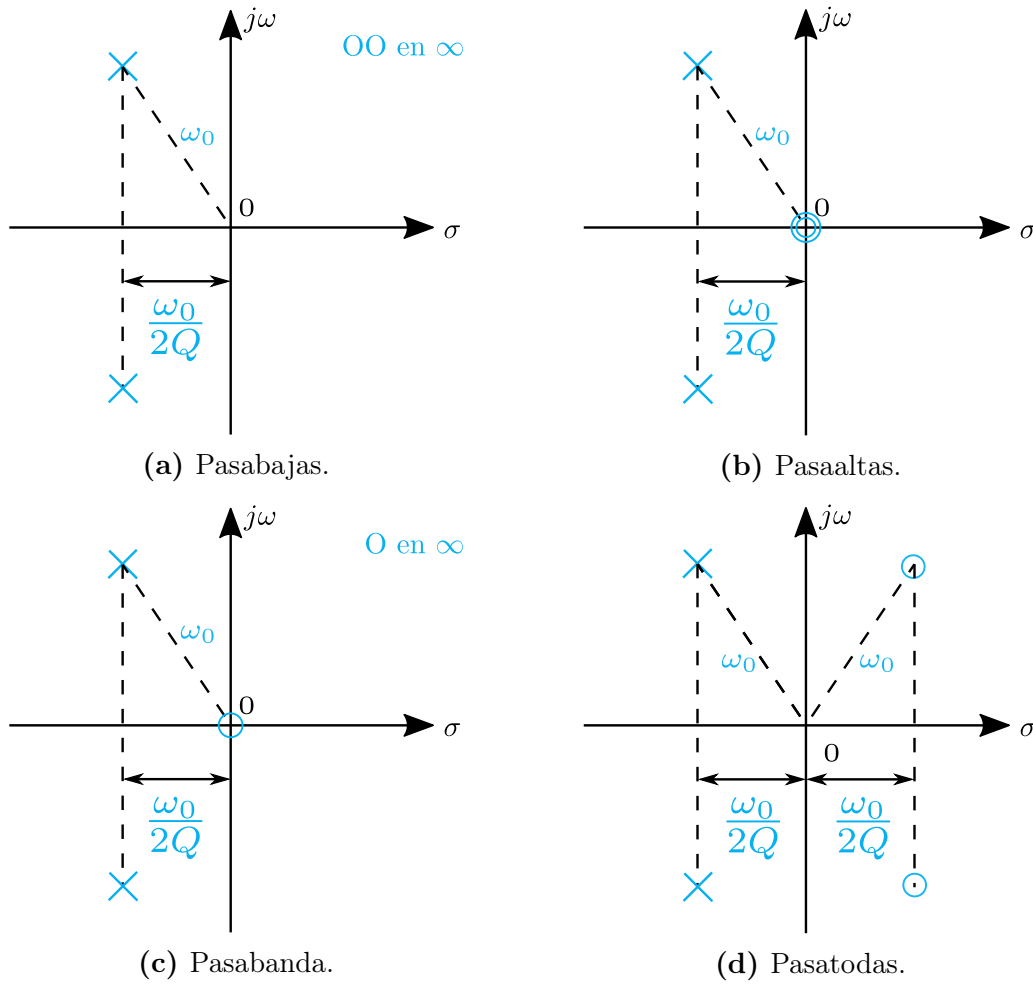
$$T(s) = \frac{a_1 s}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q}s + \omega_0^2} \quad (2.54)$$

- Pasatodas (AP)

$$T(s) = a_2 \frac{s^2 - \frac{\omega_o}{Q}s + \omega_0^2}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q}s + \omega_0^2} \quad (2.55)$$

En la Figura 2.5 se muestran las singularidades de los filtros más comunes de segundo orden.

Figura 2.5: Singularidades de filtros de segundo orden en el plano s .



Las estructuras matemáticas estudiadas en esta sección servirán como herramientas en secciones posteriores.

Capítulo 3

Implementación de integradores fraccionarios

3.1. ¿Qué es una FPAA?

Una FPAA por sus siglas en inglés (Field Programmable Analog Arrays) es un dispositivo analógico equivalente a las FPGA (Field Programmable Gate Arrays). A diferencia de las FPGA que contienen una gran cantidad de módulos y conexiones que permiten configuraciones arbitrarias de lógica combinatorial y secuencial, los FPAA generalmente contienen una pequeña cantidad de CABs (Configurable Analog Blocks). Los FPAA dirigidos al diseño analógico estándar generalmente presentan un CAB que contiene un amplificador operacional, un arreglo de capacitores programables, y ya sea un arreglo de resistencias programables para circuitos en tiempo continuo o switches configurables para circuitos de capacitores conmutados. Se trabajó con la tarjeta Anadigm QuadApex Development Board v2.0 de la empresa Anadigm, la cual contiene 4 FPAAs AN231E04 que pueden conectarse en cadena y es programada mediante el software AnadigmDesigner2 (AD2). El diagrama esquemático de la tarjeta se puede ver en la Figura C.1 del apéndice.

3.2. Características de la tarjeta y requerimientos

3.2.1. Alimentación de la tarjeta

Para el correcto funcionamiento de la tarjeta, esta debe ser alimentada con una fuente de voltaje regulada a 5V de al menos 500mA conectada a la clema de dos terminales. La placa está protegida contra la conexión de una fuente de voltaje con la polarización incorrecta. La tarjeta cuenta con un LED de color verde que indica que la placa se ha encendido correctamente.

3.2.2. Instalación de drivers

No conecte la placa QuadApex v2.0 a la PC vía cable USB, ni tampoco inicie AD2 ahora, el driver debe instalarse primero. Se asume que AD2 ya ha sido instalado y registrado en la computadora, de lo contrario entrar al link que aparece a continuación.

Para instalar AD2 es necesario acceder al siguiente link y seguir los pasos que muestra la pagina:

https://www.anadigm.com/sup_downloadcenter.asp?tab=ad2

es recomendable guardar los datos de registro en un lugar seguro, al iniciar el programa por primera vez es necesario ingresar el **License ID** y la **License key**, estos estarán en el correo que le proporcionó a Anadigm.

El driver **CP210x_Drivers.exe** está incluido en el AD2 CD o se puede encontrar en la página de Silicon Labs. Siga los siguientes pasos si es la primera vez que instala este driver, de lo contrario desinstale las versiones anteriores antes de continuar:

1. Ejecute como administrador el ejecutable CP210x_Drivers.exe. El destino por defecto del ejecutable es "C:\Silabs\Mcu\CP210x".
2. Para completar la instalación conecte la QuadApex v2.0 y enciéndala.
3. Acceda al administrador de dispositivos y en **Puertos (COM y LPT)** asegúrese que el driver este bien configurado, si no aparece un signo de admiración y se le asigne un puerto COM la instalación fue exitosa, de lo contrario dar clic derecho sobre el dispositivo y seleccionar **Actualizar controlador**, después buscar el driver en la ruta del paso 1.

el driver en este punto ya esta instalado. La instalación del driver y la asignación del puerto es necesaria solo una vez. Si se conecta subsecuentemente a otro puerto de USB de la PC puede ser necesario repetir el paso 3.

3.2.3. Jumpers por defecto

En la Tabla 3.1 se muestra una lista con los jumpers que contiene la placa, una descripción de su funcionamiento y su posición por defecto. Es importante colocar la FPAA con todos sus jumper en el estado por defecto para entender secciones posteriores y evitar errores. La placa no contiene una cantidad muy grande de jumpers y usualmente solo se modificarán los jumpers J8,J9,J10, los cuales son los que controlan la cantidad de FPPAs activas.

Tabla 3.1: Resumen de jumper de la placa.

Jumper	Función	Estado por defecto	Condición por defecto
J1	Conecta la sección digital a la sección analógica.	Todos los 13 jumpers deben estar conectados	Conecta completamente la alimentación, tierra y todas las señales digitales FPAA a la sección digital.
J2	Selecciona entre 16MHz y 40MHz para la fuente ACLK.	Jumpers off	ACLK=16MHz
J3	Permite la descarga de la configuración de prueba a todos los FPAA desde FLASH (después de reiniciar o apagar y encender). El circuito de prueba despliega ondas sinusoidales a todas las salidas FPAA.	Jumper off	Descarga del circuito de prueba deshabilitado
J4	Permite el almacenamiento de configuraciones primarias en el FLASH del PIC32 si el puente está activado.	Jumper off	No en modo de almacenamiento de configuraciones primarias.
J5	Jumper de repuesto.	Jumper off	-
J6	Un jumper en J5 deshabilitará el módulo oscilador de 16MHz y tristateará su salida. Esto significa que el pin ACLK de los FPAA no se sincronizará, tampoco se sincronizará el microcontrolador PIC32, por lo que toda la placa se desactivará efectivamente.	Jumper off	Oscilador de 16MHz habilitado
J7	Este jumper controla la generación de un suministro negativo (-3.3V) para las etapas del buffer de salida en la placa. El puente a la derecha desactiva el suministro negativo (lo ata al suelo). El puente a la izquierda permite el suministro.	Jumper a la izquierda	Alimentación negativa habilitada
J8,9,10	Estos jumpers en combinación con ACT1, ACT2, ACT3, ACT4 controlan la cadena de FPAAs.	Todos los jumpers especificados deben estar conectados	Todas las FPAAs en cadena
J11	Estos jumpers conectan el transceptor USB a la interfaz UART del microcontrolador PIC32. Si no se requiere control USB, estos 4 puentes se pueden quitar.	Todos los jumpers conectados	USB habilitado

3.2.4. Tamaño variable de cadena de FPAAs

La placa contiene 4 FPAAs en cadena. Esta cadena puede ser cortada a 3, 2 o 1, pero debe ser cortada deshabilitando FPAAs desde el final de la cadena (del lado derecho).

- Para reducir la cadena a 3 FPAAs, remueva los jumpers de J10 y también el jumper marcado ACT4 de J1. Esto deshabilitará FPPAA #4 (la más cercana a la fuente de alimentación.)
- Para reducir la cadena a 2 FPAAs, remueva los jumpers de J9 y J10 y también los jumpers marcados ACT3 y ACT4 de J1. Esto deshabilitará los FPAAs #3 y #4.
- Para reducir la cadena a 1 FPAA, remueva los jumpers de J8, J9 y 10 y también los jumpers marcados ACT2, ACT3 y ACT4 de J1. Esto deshabilitará los FPAA #2, #3 y #4.

Nota: si se configura una cadena de FPAA y luego se desconectan 1 o más FPAA de la cadena, los FPAA desconectados aún mantendrán su configuración hasta que se reinicie la placa o se vuelva a configurar la cadena (reducida).

3.2.5. DIP Switches

El usuario puede hacer sus propias conexiones en la placa con cables, pero hay un conjunto de DIP switches que permiten una fácil conexión de ciertas rutas entre los FPAA vecinos y entre los FPAA y los input/output buffers. Estos interruptores están abiertos por defecto, lo que significa que todos están hacia la izquierda. El usuario puede cerrar los interruptores empujándolos hacia la derecha. En la Tabla 3.2 se muestra un resumen de los switches. Los DIP switches son pequeños y del tipo deslizantes, por lo que se recomienda una herramienta afilada como un destornillador delgado para abrir y cerrar los switches. Algunos ejemplos se muestran a continuación:

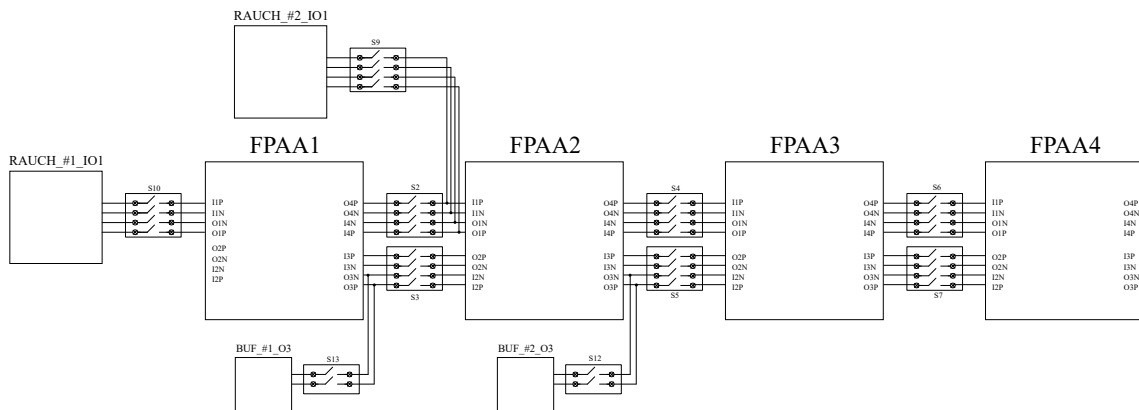
1. Para conectar el filtro Rauch_#1_IO1 a I1 de la FPAA#1, cierre los 4 interruptores en S10.
2. Para conectar O4 del FPAA#1 a I1 del FPAA#2, cierre los 2 interruptores superiores de S2.
3. Para conectar O3 del FPAA#1 al buffer de salida BUF_#1_O3, cierre ambos switches de S13.

Función	Tipo	Labels
Conectar filtros Rauch a entradas de FPAA	4way	S8,9,10,11,15,16,17,18
Conectar entre FPAAs	4way	S2,3,4,5,6,7
Conectar FPAA a buffers de salida	2way	S12,13,14,19

Tabla 3.2: DIP Switches

En la Figura C.1 encontrada en el apéndice se puede encontrar el diagrama esquemático completo de la tarjeta QuadApex v2.0 en el que se puede analizar las todas las conexiones de los switches, sin embargo por simplicidad en la Figura 3.1 se muestra un diagrama simplificado con los DIP switches de uso más común.

Figura 3.1: Esquemático simplificado de DIP Switches.

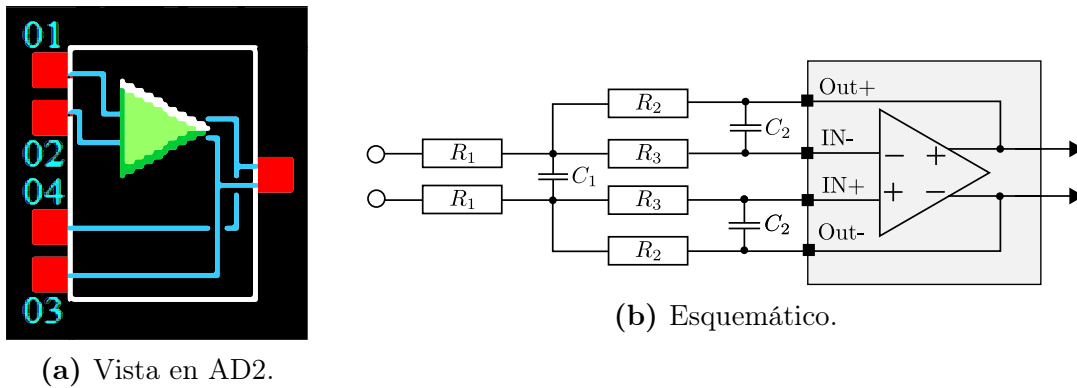


3.2.6. Filtros Rauch y buffers de salida

La tarjeta cuenta con 2 buffers de entrada llamados filtros Rauch listos para usar, Rauch_#1_I01 y Rauch_#2_I01, estos son filtros multipropósito cuya su principal función es convertir una señal single-ended a una diferencial en la FPAA, internamente la FPAA trabaja únicamente con señales diferenciales y debido a esto el uso de estos filtros es imprescindible para introducir señales externas, como señales de generadores de funciones u otros circuitos. Si se usa una señal single-ended, es necesario conectar IN- a GND y conectar la señal en IN+. Para activar el filtro es necesario hacerlo desde el software AD2 haciendo doble clic en la IO cell apropiada (IOCell1-4), seleccionar Input y después Amplifier (Filter), esto es debido a que el filtro funciona en combinación con un amplificador integrado en la FPAA y los componentes pasivos de montaje superficial que vienen soldados de fabrica.

Rauch_#1_I01 está conectado a I/O1 de la FPAA #1 y esta configurado con una frecuencia de corte muy alta ($F_o = 490$ kHz), una $Q = 0.707$ y ganancia unitaria. Los componentes pasivos que tiene son: $R_1 = R_2 = 22\text{k}\Omega$, $R_3 = 10\text{k}\Omega$, $C_1 = 22\text{pF}$ y $C_2 = 10\text{pF}$. Rauch_#2_I01 está conectado a I/O1 de la FPAA #2 y esta configurado con una ganancia unitaria, una $Q = 0.707$ y una frecuencia de corte de poco más de 20 kHz, que es típica de una aplicación de audio. Los componentes pasivos respectivos son: $R_1 = R_2 = 470\text{k}\Omega$, $R_3 = 220\text{k}\Omega$, $C_1 = 22\text{pF}$ y $C_2 = 10\text{pF}$. Si se requiere una frecuencia de corte inferior o mayor, es muy fácil modificar este filtro sin quitar los componentes de montaje superficial debajo, simplemente agregando capacitores y resistencias TH. En la Figura 3.2 se muestra la representación esquemática del filtro Rauch y su representación en AD2.

Figura 3.2: Diferentes representaciones de filtro Rauch.



Las siguientes ecuaciones sirven para calcular la ganancia, frecuencia de corte y factor de calidad Q para cualquier filtro Rauch sobre la tarjeta:

$$G = \frac{R_2}{R_1} \quad (3.1)$$

$$F_o = \frac{1}{2\pi R_2} \sqrt{\frac{R_1 + R_2}{2C_1 C_2 R_1}} \quad (3.2)$$

$$Q = \sqrt{\frac{C_1 R_1}{2C_2(R_1 + R_2)}} \quad (3.3)$$

no obstante si se desea hacer el proceso inverso y determinar los valores de los componentes requeridos para una ganancia, frecuencia de corte y Q especificadas, se pueden utilizar las siguientes ecuaciones:

$$R_2 = R_1 G \quad (3.4)$$

$$R_3 = \frac{R_1 G}{G + 1} \quad (3.5)$$

$$C_1 = \frac{Q(G + 1)}{2\pi G F_o R_1} \quad (3.6)$$

$$C_2 = \frac{1}{4\pi G F_o Q R_1} \quad (3.7)$$

consideremos el siguiente ejemplo representativo. Construir un filtro Rauch con las siguientes características: ganancia de 1.5, una frecuencia de corte $F_o = 20$ kHz y $Q = 0.707$. Utilizando las ecuaciones anteriores y proponiendo $R_1 = 10\text{k}\Omega$ obtenemos:

$$\begin{aligned} R_2 &= 15\text{k}\Omega & C_1 &= 0.938\text{nF} \approx 1\text{nF} \\ R_3 &= 6\text{k}\Omega \approx 5.6\text{k}\Omega & C_2 &= 0.375\text{nF} \approx 330\text{pF} \end{aligned}$$

La tarjeta también cuenta con 2 buffers de salida listos para usar, Buf_#1_O3 y Buf_#2_O3, cuyo principal propósito es convertir la salida diferencial de la FPAA a una single-end. Buf_#1_O3 está conectado a O3 de la FPAA #1 y está configurado con una frecuencia de corte muy alta ($F_o = 480$ kHz) y una ganancia unitaria. Los componentes pasivos que tiene son: $R_1 = R_2 = 33\text{k}\Omega$, $C_1 = 10\text{pF}$. Buf_#2_O3 está conectado a O3 de FPAA #2 y esta configurado con una ganancia unitaria y una frecuencia de corte de poco más de 20 kHz, que es típica de una aplicación de audio. Los componentes pasivos que tiene son: $R_1 = R_2 = 470\text{k}\Omega$, $C_1 = 15\text{pF}$. Si se requiere una frecuencia de corte inferior o mayor, es muy fácil modificar este filtro sin quitar los componentes de montaje superficial debajo, simplemente agregando capacitores y resistencias TH. En la Figura 3.3 se muestra el diagrama esquemático del buffer de salida.

Las ecuaciones para calcular la ganancia y la frecuencia de corte de los buffers de salida son las siguientes:

$$G = \frac{R_2}{R_1} \quad (3.8)$$

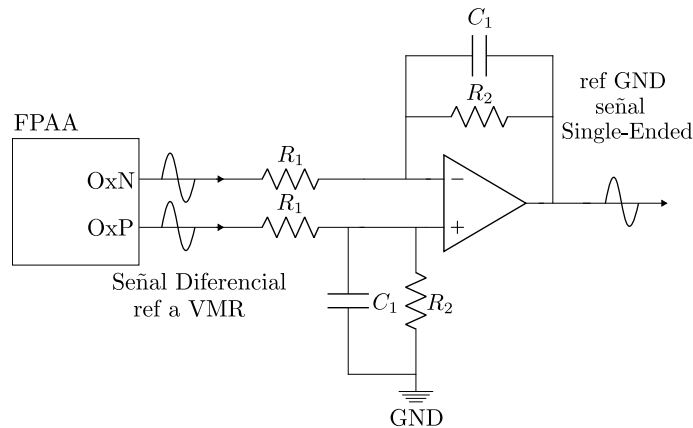
$$F_o = \frac{1}{2\pi R_2 C_1} \quad (3.9)$$

Es importante resaltar que para utilizar tanto los filtros Rauch como los buffers de salida sin cables adicionales es necesario cerrar los DIP switches correspondientes para hacer las conexiones sobre la tarjeta, sin embargo no hay que olvidar que siempre es posible cablear externamente utilizando jumpers desde los filtros a cualquiera de las entradas o salidas de las FPAA.

3.2.7. Circuito de prueba

La tarjeta es capaz de autoconfigurar los FPAA con un circuito de prueba para una verificación rápida de la placa. Para hacer esto, coloque un jumper en J3 y reinicie la tarjeta. Todos los FPAA en la cadena ahora se configurarán con el circuito de prueba (el LED verde indica que la configuración fue exitosa). Este circuito de prueba genera una onda sinusoidal en todas las 7 salidas del FPAA (14 salidas diferenciales). La frecuencia de esta onda sinusoidal es de 1 kHz en FPAA #1, 2 kHz en FPAA #2, 4 kHz en FPAA #3 y 8 kHz en FPAA #4. Si se habilitan menos de 4 FPAA en la cadena, solo se configurarán aquellos FPAA que estén habilitados. Si se coloca un jumper en J3 y J4, se cargará un circuito diferente en los FPAAs. Este es un circuito de prueba especial utilizado por Anadigm durante la producción. Se aconseja al usuario que no coloque jumpers en J3 y J4 al mismo tiempo.

Figura 3.3: Esquemático del buffer de salida.



3.3. AnadigmDesigner2

AD2 es un software creado por la empresa Anadigm el cual permite construir fácilmente circuitos analógicos complejos seleccionado, colocando y cableando juntos subcircuitos de bloques de construcción denominados CAM (Configurable Analog Modules), estos aportan flexibilidad y sencillez en el proceso de diseño debido a que son bloques que desempeñan desde funciones sencillas como inversores o comparadores hasta diseños completos como filtros y multiplicadores. Los CAM pueden interconectarse fácilmente unos con otros y únicamente necesitan pequeñas configuraciones para su correcto funcionamiento. Los circuitos analógicos que se construyen pueden ser descargados a la FPAA y esta funcionará como el circuito construido. Los resultados del diseño analógico pueden ser visto de inmediato utilizando un generador de funciones y un osciloscopio (hardware-in-the-loop). Los CAM más utilizados son los mostrados en la Tabla 3.3. En secciones posteriores se abordará con más detalle como configurarlos y cuales son las ecuaciones necesarias para calcular los parámetros de cada uno.

3.3.1. Comunicación con AD2

En este punto la tarjeta ya puede ser programada lo que en este caso significa configurar los FPAA. Esto puede realizarse desde una PC o una laptop usando un cable estándar USB tipo A-B. La tarjeta usa una emulación de comunicación serial de tal manera que desde la computadora la tarjeta aparecerá como un puerto COM.

Para programar la tarjeta el primer paso consiste en asegurarse de seleccionar la tarjeta adecuada y comprobar que esta funcione correctamente, para esto, conecte el cable USB entre la placa y la computadora y encienda la tarjeta. Abra AD2 y haga clic en **Settings/Preferences**, en la pestaña **Chip** seleccione **AN231E04**, después diríjase a la pestaña **Port**. En el menú desplegable **Select Port** debe estar el puerto COM correspondiente a la tarjeta Anadigm. Este es en realidad un puerto COM virtual debido a que la tarjeta tiene un **USB/UART bridge** llamado CP2102 el cual emula un puerto serial.

Seleccione el puerto COM correspondiente. Haga clic en **Apply**, después en **OK**. Para comprobar que AD2 ahora puede comunicarse con la tarjeta, haga clic en **Target/Display Board Information**. El LED verde D4 se apagará.

La Figura 3.4 muestra la información que despliega AD2 acerca de la tarjeta donde todas las 4 FPAA están configuradas en cadena. Si menos FPAA están configuradas entonces la información de la placa mostrará cuantas FPAA están disponibles.

Ahora debería ser posible descargar un circuito desde AD2. Para hacer esto simplemente es necesario dar clic sobre el icono de descarga (a la izquierda del signo de interrogación amarillo, debajo de Dynamic Config). Como alternativa presionar Ctrl + W. Un LED amarillo comenzará a parpadear y un sonido de campanilla se escuchará

Tabla 3.3: CAMs básicos de AD2.

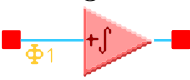
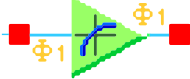
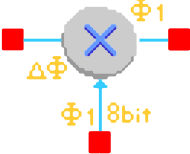
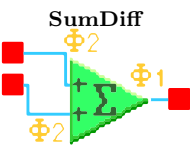
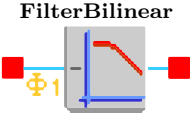
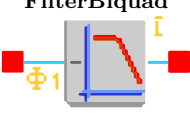
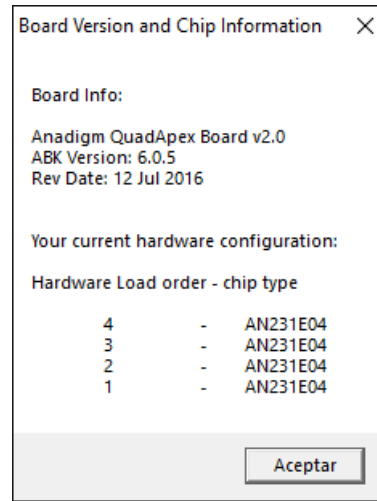
Nombre	Función de transferencia	Descripción
GainInv 	$\frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} = -G$	Ganancia inversora. Gain: 0.01 - 100.0 V/V
Integrator 	$\frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} = \frac{\pm K}{s}$	Integrador con una constante de integración programable. La salida puede ser inversora o no inversora.
Voltage 	$V_{out} = \pm 2$	Referencia de voltaje de ± 2 V.
TransferFunction 		Lookup Table: función de transferencia especificada por el usuario de 256 de pasos de cuantificación.
Multiplier 	$V_{out} = M \cdot V_x \cdot V_y$	V_x es la entrada de voltaje izquierda. V_y es la entrada de voltaje inferior cuantificado de 8 bits. M factor de multiplicación.
SumInv 	$V_{out} = -G_1 V_{in1} - G_2 V_{in2} - G_3 V_{in3}$	Configurable desde 2 hasta 3 entradas. Cada entrada tiene una ganancia programable. Configurable desde 2 hasta 4 entradas.
SumDiff 	$V_{out} = \pm G_1 V_{in1} \pm G_2 V_{in2} \pm G_3 V_{in3} \pm G_4 V_{in4}$	Las entradas pueden ser inversoras o no inversoras. Cada entrada tiene una ganancia programable. Configurable desde 2 hasta 4 entradas.
FilterBilinear 	Low Pass Bilinear Filter $\frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} = \pm \frac{2\pi f_0 G}{s + 2\pi f_0}$ High Pass Bilinear Filter $\frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} = -\frac{Gs}{s + 2\pi f_0}$ ⋮	Puede ser configurado como pasabajas, pasaaltas, pasatodas o general (Polo y cero).
FilterBiquad 	Low Pass Biquadratic Filter $\frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} = \frac{\pm 4\pi^2 f_0^2 G}{s^2 + \frac{2\pi f_0}{Q}s + 4\pi^2 f_0^2}$ High Pass Biquadratic Filter $\frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} = \frac{-Gs^2}{s^2 + \frac{2\pi f_0}{Q}s + 4\pi^2 f_0^2}$ ⋮	Puede ser configurado como pasabajas, pasaaltas, pasabanda, rechazabanda o general (Polos y ceros).

Figura 3.4: Información de la placa desplegada por AD2.

mientras cada FPAA es configurada, finalmente un LED verde se encenderá indicando que todas las FPAA han sido configuradas correctamente. Un LED rojo indicará que la configuración falló. Es importante que el número de FPAA en AD2 coincida con el número de FPAA habilitadas en la placa. Como ejemplo, si la tarjeta fue configurada con una cadena de 3 FPAA, entonces estará esperando 3 configuraciones de FPAA para ser descargadas desde AD2 de lo contrario podrían ocurrir errores.

3.3.2. Equivalencia de conexiones en tarjeta y en software

En la Tabla 3.4 y en la Figura 3.5 se muestran las equivalencias de los pines físicos sobre la tarjeta y los puertos en AD2. Estas equivalencias son de vital importancia para no cometer errores al momento de realizar mediciones y de mismo modo abre paso para conocer las conexiones que se necesitan realizar al momento de activar los DIP switches.

Tabla 3.4: Equivalencias de IOCell en AD2 a físicos pines en tarjeta en FPAA.

IOCell 1		IOCell 2		IOCell 3		IOCell 4	
01	I1P	09	I2P	11	I3P	24	I4P
02	I1N	08	I2N	12	I3N	23	I4N
04	O1P	06	O2P	14	O3P	21	O4P
03	O1N	07	O2N	13	O3N	22	O4N

IOCell 5		IOCell 6		IOCell 7	
15	IO5P	17	IO6P	19	IO7P
16	IO5N	18	IO6N	20	IO7N

Al activar los DIP switches también es necesario especificar en AD2 estas conexiones, en la Figura 3.6 se muestran las conexiones necesarias de los 6 DIP switches que

interconectan las 4 FPAA, estos son S2, S3, S4, S5, S6, y S7.

Figura 3.5: Equivalencias de pines físicos en AD2.

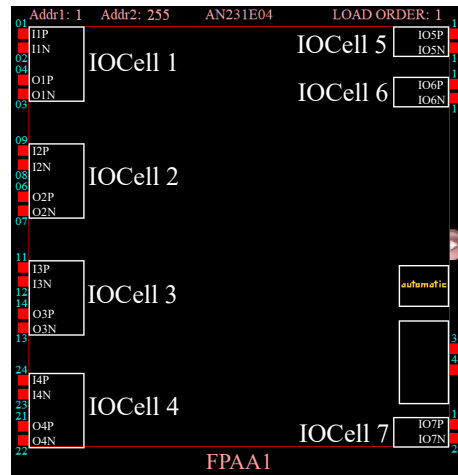


Figura 3.6: Conexiones necesarias al activar DIP switches.

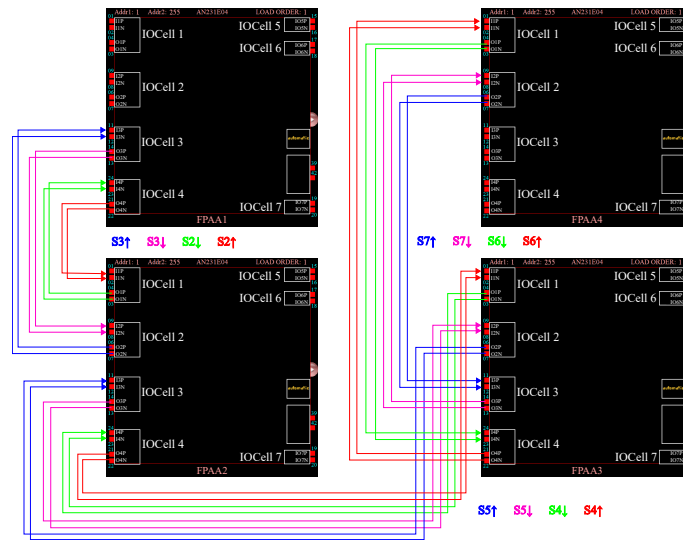


Tabla 3.5: Conexiones de DIP switches.

Cerrar DIP switch	FPAA n	FPAA $n + 1$
S_{2n} $2 \uparrow$	O4P $\rightarrow$	I1P
	O4N $\rightarrow$	I1N
S_{2n} $2 \downarrow$	I4P $\leftarrow$	O1P
	I4N $\leftarrow$	O1N
S_{2n+1} $2 \uparrow$	I3P $\leftarrow$	O2P
	I3N $\leftarrow$	O2N
S_{2n+1} $2 \downarrow$	O3P $\rightarrow$	I2P
	O3N $\rightarrow$	I2N

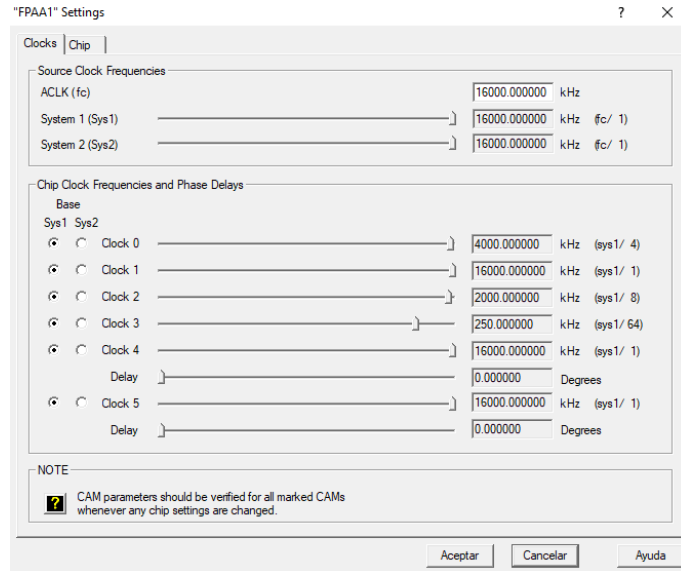
En Tabla 3.5 se muestra una generalización para hacer estas conexiones, como ejemplo consideremos $n = 1$, es decir conexión entre la FPAA1 y FPAA2, si se quiere conec-

tar la salida 4 (O4P y O4N) del FPPA1 a la entrada 1 (I1P y I1N) del FPAA2 cierre los 2 switches superiores del DIP switch S2.

3.3.3. Configuración de relojes

Las configuraciones de los CAMs dependen de las frecuencias de reloj que se seleccionen para cada FPAA. Cada FPAA tiene dos fuentes de frecuencias de reloj de sistema **Sys1** y **Sys2**, y seis frecuencias de reloj de chip, desde **Clock 0** hasta **Clock 5** que son subdivisiones de cualquiera de las fuentes de reloj sistema. Seleccionar y configurar correctamente los relojes es importante ya que el rango de operación de los CAMs depende de esto. En la Figura 3.7 se muestra la ventana de configuración de frecuencias de reloj.

Figura 3.7: Ventana de configuración de frecuencias de reloj en AD2.



La tarjeta tiene una fuente de frecuencia de reloj principal llamada **ACLK** o f_c cuya frecuencia es igual a 16 MHz y a pesar de que es posible modificarla se recomienda no hacerlo a menos de ser estrictamente necesario, a frecuencias menores los CAMs presentan problemas de funcionamiento. Sys1 y Sys2 dependen de esta frecuencia y pueden ser modificadas utilizando las siguientes ecuaciones:

$$\text{Sys1} = \frac{f_c}{m} \quad \text{Sys2} = \frac{f_c}{m} \quad (3.10)$$

donde $m \in [1, 510]$ y es par. Usualmente Sys1 y Sys2 no se modifican drásticamente y m se mantiene en valores pequeños sin embargo es necesario entender que estas dos fuentes de frecuencias de reloj a su vez controlan a las fuentes de reloj de chip desde Clock 0 hasta Clock 5 dada la siguiente ecuación:

$$\text{Clock } h = \frac{\text{Sys1}}{n} \quad \text{Clock } h = \frac{\text{Sys2}}{n} \quad (3.11)$$

donde $n \in [1, 510]$ y es par y $h \in [0, 5]$. Configurar las fuentes de reloj de chip cobrará importancia en secciones posteriores y las ecuaciones deben tenerse presentes.

3.4. Lookup Table

En ocasiones es necesario utilizar funciones poco tradiciones en los diseños analógicos, una función tangente o una función saturación por mencionar algunas. Para lograr esto se utiliza lo que se conocen como **Lookup Tables**.

Una Lookup Table es una tabla de 2^n elementos donde n es el número de bits (en el caso de la QuadApex v2.0 $n = 8$), en la cual a cada rango de voltaje se le asigna un voltaje de salida. Otra manera de entender a las Lookup Tables es como una función definida de la siguiente manera:

$$V_{\text{out}} = f(V_{\text{in}}) \quad (3.12)$$

como la tarjeta trabaja con voltajes de entre 3V y -3V, el dominio y el rango de la función también esta limitado por estos voltajes.

La resolución de la lookup table es igual a la siguiente ecuación:

$$R = \frac{V_{\text{max}}}{2^n} \quad (3.13)$$

donde V_{max} es la diferencia de potencial que puede tomar la entrada, en la QuadApex v2.0 $V_{\text{max}} = 6\text{V}$ debido sus voltajes de trabajo, por lo tanto:

$$R = \frac{6\text{V}}{2^8} = 0.0234 \approx 23\text{mV} \quad (3.14)$$

esto quiere decir que entre $\pm 3\text{V}$ existen 256 rangos de voltaje cada uno separado por 23 mV donde a cada uno le corresponde un único valor definido por una función arbitraria elegida por el usuario.

Consideremos el siguiente ejemplo que ejemplificar el funcionamiento de una lookup table en AD2:

1. Configure la cadena de FPPAs a solo una, conecte la placa vía USB, enciéndala y compruebe la conexión como se menciona en la sección 3.3.1.
2. Habilite el buffer BUF_#1_O3 moviendo a la derecha el DIP switch S13.
3. Habilite el filtro RAUCH_#1_IO1 moviendo a la derecha el DIP switch S10 y conecte IN- a GND y conecte la señal a IN+.

4. En AD2 habilite el filtro Rauch haciendo doble clic en la IO cell con los números 01, 02, 03, 04, seleccione el radio button marcado Input, después seleccione el radio button marcado Amplifier.
5. En AD2 inserte 2 CAM GainInv. Configure el primero con una ganancia Gain: 1 y el segundo con una ganancia de Gain: 2, ambos con un ClockA = 250kHz.
6. En AD2 inserte el CAM de TransferFunction, configure ClockA = 250kHz y ClockB = 4000kHz. Habilite Output Hold: On y desmarque Opamp Chopping.
7. En AD2 habilite la salida donde se encuentra el buffer de salida haciendo doble clic en la IO cell con los números 11, 12, 14, 13, después seleccione el radio button marcado Output y después seleccione el radio button marcado Bypass.
8. En AD2 conecte todos los componentes como se muestra en la figura 3.8.
9. Genere la lookup table de la siguiente función:

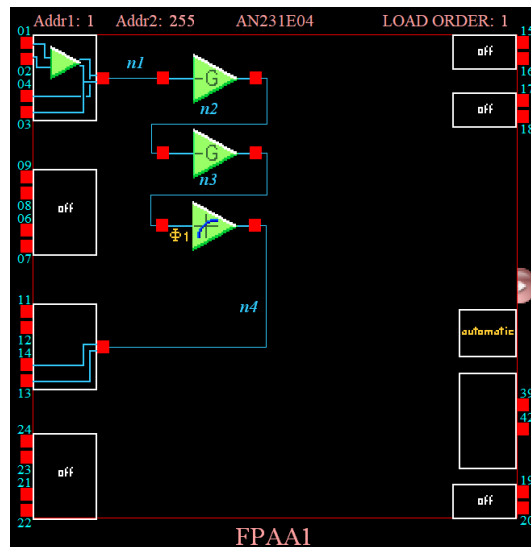
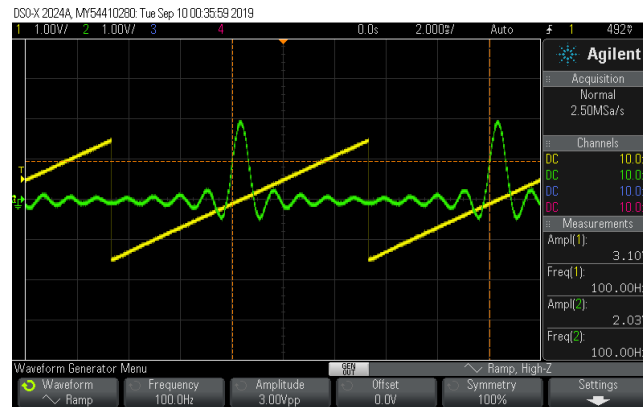
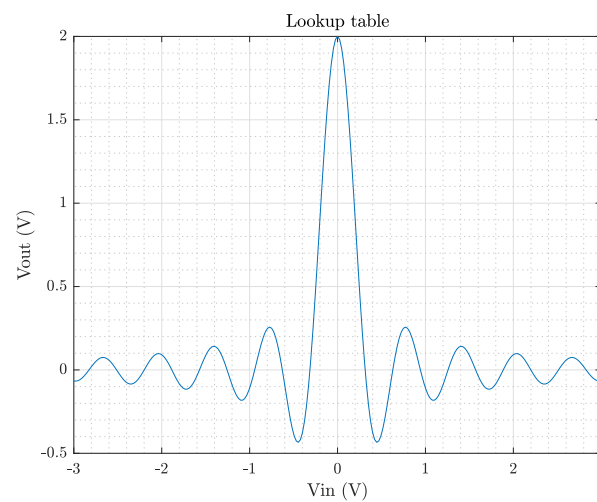
$$V_{\text{out}} = 2 \operatorname{sinc}(x) = 2 \frac{\sin x}{x} \quad (3.15)$$

donde $x = 10V_{\text{in}}$ utilizando el código del apéndice A.3, este generará un archivo de Excel con nombre **Lookup_Table.csv**.

10. En AD2 configure el CAM TransferFunction, abra las configuraciones y seleccione Lookup Table, copie y pegue el archivo Lookup_Table.csv donde se encuentre el proyecto de AD2, de clic en Load y seleccione la lookup table, finalmente de clic en Apply y después en OK.
11. Conecte un generador de funciones con una función rampa con pendiente positiva de 3V pico a pico y una frecuencia de 100Hz a los pines IN+ y GND del filtro RAUCH_#1_IO1, recuerde que la señal en este caso es single-ended.
12. Presione Ctrl + W para descargar el programa a la tarjeta. Si realiza la medición de los pines Out y Gnd del buffer BUF_#1_O3 verá lo mostrado en la figura 3.9.

Como la señal de entrada es de 3V pico a pico se necesita amplificar en un factor de 2 para que tenga el dominio completo de la función, los dos amplificadores en cadena tienen la función de amplificar evitando la inversión. Si la señal de entrada desde un principio es de 6V pico a pico se puede prescindir de ambos amplificadores inversores y conectar directamente al CAM TransferFunction.

En la Figura 3.10 se muestra la gráfica generada por el código del apéndice A.3. Comparando las Figuras 3.10 y 3.9 podemos observar que la señal se reconstruyó con

Figura 3.8: Circuito en AD2 utilizando lookup table.**Figura 3.9:** Medición en osciloscopio de lookup table.**Figura 3.10:** Gráfica generada con código A.3.

una buena calidad no obstante entre mayor sea la frecuencia de entrada de la rampa comenzará a aparecer distorsión, a una frecuencia de 1kHz empieza a ser notorio, de

mismo modo si la función que el usuario ingresa tiene una frecuencia muy alta la resolución no será suficiente y en la implementación ocurrirán errores.

3.5. NI ELVIS II+

3.5.1. ¿Qué es la NI ELVIS II+?

El NI Engineering Laboratory Virtual Instrumentation Suite (NI ELVIS) es un dispositivo modular de laboratorio educativo de ingeniería que incluye un osciloscopio, multímetro digital, generador de funciones, fuente de alimentación variable, **analizador de Bode** y otros instrumentos comunes de laboratorio. Es necesario utilizar una PC en conjunto con la NI ELVIS para acceder a todas sus prestaciones y la comunicación entre las dos se hace vía USB.

3.5.2. Instalación

El NI ELVIS II+ requiere del software NI ELVISmx para su correcto funcionamiento, actualmente se encuentra en la versión 19.0 sin embargo la versión 16.0 posee mayor compatibilidad y es la que se recomienda instalar. El software se puede encontrar dirigiéndose al siguiente link:

<https://www.ni.com/es-mx/support/downloads/drivers/download.ni-elvismx.html>

la instalación es directa y basta con leer cuidadosamente las ventanas emergentes para no cometer errores.

3.5.3. Puesta en marcha y calibración

Una vez terminada la instalación del software, para poner en marcha el NI ELVIS es necesario seguir los siguientes pasos:

1. Realizar las conexiones que se muestran en la Figura 3.11 las cuales consisten en conectar un cable USB entre la computadora y el NI ELVIS, conectar la fuente de alimentación al NI ELVIS y al toma corriente.

2. Activar el switch de alimentación principal, ver Figura 3.12, los leds indicadores ACTIVE y READY se iluminarán, esperar hasta que quede solo encendido el segundo. Automáticamente se abrirá el programa NI ELVISmx Instrument Launcher.
3. Activar el switch de alimentación de la placa de prototipado, ver Figura 3.12, el led indicador POWER se iluminará.
4. En la ventana NI ELVISmx Instrument Launcher dar clic en la opción Resources y después en Measurement and Automation Explorer, se desplegará una nueva ventana, en ella dar clic en la siguiente ruta My System/Devices and Interfaces/Ni ELVIS II+“Dev1”. Dar clic en Reset y en Self-Test para comprobar la comunicación y después dar clic en Self-Calibrate. Una vez terminada la calibración no es necesario mantener la ventana de la calibración abierta.

Figura 3.11: Diagrama de conexiones de NI ELVIS II+.

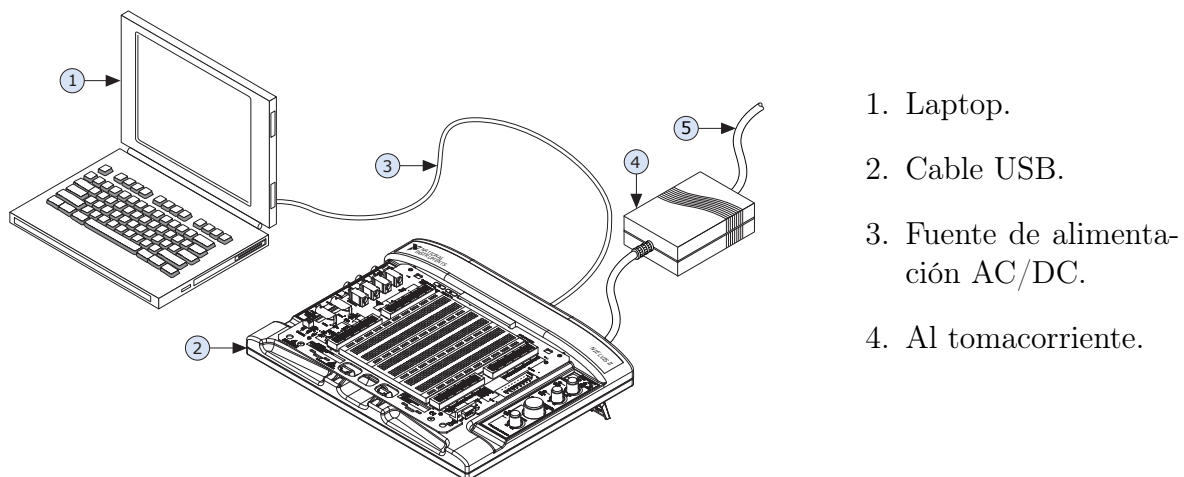
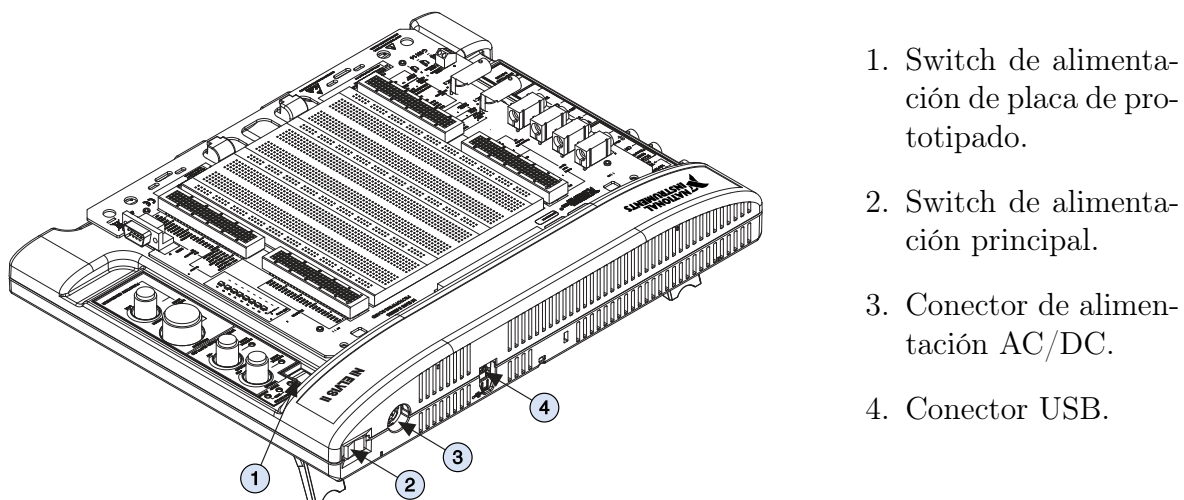


Figura 3.12: Puertos y switches de NI ELVIS II+.



Los pasos anteriores se tienen que repetir siempre que se comience a trabajar con la NI ELVIS II+.

3.5.4. Diagramas de Bode

El diagrama de Bode que se obtiene del NI ELVIS II+ se hace por medio de un barrido en frecuencia real. El dispositivo genera una señal estímulo senoidal con una amplitud que puede ser seleccionada por el usuario desde una frecuencia inicial hasta una frecuencia final con un paso definido, esta señal se introduce a la entrada de circuito a analizar y utilizando dos puntas de osciloscopio se mide tanto el estímulo como la respuesta del circuito a este.

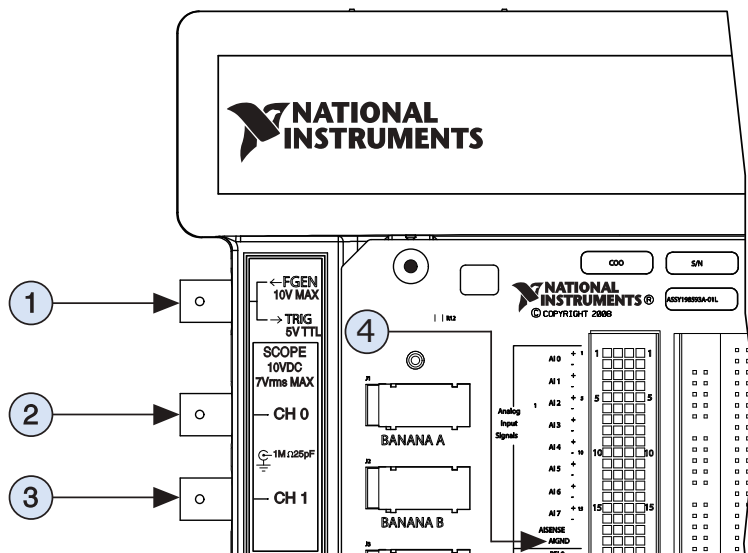
Para poder realizar un diagramas de Bode utilizando el NI ELVIS II+ es necesario seguir la siguiente metodología:

1. Realizar la calibración descrita en la sección anterior.
2. Construir el circuito a analizar en la placa de prototipado de la NI ELVIS II+ y alimentarlo con las fuentes de alimentación incluidas en el dispositivo, ver Figura 3.14, en caso de tratarse de un circuito externo compartir tierra con el dispositivo.
3. Conectar la señal FGEN ubicada en la placa de prototipado a la entrada del circuito a analizar y conectar la referencia del circuito a GROUND, ver Figura 3.14.
4. Conectar una punta de osciloscopio al conector BNC SCOPE CH 0, este será el canal del estímulo y debe conectarse a la entrada del circuito y a GROUND, ver Figuras 3.13 y 3.14.
5. Conectar una punta de osciloscopio al conector BNC SCOPE CH 1, este será el canal de la respuesta y debe conectarse a la salida del circuito y a GROUND, ver Figuras 3.13 y 3.14.
6. Abrir la aplicación Bode Analyzer.
7. Realizar las siguientes configuraciones:

<i>a)</i> Stimulus Channel: SCOPE CH 0	<i>e)</i> Steps: 10 (per decade)
<i>b)</i> Response Channel: SCOPE CH 1	<i>f)</i> Peak Amplitudde: 1 V
<i>c)</i> Start Frequency: 100 Hz	<i>g)</i> Op-Amp Signal Polarity: Normal
<i>d)</i> Stop Frequency: 10 kHz	<i>h)</i> Mapping: Logarithmic
8. Iniciar la medición del diagrama de Bode dando clic en Run.

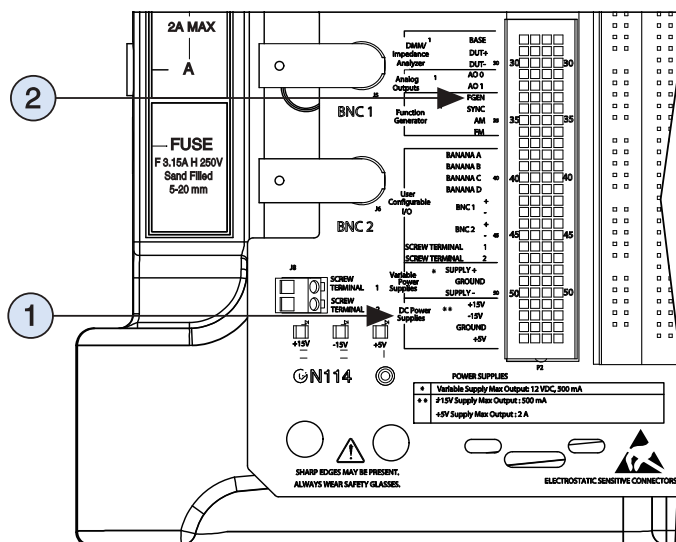
9. Para guardar los datos obtenidos dar clic en Log y seleccionar una ruta de destino.

Figura 3.13: Puestos BNC de osciloscopio de NI ELVIS II+.



1. Conector BNC FGEND de salida de generador de funciones.
2. Conector BNC SCOPE CH 0.
3. Conector BNC SCOPE CH 1.
4. Señal AIGND ubicada en la placa de prototipado.

Figura 3.14: Fuentes de alimentación en NI ELVIS II+ y FGEM.



1. Alimentaciones en placa de prototipado. Pines $\pm 15V$, $+5V$ y GROUND.
2. Señal FGEN ubicada en la placa de prototipado.

3.5.5. Ejemplo práctico

Como ejemplo consideremos un filtro pasabajas activo el cual posee la siguiente función de transferencia:

$$T(s) = -\frac{k\omega_0}{s + \omega_0} \quad (3.16)$$

donde:

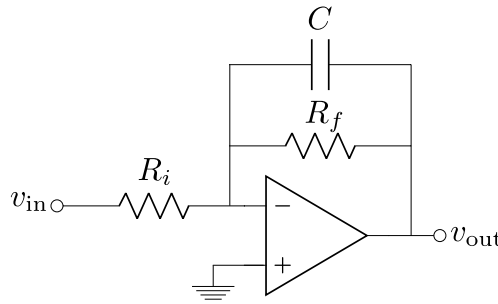
$$\omega_0 = \frac{1}{R_f C} \quad k = \frac{R_f}{R_i} \quad (3.17)$$

si consideramos los valores $R_f = R_i = 8.2\text{k}\Omega$ y $C = 1\mu\text{F}$ entonces la función de transferencia (3.16) se reescribe como:

$$T(s) = -\frac{1.22 \cdot 10^5}{s + 1.22 \cdot 10^5} \quad (3.18)$$

donde $\omega_0 = 1.22 \cdot 10^5$ y $k = 1$. En la Figura 3.15 se muestra el diagrama esquemático del filtro pasabajas activo.

Figura 3.15: Diagrama esquemático de filtro pasabajas activo.



Utilizando LTspice se puede hacer la simulación de respuesta en frecuencia del circuito utilizando el modelo spice del amplificador operacional TL081 que se puede encontrar en el siguiente link:

<http://www.ti.com/lit/zip/sloj069>

un código en Spice se muestra en el apéndice A.4 el cual realiza un barrido en frecuencia desde 1 kHz hasta 10 MHz con una resolución de 1000 puntos por década. Una vez realizada la simulación se exportan los resultados de magnitud y fase en archivo de texto para su posterior manipulación en MATLAB.

Utilizando la metodología descrita en la sección anterior considerando las siguientes configuraciones:

- | | |
|---------------------------------|-----------------------------------|
| a. Stimulus Channel: SCOPE CH 0 | e. Steps: 20 (per decade) |
| b. Response Channel: SCOPE CH 1 | f. Peak Amplitudde: 1 V |
| c. Start Frequency: 1000 Hz | g. Op-Amp Signal Polarity: Normal |
| d. Stop Frequency: 5 MHz | h. Mapping: Logarithmic |

se obtiene el diagrama de Bode experimental del circuito pasabajas activo como se muestra en la Figura 3.16. Al igual que con la simulación se exportan los resultados en un archivo de texto.

Finalmente en el apéndice A.5 se muestra un código para cargar los datos tanto de la simulación como experimentales para su comparación con la respuesta ideal. El código genera la gráfica de la Figura 3.17.

Figura 3.16: Diagrama de Bode experimental utilizando el NI ELVIS II+.

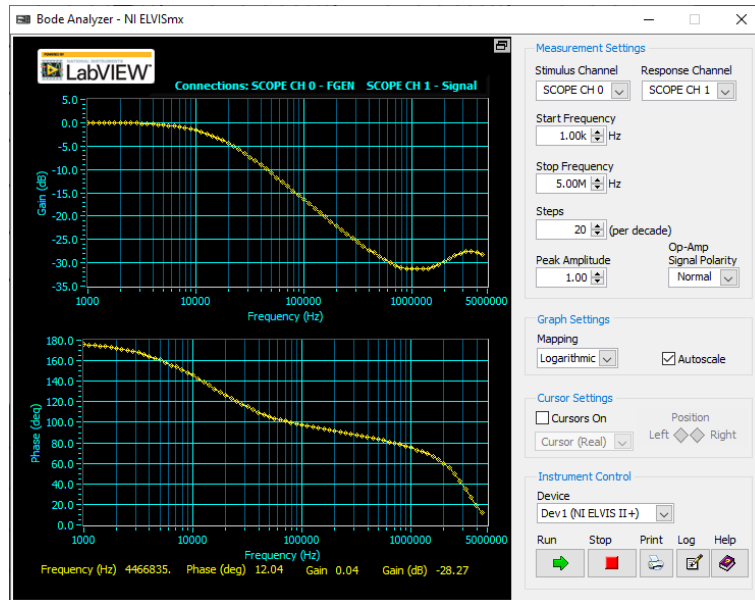
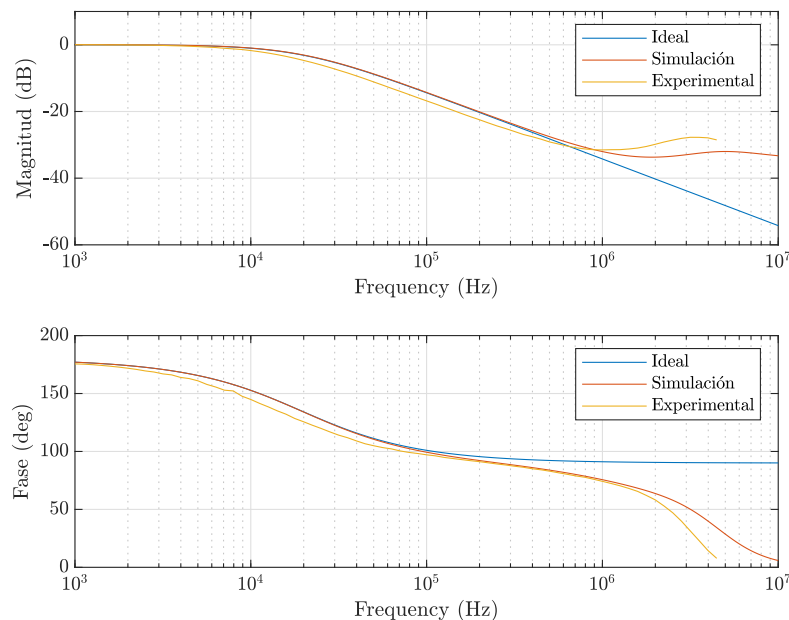


Figura 3.17: Diagramas de Bode comparativos, respuesta ideal, simulación y experimental.



Los resultados experimentales coinciden casi a la perfección con la simulación. En frecuencias arriba de 1 MHz la respuesta se aleja del comportamiento ideal debido a las limitaciones a altas frecuencias del TL081.

3.6. Implementación con aproximación de primer orden

3.6.1. Filtro bilineal configuración polo y cero

Para realizar la implementación física de la aproximación de primer orden del integrador fraccionario se utilizó el CAM **FilterBilinear** en su modo **Pole and Zero**, esto debido a su flexibilidad y semejanza con la función de transferencia de la aproximación de la CFE de primer orden. La función de transferencia del CAM en este modo es la siguiente:

$$\frac{V_{\text{out}}(s)}{V_{\text{in}}(s)} = -\frac{G_H(s + 2\pi f_z)}{s + 2\pi f_p} \quad (3.19)$$

donde G_L esta definida como:

$$G_L = \frac{f_z}{f_p} G_H \quad (3.20)$$

y donde G_L es la ganancia en DC, G_H es la ganancia de alta frecuencia, f_p es la frecuencia del polo y f_z es la frecuencia del cero. Si se utiliza un CAM de ganancia inversora (**GainInv**) se puede prescindir del signo negativo de la ecuación (3.19).

La función de transferencia de la aproximación con la CFE de primer orden, como se mencionó anteriormente es:

$$\frac{1}{(c_2) s^\alpha} \approx \frac{(1 - \alpha)s + (1 + \alpha)}{(1 + \alpha)s + (1 - \alpha)} \quad (3.21)$$

si consideramos la siguiente sustitución:

$$A = \frac{1 - \alpha}{1 + \alpha} \quad (3.22)$$

podemos reescribir la ecuación (3.21) de la siguiente manera:

$$\frac{1}{(c_2) s^\alpha} \approx \frac{As + 1}{s + A} \quad (3.23)$$

no obstante el ancho de bando de la ecuación (3.23) es de 10^{-1} rad/s hasta 10^1 rad/s, ver Figura 2.2, lo cual es un rango de frecuencias muy bajo y presenta dificultades en su implementación. Por esta razón se opta por aplicar un escalamiento en frecuencia a la ecuación (3.23) utilizando los siguiente pasos:

1. Se cambia la variable compleja por p la cual representa la frecuencia actual:

$$N(p) = \frac{Ap + 1}{p + A} \quad (3.24)$$

2. Se utiliza la sustitución $p = \frac{s}{k_f}$:

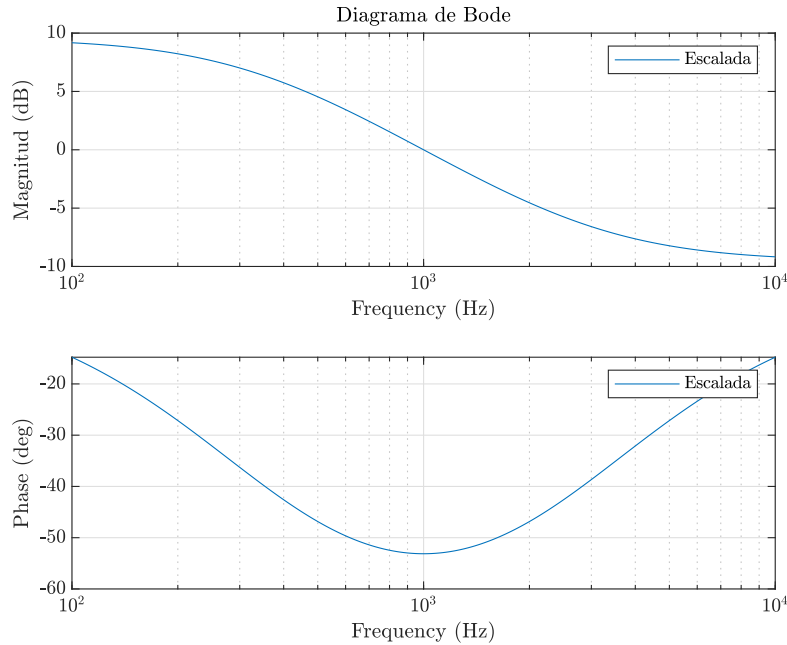
$$N(s) = \frac{Ask_f^{-1} + 1}{sk_f^{-1} + A} \quad (3.25)$$

3. Se reescribe de una manera más conveniente:

$$\frac{1}{(c_2) s^\alpha} \approx \frac{As + k_f}{s + Ak_f} \quad (3.26)$$

El factor de escalamiento k_f se puede elegir a conveniencia dependiendo del ancho de banda necesario, no obstante la frecuencia de entrada de la mayoría de los CAM esta limitada aproximadamente a valores menores de 2 MHz, esto debido a que el tipo de procesamiento de señal del CAM se basa en arquitecturas de datos muestreados. Por esta razón se opta por un escalamiento con un factor $k_f = 2\pi 1000$. En la Figura 3.18 se muestra el resultado de aplicar el escalamiento. El nuevo ancho de banda abarca desde 100 Hz hasta 10 kHz el cual se encuentra dentro del rango de operación de los CAMs.

Figura 3.18: Diagrama de Bode de ecuación (3.26) para un integrador fraccionario con $k_f = 2\pi 1000$ y $\alpha = 0.5$.



Para poder configurar el CAM FilterBilinear es necesario encontrar los valores correctos para los parámetros G_H , G_L , f_z y f_p dado un orden α , esto se logra igualando las ecuaciones (3.26) y (3.19).

$$\frac{G_H(s + 2\pi f_z)}{s + 2\pi f_p} = \frac{As + k_f}{s + Ak_f} \quad (3.27)$$

de la ecuación (3.27) se deducen las siguientes ecuaciones:

$$G_H = A \quad (3.28)$$

$$f_p = \frac{Ak_f}{2\pi} \quad (3.29)$$

$$f_z = \frac{k_f}{2A\pi} \quad (3.30)$$

$$G_L = \frac{1}{A} \quad (3.31)$$

utilizando las ecuaciones anteriores y considerando $k_f = 2\pi 1000$ obtenemos los datos de la Tabla 3.6, esta tabla se puede generar utilizando el código del apéndice A.6, sin embargo debido a que el CAM FilterBilinear depende directamente de la frecuencia de reloj que se seleccione en el parámetro **ClockA** no todos los valores de la tabla pueden ser ingresados, en la ventana de configuración aparecerán marcados en color rojo, por lo tanto es necesario hacer un análisis de frecuencias para este parámetro. En la ventana de configuración del CAM, ver Figura 3.19, se pueden ingresar 3 de los 4 parámetros requeridos, el parámetro restante es calculado automáticamente. Por simplicidad se eligió que el parámetro que se calcule automáticamente sea **DC Gain**.

Figura 3.19: Ventana de configuración de parámetros FilterBilinear.

Set CAM Parameters

Instance Name: AnadigmApex\FilterBilinear 1.0.2 (Bilinear Filter)

Clocks
ClockA:

This is an inverting filter. See the transfer function in the CAM Documentation.
This version should be used with a held input signal that does not change during phase 2.

Options

Filter Type: ☐ Low Pass ☐ High Pass ☐ All Pass ☒ Pole and Zero

Automatic Variable: ☐ Pole Frequency ☐ Zero Frequency ☒ DC Gain ☐ High Frequency Gain

Resource Usage: ☒ Minimum Resources ☐ Low Corner Frequency

Opamp Chopping: ☐ Enabled

Parameters

Pole Frequency [kHz]: (20.0 realized) [4.00 To 400]

Zero Frequency [kHz]: (80.2 realized) [16.0 To 400]

DC Gain: (1.0 realized) [0.0500 To 5.00]

High Frequency Gain: (0.249 realized) [0.0500 To 5.00]

CAM Source: Anadigm, Approved: Yes

Los límites absolutos de los valores que se pueden ingresar para las frecuencias f_z y f_p son $[\frac{F_c}{1000}, \frac{F_c}{10}]$ donde F_c es la frecuencia de reloj que se selecciona para el parámetro **ClockA** y los límites de ganancia están interrelacionados con los otros parámetros que pueden restringir el rango a menos que el límite absoluto el cual es $[0.01\frac{V}{V}, 100.0\frac{V}{V}]$.

Tabla 3.6: Valores para configurar un filtro bilineal como integrador de orden fraccionario en el rango de ordenes de 0.1 a 0.95.

α	f_p [kHz]	f_z [kHz]	G_L	G_H
0.10	0.818182	1.222222	1.222222	0.818182
0.15	0.739130	1.352941	1.352941	0.739130
0.20	0.666667	1.500000	1.500000	0.666667
0.25	0.600000	1.666667	1.666667	0.600000
0.30	0.538462	1.857143	1.857143	0.538462
0.35	0.481481	2.076923	2.076923	0.481481
0.40	0.428571	2.333333	2.333333	0.428571
0.45	0.379310	2.636364	2.636364	0.379310
0.50	0.333333	3.000000	3.000000	0.333333
0.55	0.290323	3.444444	3.444444	0.290323
0.60	0.250000	4.000000	4.000000	0.250000
0.65	0.212121	4.714286	4.714286	0.212121
0.70	0.176471	5.666667	5.666667	0.176471
0.75	0.142857	7.000000	7.000000	0.142857
0.80	0.111111	9.000000	9.000000	0.111111
0.85	0.081081	12.333333	12.333333	0.081081
0.90	0.052632	19.000000	19.000000	0.052632
0.95	0.025641	39.000000	39.000000	0.025641

Hay que tener presente que F_c puede ser cualquier Clock, desde el 0 hasta el 5, en otras palabras, F_c es igual a la ecuación (3.11). Un análisis de todas las posibles frecuencias para F_c dependiente de las subdivisiones dadas por n se muestran en la Tabla 3.7. Si se desea ver la tabla completa se puede usar el código del apéndice A.7.

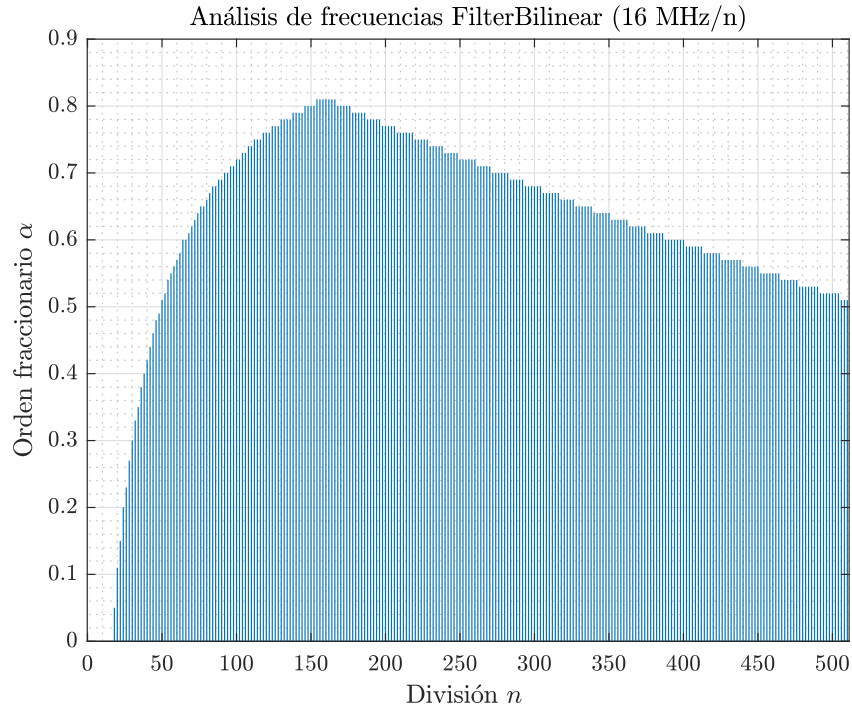
Tabla 3.7: Rango de frecuencias absolutas dependiente de F_c y el valor de n .

F_c [kHz]	n	min= $F_c/1000$ [kHz]	max= $F_c/10$ [kHz]
16000.0000	1.0000	16.0000	1600.0000
8000.0000	2.0000	8.0000	800.0000
4000.0000	4.0000	4.0000	400.0000
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
31.6206	506.0000	0.0316	3.1621
31.4961	508.0000	0.0315	3.1496
31.3725	510.0000	0.0314	3.1373

Para demostrar que no todos los valores de la Tabla 3.6 pueden ser implementados debido al rango de frecuencias absolutas mostradas en la Tabla 3.7 consideremos el siguientes ejemplo:

Imagine que queremos implemetar un integrador de orden fraccionario con la aproximación de primer orden, un $\alpha = 0.9$ y escalado en frecuencia para que su ancho de banda se encuentre entre 100 Hz y 10 kHz. Dados los requerimientos anteriores $k_f = 2\pi 1000$ y utilizando la Tabla 3.6 sabemos que $f_p = 0.052632$, $f_z = 19.0$, $G_L = 19.0$ y $G_H = 0.052632$. Como se mencionó anteriormente la fuente de frecuencia de reloj principal $f_c = 16$ MHz no debe modificarse y de mismo modo se recomienda que Sys1 y Sys2 tampoco se modifiquen dramáticamente, es decir $m = 1$. Se opta por utilizar el Clock 0 para configurar el CAM FilterBilinear y que este dependa de Sys1 = 16 MHz. Para que los datos que se ingresen en la ventana de configuración del CAM sean validos estos deben encontrarse dentro del rango de frecuencias absolutas de la Tabla 3.7, por lo tanto se tiene que elegir un n adecuado de tal manera que $F_c = \text{Clock 0} = \frac{\text{Sys1}}{n}$ cumpla con los limites absolutos de frecuencia, en otras palabras que los parámetros f_z y f_p se encuentren dentro del rango $[\frac{F_c}{1000}, \frac{F_c}{10}]$. El rango de frecuencias en el que se tiene que encontrar para poder implemetentar el integrador es $[f_p, f_z] = [0.052632, 19.0]$, no obstante el proceso de encontrar n es muy laborioso debido a que podría haber más de un valor que haga posible que se encuentren dentro del rango, de mismo modo podría ocurrir el caso contrario y ninguna n cumplir. Por esta razón en el apéndice A.8 se muestra un código para resolver este problema, este genera una gráfica, ver Figura 3.20, la cual muestra la relación entre n y el orden α , dicho de otra manera, hasta que orden fraccionario podemos implementar dependiendo del valor de n .

Figura 3.20: Gráfica de mérito, análisis de orden fraccionario dependiente de n para implementación con CAM FilterBilinear.



De analizar la Figura 3.20 se puede notar que $n = 160$ es el valor con el cual se puede implementar la mayor cantidad de integradores fraccionarios. Haciendo los cálculos $\text{Clock } 0 = \frac{16\text{MHz}}{160} = 100\text{kHz}$. No obstante únicamente se pueden implementar integradores fracciones de orden α dentro del rango $[0.01, 0.81]$. Es importante resaltar que la gráfica de mérito de la Figura 3.20 puede cambiar de forma si k_f o Sys1 se modifican. Lo anterior es de gran importancia debido a que para diferentes aplicaciones el factor de escalamiento k_f puede cambiar y será necesario generar una nueva gráfica de mérito. De mismo modo se puede modificar Sys1 para que la gráfica de mérito se ajuste a las necesidades del diseñador. Utilizando el programa del apéndice A.8 esto no presenta mayor complicación. En la Figura 3.21 se muestra el diagrama de implementación en AnadigmDesigner2, en la Figura 3.22 se muestra la configuración de los relojes de la FPAA1 y en la Figura 3.23 la configuración de los CAM.

Figura 3.21: Implementación de integrador de orden fraccionario utilizando la aproximación de primer orden.

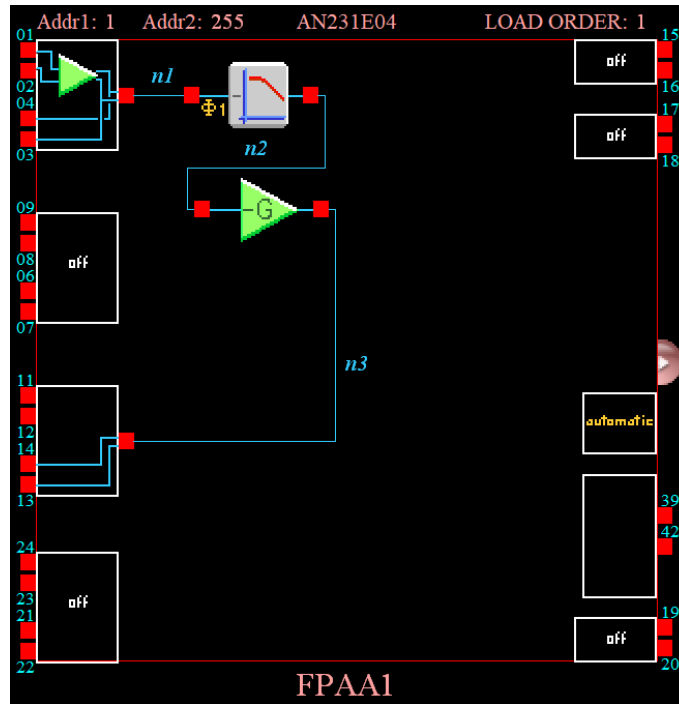


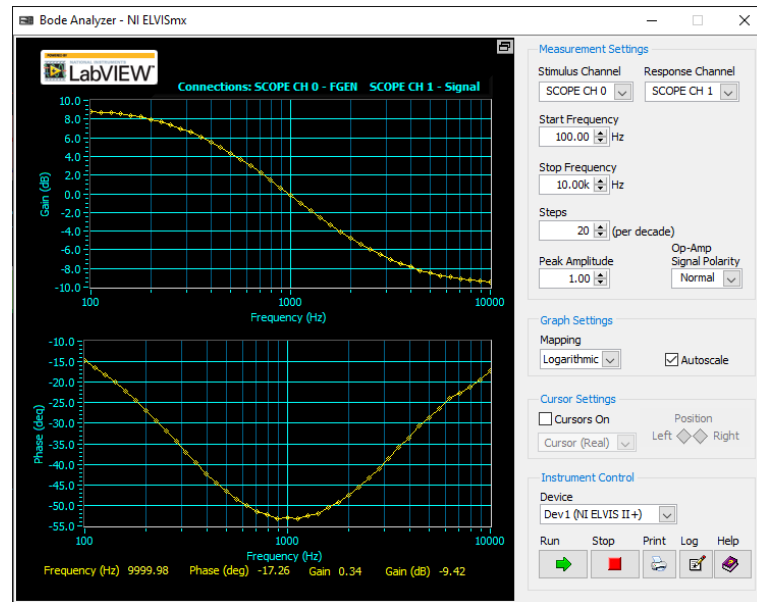
Figura 3.22: Configuración de Clocks: FPAA1 con aproximación de primer orden.

Master Clock - ACLK (fc) 16 MHz			
System Clock 1 (sys1 = fc / 1)	16 MHz	System Clock 2 (sys2 = fc / 1)	16 MHz
Clock 0 (sys1 / 160)	100 kHz	Clock 1 (sys1 / 1)	16 MHz
Clock 2 (sys1 / 8)	2 MHz	Clock 3 (sys1 / 64)	250 kHz
Clock 4 (sys1 / 1)	16 MHz	Clock 5 (sys1 / 1)	16 MHz

Figura 3.23: Configuración de los CAM con aproximación de primer orden.

Name	Options	Parameters	Clocks
FilterBilinear1 (FilterBilinear v1.0.2)  Anadigm (Approved)	Filter Type <i>Pole and Zero</i> Automatic Variable <i>DC Gain</i> Resource Usage <i>Minimum Resources</i>	Pole Frequency [kHz] <i>0.334</i> Zero Frequency [kHz] <i>2.99</i> DC Gain <i>3.00</i> High Frequency Gain <i>0.333</i>	ClockA <i>100 kHz (Chip Clock 0)</i>
GainInv1 (GainInv v1.0.1)  Anadigm (Approved)		Gain <i>1.00</i>	ClockA <i>100 kHz (Chip Clock 0)</i>

Utilizando la NI ELVIS II+ y la metodología descrita en la sección 3.5.4 se obtiene el diagrama de Bode de la Figura 3.24. La respuesta en frecuencia experimental obtenida es casi idéntica a la respuesta teórica, en la Figura 3.25 se muestran los dos diagramas de Bode juntos para comparación.

Figura 3.24: Resultados experimentales de respuesta en frecuencia con $\alpha = 0.5$.

Es importante tener en cuenta que los límites de voltaje con los que trabaja la tarjeta son $\pm 3V$ de modo que al realizar la medición experimental no siempre será posible utilizar una señal senoidal de 1V de amplitud. Como ejemplo consideremos un $\alpha = 0.8$ y $k_f = 2\pi 1000$, al hacer un análisis transitorio de la aproximación de primer orden ante una señal de entrada $u = \sin(2\pi 100t)$ obtenemos lo mostrado en la Figura 3.26. El voltaje máximo del transitorio es 7.0477V el cual sobrepasa por mucho los límites de voltaje con los que trabaja la tarjeta por lo que al medir la respuesta en frecuencia utilizando la NI ELVIS II+ obtendremos una medición errónea, esto se puede apreciar en la Figura 3.27, la salida de la tarjeta se satura en aproximadamente 2.7V y esto provoca que el diagrama de Bode medido sea incorrecto. Para solucionar esto existen dos posibilidades, la primera consiste en modificar la señal de entrada de

manera que la salida se encuentre dentro de los voltajes de la tarjeta, para el ejemplo anterior, si se elige $u = 0.35 \sin(2\pi 100t)$ el voltaje máximo a la salida sería de 2.4667V. La segunda consiste en atenuar la salida por software dentro de AD2 para que esta este dentro de los rangos de voltaje permitidos y después por medio de un circuito externo cancelar la atenuación.

Figura 3.25: Diagrama de bode de comparativo, respuesta teórica contra experimental, $k_f = 2\pi 1000$ y $\alpha = 0.5$.

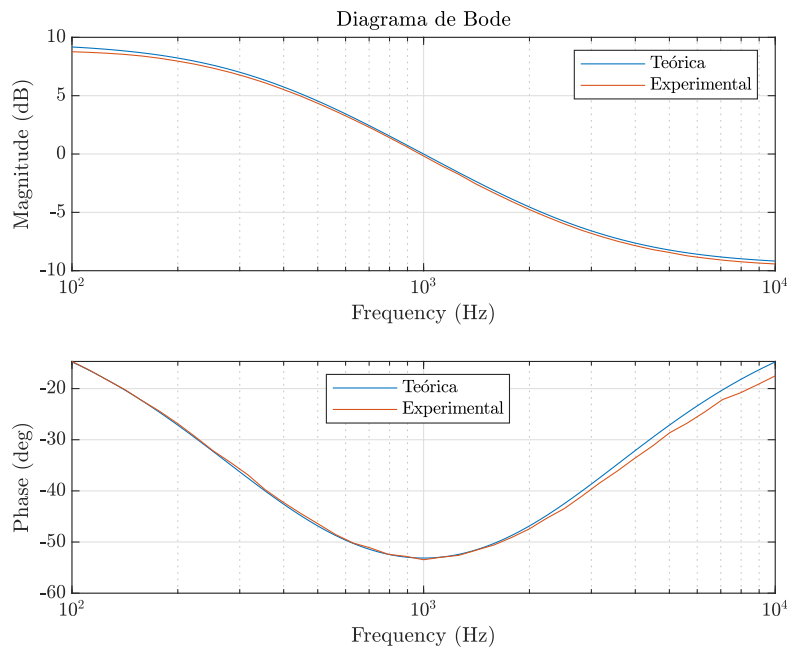


Figura 3.26: Análisis transitorio de aproximación de primer orden.

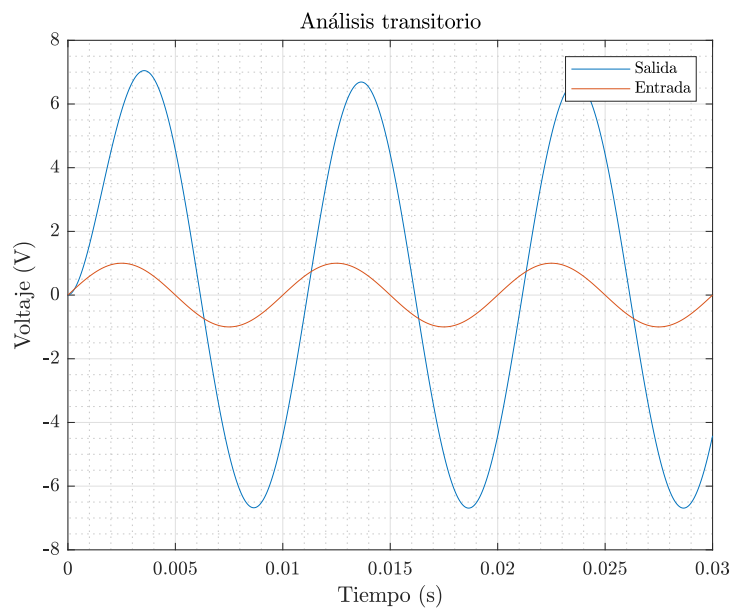
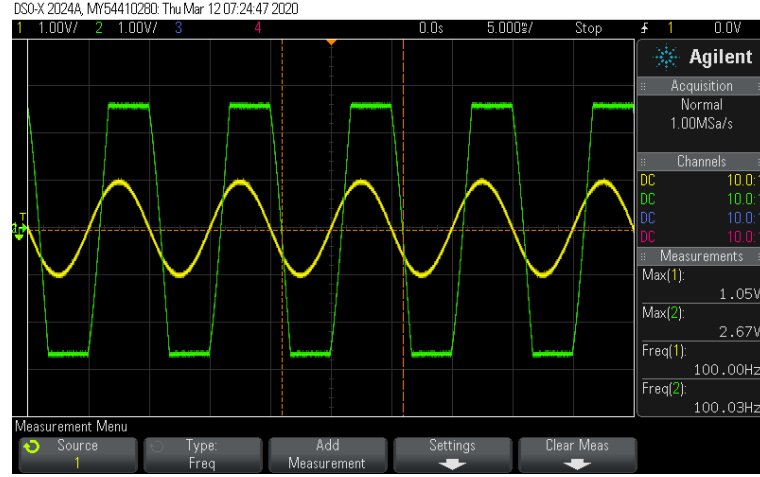


Figura 3.27: Medición experimental de análisis transitorio con error de saturación.

3.6.2. Filtro bilineal configuración pasabajas y pasaaltas

Otra alternativa para implementar el integrador es utilizando la combinación de un filtro pasaltas y pasabajas y un punto suma. Esto se puede lograr utilizando dos CAM **FilterBilinear** en su modo **Low Pass** y **High Pass** y un CAM **SumInv** para realizar la suma. La función de transferencia del CAM en el modo pasabajas es la siguiente:

$$\frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} = \pm \frac{2\pi f_0 G_1}{s + 2\pi f_0} \quad (3.32)$$

y la función de transferencia del CAM en el modo pasaaltas es la siguiente:

$$\frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} = - \frac{G_2 s}{s + 2\pi f_0} \quad (3.33)$$

donde G_1 y G_2 es la ganancia pasabanda para cada uno de los respectivos filtros y f_0 es la frecuencia de corte en la cual la ganancia es $-3 + 20\log_{10} G$. Si consideramos que ambos filtros tienen signo negativo y este se cancela con el CAM de suma, entonces la función de transferencia resultante es:

$$\frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} = \frac{2\pi f_0 G_1}{s + 2\pi f_0} + \frac{G_2 s}{s + 2\pi f_0} = \frac{G_2 s + G_1 2\pi f_0}{s + 2\pi f_0} \quad (3.34)$$

Si igualamos la aproximación de primer orden escalada de la ecuación (3.26) con la función de transferencia resultante (3.34) obtenemos:

$$\frac{G_2 s + G_1 2\pi f_0}{s + 2\pi f_0} = \frac{As + k_f}{s + Ak_f} \quad (3.35)$$

de la ecuación (3.35) se deducen las siguientes ecuaciones:

$$G_1 = \frac{1}{A} \quad (3.36)$$

$$G_2 = A \quad (3.37)$$

$$f_0 = \frac{Ak_f}{2\pi} \quad (3.38)$$

Los límites absolutos de los valores que se pueden ingresar para f_0 son $[\frac{F_c}{1000}, \frac{F_c}{10}]$. No obstante los límites absolutos de frecuencia también están interrelacionados con el valor de ganancia que puede restringir el rango a menos de sus límites absolutos y viceversa. Si consideramos $k_f = 2\pi 1000$ y utilizando las ecuaciones anteriores obtenemos los datos de la Tabla 3.8, esta tabla se puede generar utilizando el código del apéndice A.9.

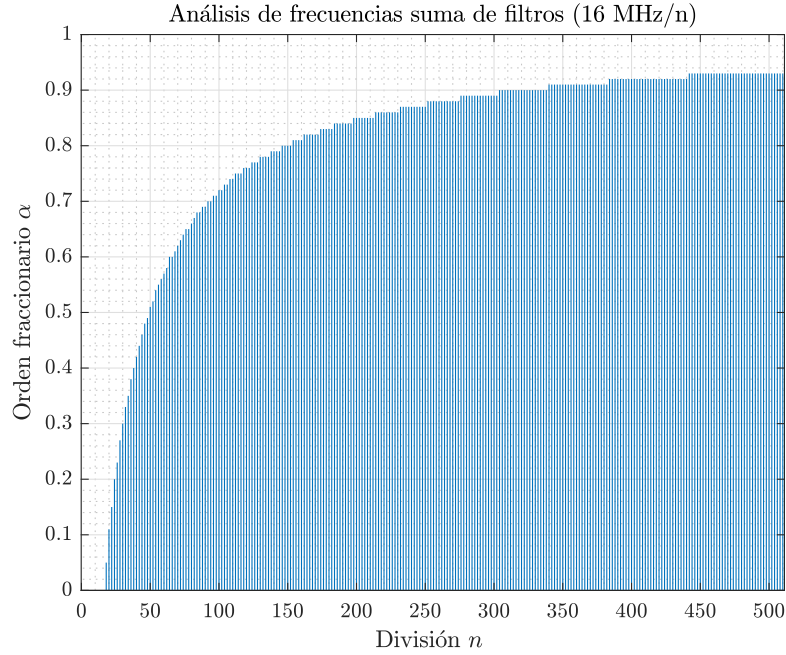
Tabla 3.8: Valores para configurar implementación suma de pasabajas y paaltas de ordenes de 0.1 a 0.95.

α	G_1 [LP]	G_2 [HP]	f_0 [kHz]
0.10	1.222222	0.818182	0.818182
0.15	1.352941	0.739130	0.739130
0.20	1.500000	0.666667	0.666667
0.25	1.666667	0.600000	0.600000
0.30	1.857143	0.538462	0.538462
0.35	2.076923	0.481481	0.481481
0.40	2.333333	0.428571	0.428571
0.45	2.636364	0.379310	0.379310
0.50	3.000000	0.333333	0.333333
0.55	3.444444	0.290323	0.290323
0.60	4.000000	0.250000	0.250000
0.65	4.714286	0.212121	0.212121
0.70	5.666667	0.176471	0.176471
0.75	7.000000	0.142857	0.142857
0.80	9.000000	0.111111	0.111111
0.85	12.333333	0.081081	0.081081
0.90	19.000000	0.052632	0.052632
0.95	39.000000	0.025641	0.025641

De manera similar a la aproximación con un solo filtro bilineal no todas los valores de la Tabla 3.8 pueden ser implementados y es necesario realizar un análisis de los parámetros G_1 , G_2 y f_0 con respecto a n . Debido a que las ganancias G_1 y G_2 pueden ser obtenidas con relativa libertad debido a que el CAM de suma permite añadir otro nivel de ganancia, el problema principal radica en que f_0 se encuentre dentro de los límites absolutos de frecuencia. Utilizando el programa del apéndice A.10 se puede obtener la gráfica de mérito de la Figura 3.28. Utilizando esta configuración podemos llegar a implementar un integrador fraccionario con un α de hasta $\alpha = 0.93$. Del análisis de la gráfica de mérito se desprende que $n = 442$ es el valor ideal, esto debido a que entre más grande sea n la frecuencia disminuye y esto podría empobrecer el rendimiento.

De mismo modo no hay que perder de vista que de ser necesario los parámetros k_f y Sys1 pueden modificarse para generar una nueva gráfica de mérito que se ajuste a las necesidades del diseñador. En la Figura 3.29 se muestra el diagrama de implementación en AD2, en la Figura 3.30 la configuración de los relojes de la FPAA1 y en la Figura 3.30 la configuración de los CAM.

Figura 3.28: Gráfica de mérito, análisis de orden fraccionario dependiente de n para implementación con suma de filtros.



Los resultados experimentales de respuesta en frecuencia obtenidos con el NI ELVIS II+ se muestran en la Figura 3.32 y en la Figura 3.33 se muestra la comparación entre la respuesta teórica y la experimental.

La ventaja de utilizar la configuración de suma de dos filtros radica en que aumenta el orden del integrador fraccionario que se puede implementar. Utilizando la configuración polo y cero podemos implementar hasta un $\alpha = 0.81$ mientras que con la suma de dos filtros podemos llegar hasta $\alpha = 0.93$. No obstante un análisis de las Figuras 3.33 y 3.25 muestra que la configuración de suma de filtros presenta ligeramente mayor error que la configuración polo y cero.

En resumen la configuración de suma filtros requiere mayor cantidad de recursos pero permite implementar un mayor rango de integradores fraccionarios con la desventaja que presenta ligeramente mayor error que la configuración polo y cero. Con la información anterior el diseñador ahora es capaz de elegir entre las dos configuraciones dependiendo de sus necesidades y requerimientos. La tarjeta QuadApex v2.0 como se mencionó anteriormente cuenta con 4 FPAA's y administrar los recursos de estas es de vital importancia en el proceso de diseño.

Figura 3.29: Implementación de integrador de orden fraccionario utilizando la aproximación de primer orden configuración suma de filtros.

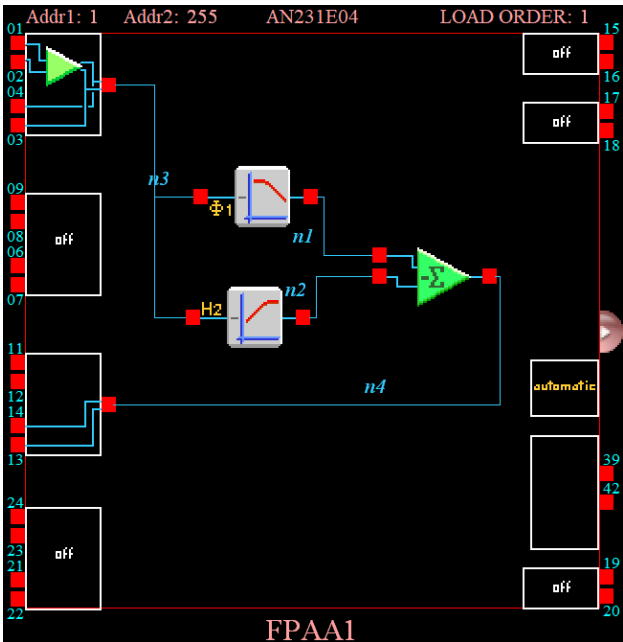


Figura 3.30: Configuración de Clocks: FPAA1 con aproximación de primer orden para implementación con suma de filtros.

Master Clock - ACLK (fc) 16 MHz			
System Clock 1 (sys1 = fc / 1) 16 MHz		System Clock 2 (sys2 = fc / 1) 16 MHz	
Clock 0 (sys1 / 442) 36.199 kHz		Clock 1 (sys1 / 1) 16 MHz	
Clock 2 (sys1 / 8) 2 MHz		Clock 3 (sys1 / 476) 33.613 kHz	
Clock 4 (sys1 / 1) 16 MHz		Clock 5 (sys1 / 1) 16 MHz	

Figura 3.31: Configuración de los CAM con aproximación de primer orden para implementación con suma de filtros.

Name	Options	Parameters	Clocks
FilterBilinear1 (FilterBilinear v1.0.2)  Anadigm (Approved)	Filter Type Low Pass Input Sampling Phase Phase 1 Polarity Inverting Resource Usage Minimum Resources	Corner Frequency [kHz] 0.333 Gain 3.00	ClockA 36.199 kHz (Chip Clock 0)
FilterBilinear2 (FilterBilinear v1.0.2)  Anadigm (Approved)	Filter Type High Pass Resource Usage Minimum Resources	Corner Frequency [kHz] 0.334 Gain 0.333	ClockA 36.199 kHz (Chip Clock 0)
SumInv1 (SumInv v1.0.1)  Anadigm (Approved)	Input 3 Off	Gain 1 (UpperInput) 1.00 Gain 2 (LowerInput) 1.00	ClockA 36.199 kHz (Chip Clock 0)

Figura 3.32: Resultados experimentales de respuesta en frecuencia con $\alpha = 0.5$ configuración de dos filtros y punto suma.

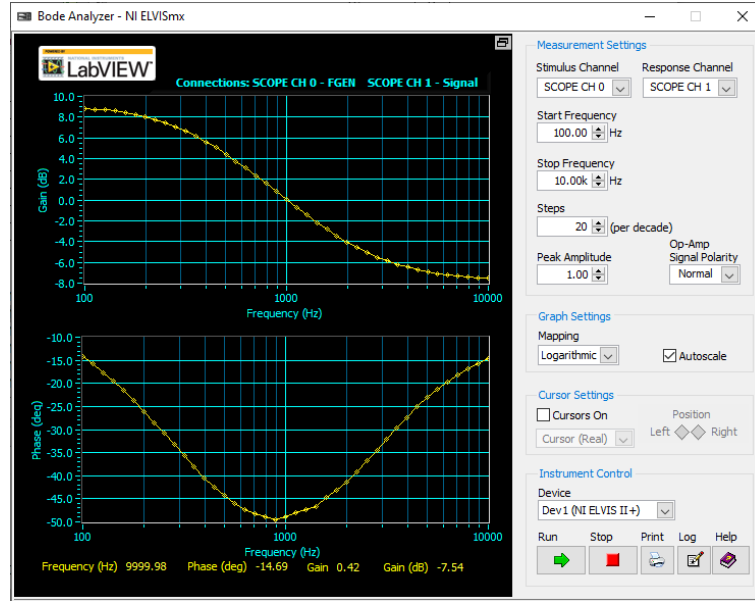
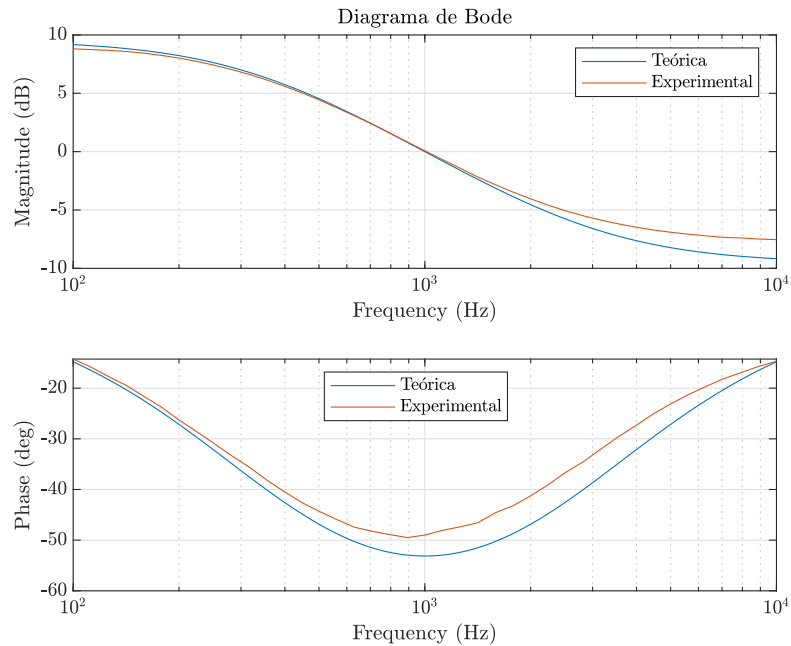


Figura 3.33: Diagrama de Bode de comparativo, respuesta teórica contra experimental configuración de dos filtros y punto suma, $k_f = 2\pi 1000$ y $\alpha = 0.5$.



3.7. Implementación con aproximación de segundo

3.7.1. Filtro bicuadrático configuración polo cero

Para realizar la implementación física de la aproximación de segundo orden se utiliza el CAM **FilterBiquad** en su modo **Polo and Zero**, esto debido a su semejanza con la función de transferencia de la aproximación de la CFE de segundo orden. La función

de transferencia del CAM en este modo es la siguiente:

$$\frac{V_{\text{out}}(s)}{V_{\text{in}}(s)} = - \frac{G_H \left(s^2 + \frac{2\pi f_z}{Q_z} s + 4\pi^2 f_z^2 \right)}{s^2 + \frac{2\pi f_p}{Q_p} s + 4\pi^2 f_p^2} \quad (3.39)$$

donde G_L esta definida como:

$$G_L = G_H \left(\frac{f_z}{f_p} \right)^2 \quad (3.40)$$

y donde G_L es la ganancia en DC, G_H es la ganancia de alta frecuencia, f_p es la frecuencia del polo, f_z es la frecuencia del cero, Q_p es el factor de calidad del polo y Q_z es el factor de calidad del cero. Para cancelar el signo negativo de la ecuación (3.39) se utiliza un CAM con ganancia unitaria inversora (**GainInv**).

La función de transferencia de la aproximación de la CFE de segundo orden, como se mencionó en la sección 2.4 es:

$$\frac{1}{(c_4) s^\alpha} \approx \frac{(\alpha^2 - 3\alpha + 2)s^2 + (8 - 2\alpha^2)s + (\alpha^2 + 3\alpha + 2)}{(\alpha^2 + 3\alpha + 2)s^2 + (8 - 2\alpha^2)s + (\alpha^2 - 3\alpha + 2)} \quad (3.41)$$

si se consideran las siguientes sustituciones:

$$D = \frac{\alpha^2 - 3\alpha + 2}{\alpha^2 + 3\alpha + 2} \quad (3.42)$$

$$C = \frac{8 - 2\alpha^2}{\alpha^2 + 3\alpha + 2} \quad (3.43)$$

se puede reescribir la ecuación (3.41) de la siguiente manera:

$$\frac{1}{(c_4) s^\alpha} \approx \frac{Ds^2 + Cs + 1}{s^2 + Cs + D} \quad (3.44)$$

para aplicar un escalamiento en frecuencia a la ecuación (3.44) se utilizan los siguientes pasos:

1. Cambio de variable compleja por p :

$$N(p) = \frac{Dp^2 + Cp + 1}{p^2 + Cp + D} \quad (3.45)$$

2. Utilizar sustitución $p = \frac{s}{k_f}$:

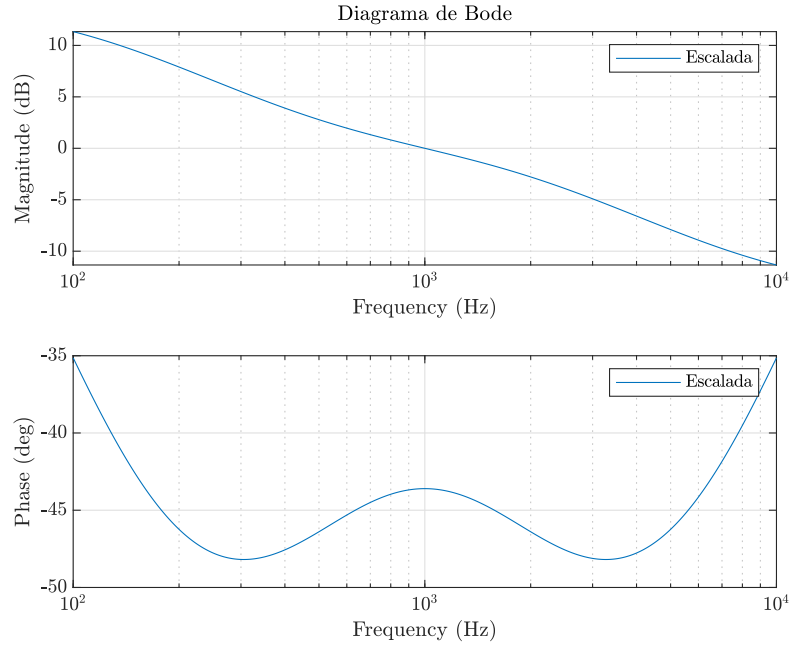
$$N(s) = \frac{D(sk_f^{-1})^2 + Csk_f^{-1} + 1}{(sk_f^{-1})^2 + Csk_f^{-1} + D} \quad (3.46)$$

3. Reescribir de una manera más conveniente:

$$N(s) = \frac{Ds^2 + Ck_f s + k_f^2}{s^2 + Ck_f s + Dk_f^2} \quad (3.47)$$

Si seleccionamos un factor de escalamiento $k_f = 2\pi 1000$ se obtiene la respuesta en frecuencia mostrada en la Figura 3.34. El ancho de banda de la función escalada abarca desde 100 Hz hasta 10 kHz, dos décadas exactas.

Figura 3.34: Diagrama de Bode de ecuación (3.47) para un integrador fraccionario con $k_f = 2\pi 1000$ y $\alpha = 0.5$.



Para poder configurar el CAM FilterBiquad es necesario encontrar los valores correctos para los parámetros G_H , G_L , f_z , f_p , Q_z y Q_p dado un orden α , y esto se logra igualando las ecuaciones 3.39 y 3.47 con el fin de encontrar expresiones para calcularlos.

$$\frac{G_H \left(s^2 + \frac{2\pi f_z}{Q_z} s + 4\pi^2 f_z^2 \right)}{s^2 + \frac{2\pi f_p}{Q_p} s + 4\pi^2 f_p^2} = \frac{Ds^2 + Ck_f s + k_f^2}{s^2 + Ck_f s + Dk_f^2} \quad (3.48)$$

Hay que notar que debido a la estructura matemática del termino del lado derecho de la ecuación (3.48) se tiene que cumplir la siguiente ecuación de restricción:

$$G_H \frac{2\pi f_z}{Q_z} = \frac{2\pi f_p}{Q_p} \Rightarrow G_H \frac{f_z}{Q_z} = \frac{f_p}{Q_p} \quad (3.49)$$

De la ecuación (3.48) se desprenden dos metodologías para el cálculo de los parámetros. La primera consiste en calcular todos los parámetros utilizando únicamente los valores D y C lo que provoca que $Q_z = Q_p$ y surjan las siguientes ecuaciones:

$$G_H = D \quad (3.50)$$

$$f_z = \frac{k_f}{2\pi D^{\frac{1}{2}}} \quad (3.51)$$

$$f_p = \frac{D^{\frac{1}{2}} k_f}{2\pi} \quad (3.52)$$

$$Q_z = \frac{D^{\frac{1}{2}}}{C} \quad (3.53)$$

$$Q_p = \frac{D^{\frac{1}{2}}}{C} \quad (3.54)$$

$$G_L = \frac{1}{D} \quad (3.55)$$

La segunda consiste en elegir manualmente los factores de calidad Q_z y Q_p de modo que $\gamma = \frac{Q_z}{Q_p}$ y surjan las siguientes ecuaciones

$$G_H = D \quad (3.56)$$

$$f_z = \frac{C k_f Q_z}{D 2\pi} \quad (3.57)$$

$$f_p = \frac{C k_f Q_p}{2\pi} \quad (3.58)$$

$$G_L = \frac{\gamma^2}{D} \quad (3.59)$$

Hay que resaltar que la segunda metodología es una generalización de la primera, cuando $Q_z = Q_p$. Se pueden proponer distintos esquemas de diseño, por mencionar alguno, $Q_p = 2Q_z$, sin embargo los parámetros que se pueden ingresar están limitados por la relación que existen entre ellos como se verá a continuación. La ventaja de la segunda metodología es que da mayor libertad al diseñador pero complica mucho los cálculos dependiendo del esquema de diseño que se seleccione.

Los límites absolutos para los valores que pueden ser ingresados para las frecuencias f_z y f_p son $[\frac{F_c}{500}, \frac{F_c}{10}]$. Los límites absolutos para el factor de calidad Q_p son $[0.05, 70.0]$, para Q_z son $[0.05, 60.0]$ y para la ganancia G_L son $[0.01\frac{V}{V}, 100\frac{V}{V}]$ y G_H son $[0.01\frac{V}{V}, 15.9\frac{V}{V}]$. Sin embargo los límites tanto de frecuencia, como de factor de calidad como ganancias también están interrelacionados con los otros valores de los parámetros, lo que puede restringir el rango a menos de sus límites absolutos.

Utilizando la primera metodología y el código del apéndice A.11 podemos generar la Tabla 3.9. Sin embargo hay que notar que no todos los valores de la tabla se pueden implementar. Consideremos el caso de $\alpha = 0.9$, G_L debe ser igual a 109.571429 y el límite absoluto superior para esta ganancia es de $100\frac{V}{V}$ lo cual descarta por completo este valor. Al intentar obtener la gráfica de mérito para la aproximación de segundo orden, ver Figura 3.35, debido a que un pequeño cambio en algún parámetro modifica dramáticamente los rangos de los otros y no se conocen las ecuaciones que relacionan unos parámetros con otros esta resultó ser incorrecta, no obstante nos da una idea de la frecuencia de reloj ideal para generar la mayor cantidad de integradores fraccionarios, en este caso con una $n = 216$ obtenemos la mayor cantidad de integradores.

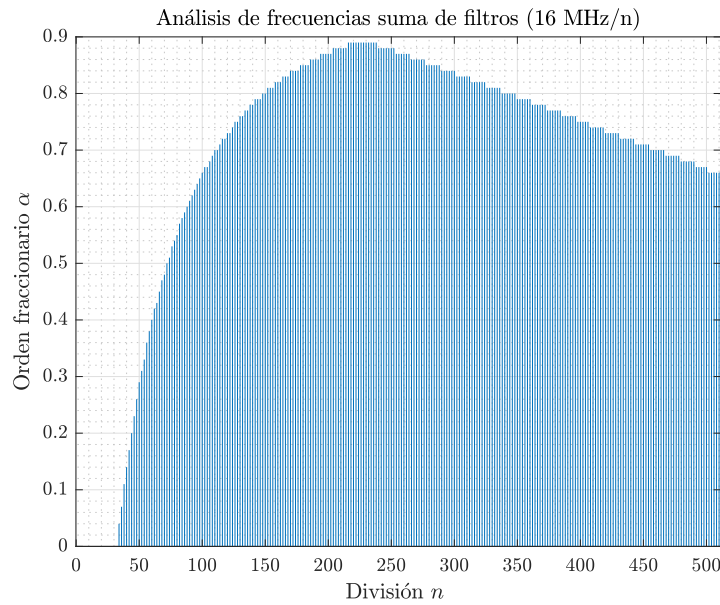
Tabla 3.9: Valores para configurar implementación de segundo orden FilterBiquad de ordenes de 0.1 a 0.95.

α	G_H	G_L	f_z [kHz]	f_p [kHz]	$Q_z = Q_p$
0.10	0.740260	1.350877	1.162272	0.860383	0.249058
0.15	0.635996	1.572337	1.253929	0.797494	0.247870
0.20	0.545455	1.833333	1.354006	0.738549	0.246183
0.25	0.466667	2.142857	1.463850	0.683130	0.243975
0.30	0.397993	2.512605	1.585120	0.630867	0.241214
0.35	0.338061	2.958042	1.719896	0.581431	0.237858
0.40	0.285714	3.500000	1.870829	0.534522	0.233854
0.45	0.239972	4.167155	2.041361	0.489869	0.229132
0.50	0.200000	5.000000	2.236068	0.447214	0.223607
0.55	0.165085	6.057471	2.461193	0.406307	0.217164
0.60	0.134615	7.428571	2.725541	0.366900	0.209657
0.65	0.108062	9.253968	3.042034	0.328727	0.200889
0.70	0.084967	11.769231	3.430631	0.291492	0.190591
0.75	0.064935	15.400000	3.924283	0.254824	0.178377
0.80	0.047619	21.000000	4.582576	0.218218	0.163663
0.85	0.032717	30.565217	5.528582	0.180878	0.145489
0.90	0.019964	50.090909	7.077493	0.141293	0.122026
0.95	0.009126	109.571429	10.467637	0.095533	0.088709

Experimentalmente se probaron diferentes valores de la Tabla 3.9 y se encontró que solo es posible llegar hasta integradores fraccionarios con un α de hasta $\alpha = 0.6$. Es posible que utilizando la segunda metodología con un esquema de diseño propuesto esto pueda mejorar pero debido a que el diseño se basa en encontrar una n que obtenga la

mayor cantidad de integradores y los rangos de los parámetros varían dramáticamente esto se reserva para futuros trabajos.

Figura 3.35: Gráfica de mérito, análisis de orden fraccionario dependiente de n para implementación con CAM FilterBiquad teórica INCORRECTA.



En la Figura 3.36 se muestra el diagrama de implementación en AD2, en la Figura 3.37 la configuración de los relojes y en la Figura 3.38 la configuración de los CAM.

Figura 3.36: Implementación de integrador de orden fraccionario utilizando la aproximación de segundo orden.

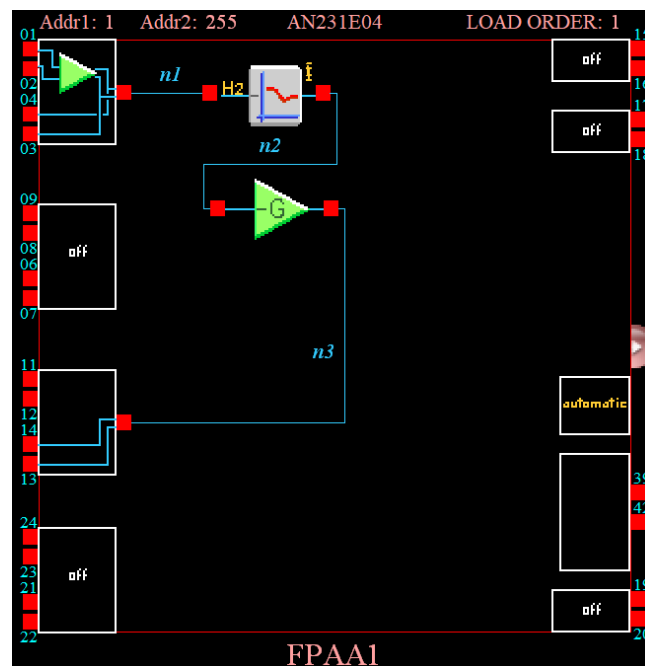


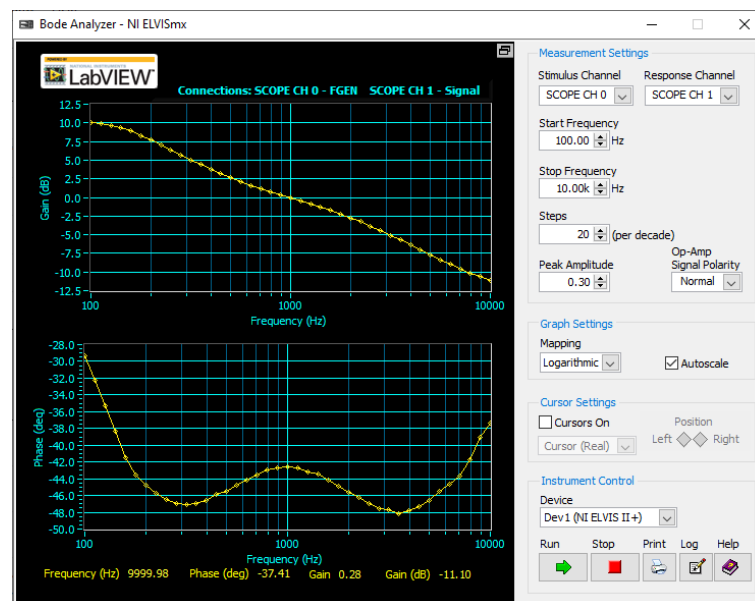
Figura 3.37: Configuración de Clocks: FPAA1 con aproximación de segundo orden.

Master Clock - ACLK (fc)	16 MHz		
System Clock 1 (sys1 = fc / 1)	16 MHz	System Clock 2 (sys2 = fc / 1)	16 MHz
Clock 0 (sys1 / 216)	74.074 kHz	Clock 1 (sys1 / 1)	16 MHz
Clock 2 (sys1 / 8)	2 MHz	Clock 3 (sys1 / 64)	250 kHz
Clock 4 (sys1 / 1)	16 MHz	Clock 5 (sys1 / 1)	16 MHz

Figura 3.38: Configuración de los CAM con aproximación de segundo orden.

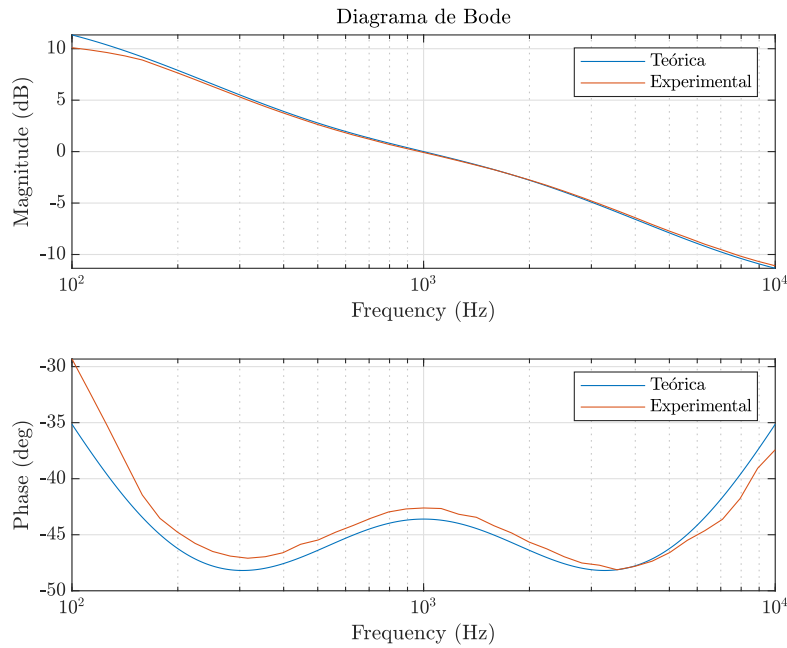
Name	Options	Parameters	Clocks
FilterBiquad1 (FilterBiquad v1.0.2)  Anadigm (Approved)	Filter Type Pole and Zero Automatic Variable DC Gain	Pole Frequency [kHz] 0.462 Pole Quality Factor 0.224 Zero Frequency [kHz] 2.20 Zero Quality Factor 0.225 DC Gain 4.80 High Frequency Gain 0.211	ClockA 74.074 kHz (Chip Clock 0)
GainInv1 (GainInv v1.0.1)  Anadigm (Approved)		Gain 1.00	ClockA 74.074 kHz (Chip Clock 0)

Utilizando la NI ELVIS II+ se obtuvo la respuesta en frecuencia mostrada en la Figura 3.39. La respuesta obtenida coincide con el análisis teórico realizado y presenta un error muy pequeño. En la Figura 3.40 se muestra la comparación entre el resultado experimental y el teórico.

Figura 3.39: Resultados experimentales de respuesta en frecuencia con $\alpha = 0.5$.

En secciones anteriores se analizó el error que presenta la CFE para la aproximación de segundo orden y se comprobó que utilizar una aproximación de segundo orden resulta provechoso únicamente para valores pequeños de α por lo que no resulta muy

Figura 3.40: Diagrama de Bode de comparativo, respuesta teórica contra experimental, $k_f = 2\pi 1000$ y $\alpha = 0.5$.



problemático que la configuración bicuadrática solo llegue hasta $\alpha = 0.6$. En la Tabla 3.10 se analizan las ventajas y desventajas de cada una de las configuración estudiadas anteriormente.

Tabla 3.10: Resumen de configuraciones para aproximación de integradores fraccionarios utilizando la CFE.

Configuración	Rango α	Ventajas	Desventajas
Bilineal polo y cero	[0.01, 0.81]	Consume pocos recursos. Facilidad de implementación. Proceso de diseño sencillo.	Mayor error para α grande. Menor rango.
Bilineal LP y HP	[0.01, 0.93]	Mayor rango. Ajuste de ganancia flexible. Proceso de diseño sencillo.	Consume más recursos. Mayor error que configuración polo y cero.
Bicuadrático	[0.01, 0.6]	Menor error. Oportunidad de nuevos esquemas de diseño.	Proceso de diseño complejo. Menor rango.

Capítulo 4

Oscilador caótico utilizando integradores de orden fraccionario

4.1. Oscilador caótico basado en funciones no lineales saturadas (SNLF)

Un oscilador caótico basado en funciones no lineales saturadas (SNLF) puede ser descrito por el siguiente sistema de ecuaciones diferenciales:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= y \\ \dot{y} &= z \\ \dot{z} &= -ax - by - cz + hf(x)\end{aligned}\tag{4.1}$$

donde a, b, c y h son coeficientes reales positivos propuestos, con valores en el intervalo $[0, 1]$. $f(x)$ es una función lineal a trozos conocida como desestabilizadora o función saturada

El sistema presenta un comportamiento dinámico no lineal gracias a la función saturada desestabilizante $f(x)$. El propósito de dicha función es retroalimentar al sistema y mantenerlo oscilando sin necesidad de una variable de entrada extra en el sistema. Además, esta función desestabilizante es la causante del comportamiento caótico del sistema. La SNLF puede ser descrita mediante una función PWL (PieceWise Linear) cuya forma dependerá del número de enrollamientos requeridos en el sistema caótico.

4.2. Función deestabilizadora

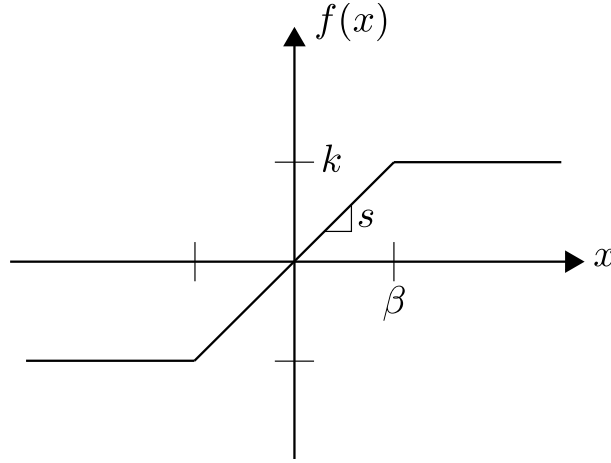
El oscilador caótico basado en SNLF descrito en la ecuación (4.1) tiene su función saturación expresada como:

$$f(x) = \begin{cases} k & \text{si } x > \beta \\ sx & \text{si } -\beta \leq x \leq \beta \\ -k & \text{si } x < -\beta \end{cases} \quad (4.2)$$

donde el parámetro k representa la saturación del sistema, β es el punto de quiebre en la función y s es la pendiente entre tramos, en el apéndice A.12 se muestra una función de MATLAB que realiza esta función.

Estas funciones pueden generar n cantidad de enrollamientos con la adecuada descripción matemática, en la Figura 4.1 se muestra la representación gráfica de la función saturación.

Figura 4.1: Función no lineal saturada de dos enrollamientos.

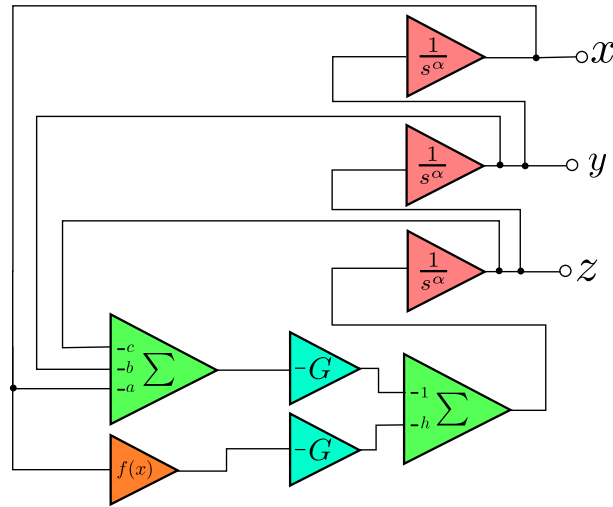


4.3. Variables de estado del oscilador en orden fraccionario

Para pasar el sistema de la ecuación (4.1) a orden fraccionario basta con modificarlo de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} {}_0D_t^\alpha x &= y \\ {}_0D_t^\alpha y &= z \\ {}_0D_t^\alpha z &= -ax - by - cz + hf(x) \end{aligned} \quad (4.3)$$

Las derivadas de orden entero en el sistema de ecuaciones diferenciales acopadas se reemplazan por derivadas de orden fraccionario. El sistema de la ecuación (4.3) se puede solucionar utilizando el diagrama a bloques de la Figura 4.2.

Figura 4.2: Solución de sistema de orden fraccionario de la ecuación (4.3).

4.4. Implementación en FPAA

La implementación del oscilador caótico (SNLF) con integradores de orden fraccionario requiere de los 4 FPAA (es necesario colocar los jumpers J8, J9, J10 y ACT1,2,3,4) con los que cuenta la tarjeta. Se optimizó de manera que utilizara la menor cantidad de conexiones externas y se distribuyeron los CAM de modo que fuera sencillo modificar los integradores fraccionarios entre sus distintas aproximaciones o dicho de manera más precisa, entre sus distintas topologías.

Para poder realizar las mediciones físicas es necesario utilizar los filtros Rauch que se mencionaron en la sección 3.2.6 (activar los DIP switches S13 y S12), esto debido a la necesidad de convertir la señal diferencial con que trabaja la FPAA por una single-ended. De mismo modo para interconectar las FPAA es necesario realizar las conexiones físicas sobre la tarjeta, esto se logra activando diversos DIP switches según convenga, en la Tabla 4.1 se resumen las conexiones físicas que se tienen que realizar sobre la tarjeta.

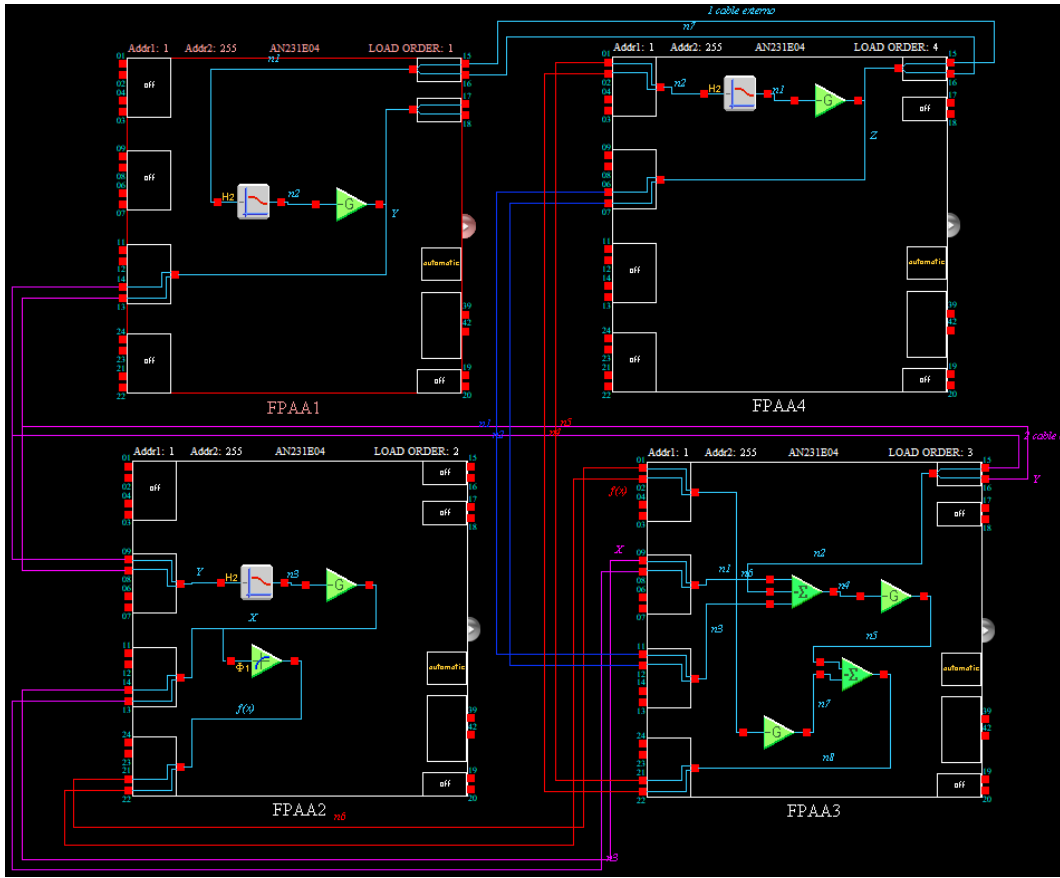
Tabla 4.1: Conexiones de DIP switches, jumpers y cables externos.

Switch	Jumper	Cables externos
S3	2 ↓	J8
S5	2 ↓	J9
S4	2 ↑	J10
S6	2 ↑	ACT1
S7	2 ↑	ACT2
S12		ACT3
S13		ACT4

4.4.1. Configuración bilineal polo y cero

En la Figura 4.3 se presenta el diseño final del oscilador caótico (SNLF) implementado en la tarjeta utilizando la configuración bilineal polo y cero con un orden $\alpha = 0.8$ y con las constantes $a = 4$, $b = 0.7$, $c = 0.7$ y $h = 4$. La función de saturación se propuso con los parámetros $k = 2$, $s = 1$ y $\beta = 1.5$ dando como resultado el comportamiento mostrado en la Figura 4.9. Es necesario generar la lookup table utilizando los códigos de los apéndices A.12 y A.3.

Figura 4.3: Diagrama de implementación en AD2 configuración bilineal polo y cero.



Los 4 FPAA se configuraron con las mismas frecuencias de reloj las cuales se muestran en la Figura 4.4. Hay que recordar que para $\alpha = 0.8$ los valores para el integrador con aproximación bilineal polo y cero son los siguientes:

Tabla 4.2: Valores para configurar un filtro bilineal como integrador de orden fraccionario con $\alpha = 0.8$.

α	f_p [kHz]	f_z [kHz]	G_L	G_H
0.80	0.111111	9.000000	9.000000	0.111111

En las Figuras 4.5, 4.6, 4.7, 4.8 se muestran las configuraciones de los CAM desde la FPAA1 hasta la 4.

Figura 4.4: Configuración de clocks de todos los FPAA.

Master Clock - ACLK (fc) 16 MHz		
System Clock 1 (sys1 = fc / 1)	16 MHz	System Clock 2 (sys2 = fc / 1) 16 MHz
Clock 0 (sys1 / 160)	100 kHz	Clock 1 (sys1 / 10) 1.6 MHz
Clock 2 (sys1 / 8)	2 MHz	Clock 3 (sys1 / 64) 250 kHz
Clock 4 (sys1 / 1)	16 MHz	Clock 5 (sys1 / 1) 16 MHz

Figura 4.5: Configuración de los CAM de FPAA1.

Name	Options	Parameters	Clocks
FilterBilinear2 (FilterBilinear v1.0.2)  Anadigm (Approved)	Filter Type Pole and Zero Automatic Variable DC Gain Resource Usage Minimum Resources	Pole Frequency [kHz] 0.111 Zero Frequency [kHz] 8.99 DC Gain 9.00 High Frequency Gain 0.108	ClockA 100 kHz (Chip Clock 0)
GainInv2 (GainInv v1.0.1)  Anadigm (Approved)		Gain 1.00	ClockA 100 kHz (Chip Clock 0)

Figura 4.6: Configuración de los CAM de FPAA2.

Name	Options	Parameters	Clocks
TransferFunction1 (TransferFunction v1.0.1)  Anadigm (Approved)	Output Hold On		ClockA 100 kHz (Chip Clock 0) ClockB 1.6 MHz (Chip Clock 1)
FilterBilinear3 (FilterBilinear v1.0.2)  Anadigm (Approved)	Filter Type Pole and Zero Automatic Variable DC Gain Resource Usage Minimum Resources	Pole Frequency [kHz] 0.111 Zero Frequency [kHz] 8.99 DC Gain 9.00 High Frequency Gain 0.108	ClockA 100 kHz (Chip Clock 0)
GainInv3 (GainInv v1.0.1)  Anadigm (Approved)		Gain 1.00	ClockA 100 kHz (Chip Clock 0)

El comportamiento del oscilador depende directamente de los valores de los parámetros que se eligieron, la función de saturación y el orden fraccionario. Si se modifica ligeramente la función de saturación el sistema pierde su capacidad de oscilar, lo mismo ocurre si se modifica alguno de los parámetros del sistema.

En las Figuras 4.10 y 4.11 se muestran los resultados experimentales. En la primera se muestran los planos de fase o atractores del sistema y en la segunda la respuesta en el dominio temporal de cada una de estas.

4.4.2. Configuración bilineal suma de filtros

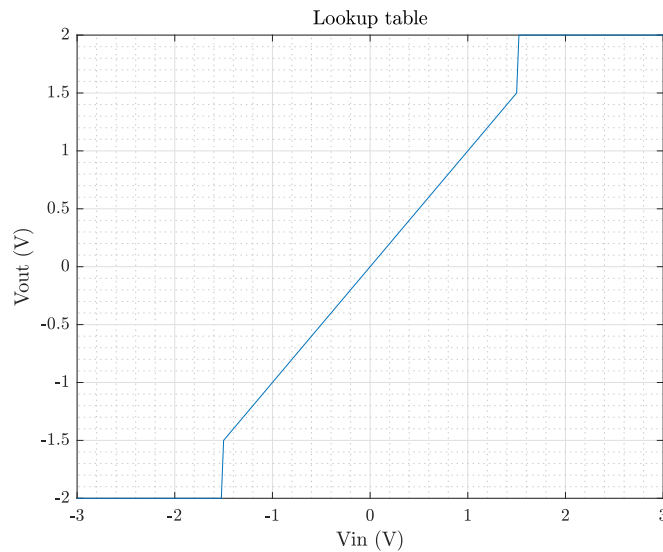
En la Figura 4.12 se presenta el diseño final del oscilador caótico (SNLF) implementado en la tarjeta utilizando la configuración bilineal suma de filtros con un orden

Figura 4.7: Configuración de los CAM de FPAA3.

Name	Options	Parameters	Clocks
SumInv1 (SumInv v1.0.1)  <i>Anadigm (Approved)</i>	Input 3 <i>On</i>	Gain 1 (UpperInput) 4.00 Gain 2 (MiddleInput) 0.700 Gain 3 (LowerInput) 0.700	ClockA 100 kHz (Chip Clock 0)
SumInv2 (SumInv v1.0.1)  <i>Anadigm (Approved)</i>	Input 3 <i>Off</i>	Gain 1 (UpperInput) 1.00 Gain 2 (LowerInput) 4.00	ClockA 100 kHz (Chip Clock 0)
GainInv2 (GainInv v1.0.1)  <i>Anadigm (Approved)</i>		Gain 1.00	ClockA 100 kHz (Chip Clock 0)
GainInv4 (GainInv v1.0.1)  <i>Anadigm (Approved)</i>		Gain 1.00	ClockA 100 kHz (Chip Clock 0)

Figura 4.8: Configuración de los CAM de FPAA4.

Name	Options	Parameters	Clocks
FilterBilinear2 (FilterBilinear v1.0.2)  <i>Anadigm (Approved)</i>	Filter Type Pole and Zero Automatic Variable DC Gain Resource Usage Minimum Resources	Pole Frequency [kHz] 0.111 Zero Frequency [kHz] 8.99 DC Gain 9.00 High Frequency Gain 0.108	ClockA 100 kHz (Chip Clock 0)
GainInv2 (GainInv v1.0.1)  <i>Anadigm (Approved)</i>		Gain 1.00	ClockA 100 kHz (Chip Clock 0)

Figura 4.9: Función de saturación $k = 2$, $s = 1$ y $\beta = 1.5$.

$\alpha = 0.9$ y con las constantes $a = 4$, $b = 0.7$, $c = 0.7$ y $h = 4$.

Los 4 FPAA se configuraron con las mismas frecuencias de reloj las cuales se mues-

Figura 4.10: Vistas de plano fase del comportamiento del oscilador caótico con $\alpha = 0.8$ y dos enrollamientos.

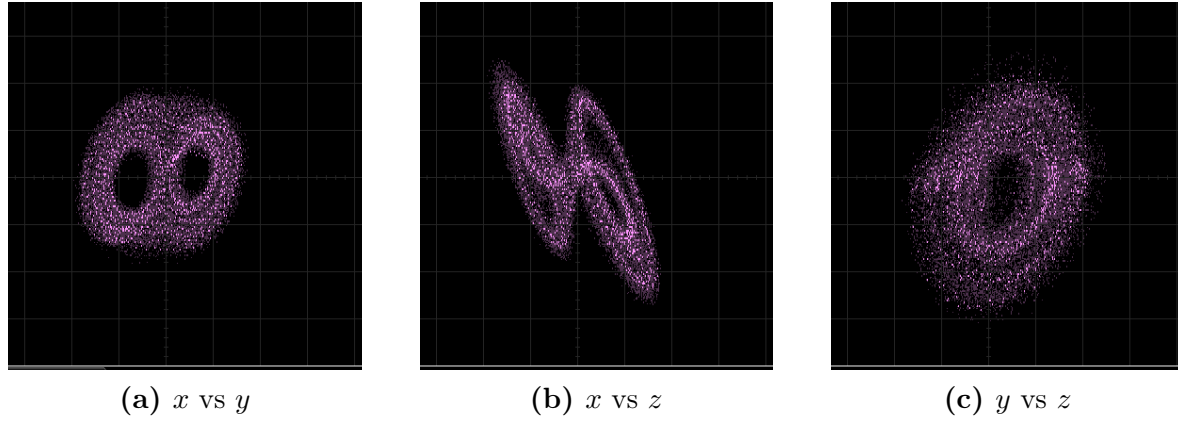
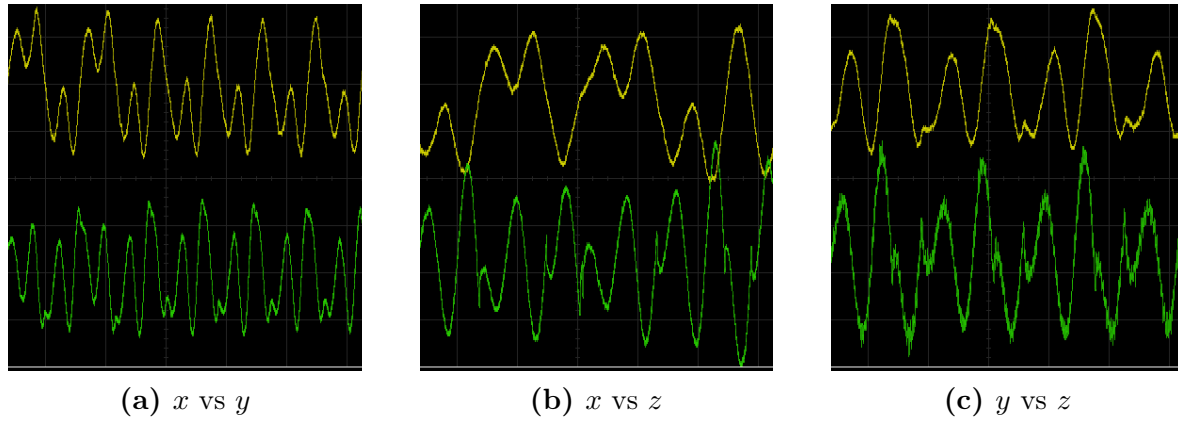


Figura 4.11: Respuesta en el dominio temporal de oscilador caótico con $\alpha = 0.8$ y dos enrollamientos.



tran en la Figura 4.13. Hay que recordar que para $\alpha = 0.9$ los valores para el integrador con aproximación bilineal suma de filtros son los siguientes:

Tabla 4.3: Valores para configurar implementación suma de pasabajas y paaltas de ordenes de 0.1 a 0.95.

α	G_1 [LP]	G_2 [HP]	f_0 [kHz]
0.90	19.000000	0.052632	0.052632

En las Figuras 4.14, 4.15, 4.16, 4.17 se muestran las configuraciones de los CAM desde la FPAA1 hasta la 4.

En las Figuras 4.18 y 4.19 se muestran los resultados experimentales. En la primera se muestran los planos de fase o atractores del sistema y en la segunda la respuesta en el dominio temporal de cada una de estas.

Figura 4.12: Diagrama de implementación en AD2 configuración bilineal suma de filtros.

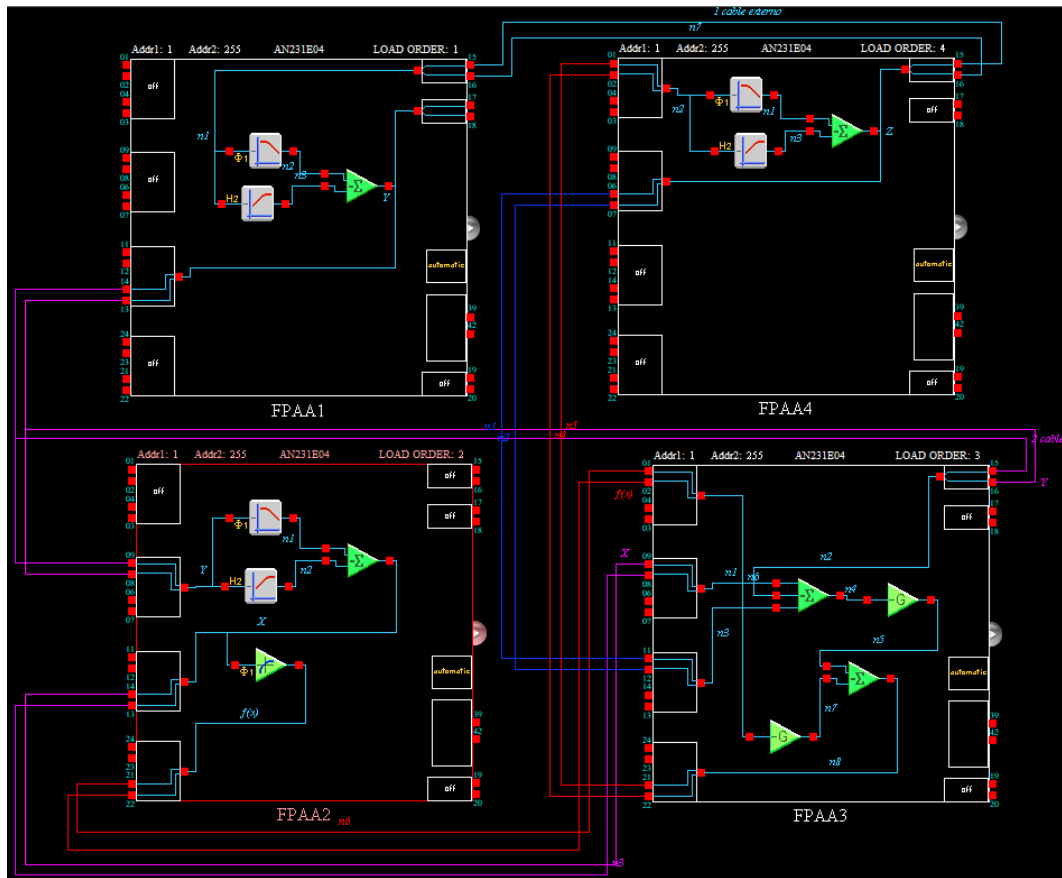


Figura 4.13: Configuración de clocks de todos los FPAA.

Master Clock - ACLK (fc)	16 MHz	
System Clock 1 (sys1 = fc / 1)	16 MHz	System Clock 2 (sys2 = fc / 1) 16 MHz
Clock 0 (sys1 / 320)	50 kHz	Clock 1 (sys1 / 20) 800 kHz
Clock 2 (sys1 / 8)	2 MHz	Clock 3 (sys1 / 64) 250 kHz
Clock 4 (sys1 / 1)	16 MHz	Clock 5 (sys1 / 1) 16 MHz

Figura 4.14: Configuración de los CAM de FPAA1.

Name	Options	Parameters	Clocks
FilterBilinear2 (FilterBilinear v1.0.2)	Filter Type High Pass Resource Usage Minimum Resources	Corner Frequency [kHz] 0.0525 Gain 0.0528	ClockA 50 kHz (Chip Clock 0)
 Anadigm (Approved)			
FilterBilinear3 (FilterBilinear v1.0.2)	Filter Type Low Pass Input Sampling Phase Phase 1 Polarity Inverting Resource Usage Minimum Resources	Corner Frequency [kHz] 0.0525 Gain 19.0	ClockA 50 kHz (Chip Clock 0)
 Anadigm (Approved)			
SumInv1 (SumInv v1.0.1)	Input 3 Off	Gain 1 (UpperInput) 1.00 Gain 2 (LowerInput) 1.00	ClockA 50 kHz (Chip Clock 0)
 Anadigm (Approved)			

Figura 4.15: Configuración de los CAM de FPAA2.

Name	Options	Parameters	Clocks
TransferFunction1 (TransferFunction v1.0.1)  Anadigm (Approved)	Output Hold <i>On</i>		ClockA <i>50 kHz (Chip Clock 0)</i> ClockB <i>800 kHz (Chip Clock 1)</i>
FilterBilinear3 (FilterBilinear v1.0.2)  Anadigm (Approved)	Filter Type <i>High Pass</i> Resource Usage <i>Minimum Resources</i>	Corner Frequency [kHz] <i>0.0525</i> Gain <i>0.0528</i>	ClockA <i>50 kHz (Chip Clock 0)</i>
FilterBilinear4 (FilterBilinear v1.0.2)  Anadigm (Approved)	Filter Type <i>Low Pass</i> Input Sampling Phase <i>Phase 1</i> Polarity <i>Inverting</i> Resource Usage <i>Minimum Resources</i>	Corner Frequency [kHz] <i>0.0525</i> Gain <i>19.0</i>	ClockA <i>50 kHz (Chip Clock 0)</i>
SumInv1 (SumInv v1.0.1)  Anadigm (Approved)	Input 3 <i>Off</i>	Gain 1 (UpperInput) <i>1.00</i> Gain 2 (LowerInput) <i>1.00</i>	ClockA <i>50 kHz (Chip Clock 0)</i>

Figura 4.16: Configuración de los CAM de FPAA3.

Name	Options	Parameters	Clocks
SumInv1 (SumInv v1.0.1)  Anadigm (Approved)	Input 3 <i>On</i>	Gain 1 (UpperInput) <i>4.00</i> Gain 2 (MiddleInput) <i>0.700</i> Gain 3 (LowerInput) <i>0.700</i>	ClockA <i>50 kHz (Chip Clock 0)</i>
SumInv2 (SumInv v1.0.1)  Anadigm (Approved)	Input 3 <i>Off</i>	Gain 1 (UpperInput) <i>1.00</i> Gain 2 (LowerInput) <i>4.00</i>	ClockA <i>50 kHz (Chip Clock 0)</i>
GainInv2 (GainInv v1.0.1)  Anadigm (Approved)		Gain <i>1.00</i>	ClockA <i>50 kHz (Chip Clock 0)</i>
GainInv4 (GainInv v1.0.1)  Anadigm (Approved)		Gain <i>1.00</i>	ClockA <i>50 kHz (Chip Clock 0)</i>

Figura 4.17: Configuración de los CAM de FPAA4.

Name	Options	Parameters	Clocks
FilterBilinear2 (FilterBilinear v1.0.2)  Anadigm (Approved)	Filter Type <i>Low Pass</i> Input Sampling Phase <i>Phase 1</i> Polarity <i>Inverting</i> Resource Usage <i>Minimum Resources</i>	Corner Frequency [kHz] <i>0.0525</i> Gain <i>19.0</i>	ClockA <i>50 kHz (Chip Clock 0)</i>
FilterBilinear3 (FilterBilinear v1.0.2)  Anadigm (Approved)	Filter Type <i>High Pass</i> Resource Usage <i>Minimum Resources</i>	Corner Frequency [kHz] <i>0.0525</i> Gain <i>0.0528</i>	ClockA <i>50 kHz (Chip Clock 0)</i>
SumInv1 (SumInv v1.0.1)  Anadigm (Approved)	Input 3 <i>Off</i>	Gain 1 (UpperInput) <i>1.00</i> Gain 2 (LowerInput) <i>1.00</i>	ClockA <i>50 kHz (Chip Clock 0)</i>

Figura 4.18: Vistas de plano fase del comportamiento del oscilador caótico con $\alpha = 0.8$ y dos enrollamientos.

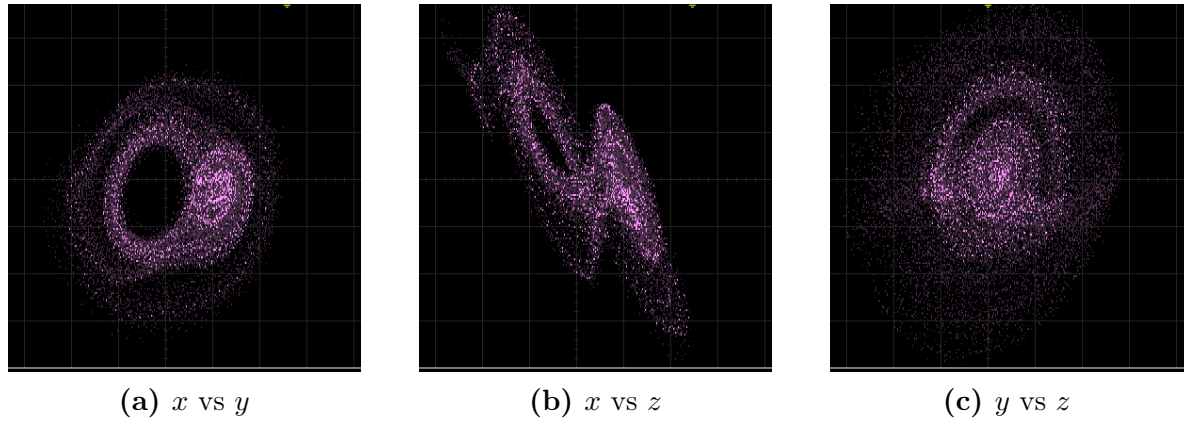
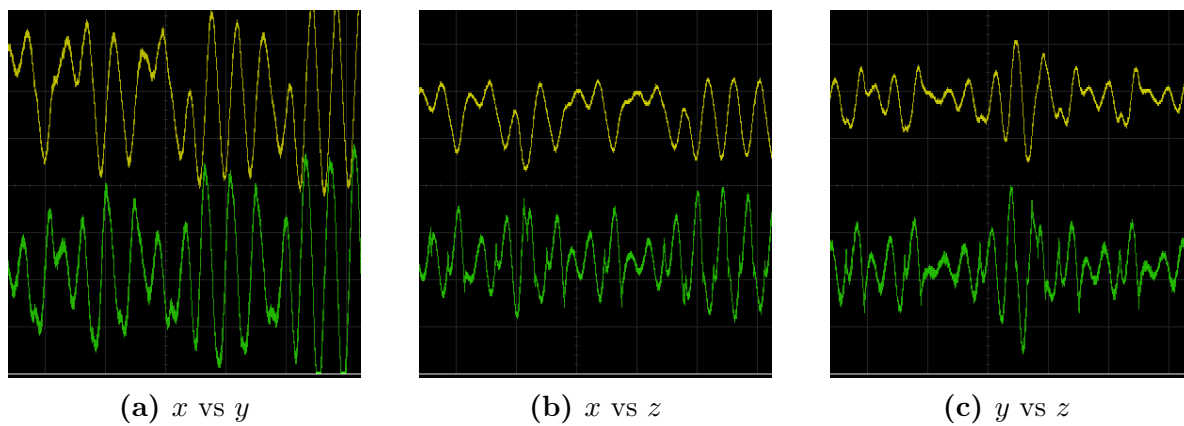


Figura 4.19: Respuesta en el dominio temporal de oscilador caótico con $\alpha = 0.8$ y dos enrollamientos.



Capítulo 5

Conclusiones

En este trabajo de tesis se analizaron tres topologías para diseñar integradores de orden fraccionario utilizando la expansión de fracciones continuas y tarjeta QuadApex v2.0. La primera consistió en utilizar un filtro bilineal el cual al ser configurado en su forma polo y cero permitió implementar integradores con ordenes dentro del rango $[0.1, 0.81]$, ordenes superiores no son posibles de implementar debido a las restricciones que presenta el hardware en cuanto a la frecuencia de reloj. La segunda consistió en combinar dos filtros, un pasabajas y un pasaaltas en una configuración de suma, esta topología permitió llegar a rangos de $[0.01, 0.93]$, con la desventaja de presentar ligeramente mayor error en la implementación con respecto a la topología de filtro bilineal. Esta topología es la más versátil debido a que el rango es mayor y su metodología de diseño es sencilla. La topología bicuadrática presenta menor error, sin embargo el rango de ordenes es muy pequeño bajo el esquema propuesto de factor de calidad dependiente, de $[0.01, 0.6]$, esto lo hace poco útil para la mayoría de aplicaciones, no obstante es una topología que aun puede estudiarse y desarrollar a futuro diversos esquemas que pueden mejorar su rendimiento.

Hacer implementaciones utilizando un mayor número de convergentes en la expansión de fracciones continuas no tiene sentido, esto debido a que la mejora no es significativa y cuando se habla de una en FPAA el manejo de recursos es fundamental y no se puede dar el lujo de desperdiciarlos. Del capítulo dos vale resaltar que se descubrió que **el porcentaje de error es mayor cuánto más pequeño sea α** .

La implementación del oscilador caótico fue compleja en el sentido de tener que adaptarse a las condiciones del hardware, lo que puede funcionar a nivel simulación no siempre funciona a nivel experimental y esto es aun más cierto teniendo en cuenta que los integradores de orden fraccionario que se utilizaron son aproximados. Aún teniendo en cuenta lo anterior es simplemente increíble ver en funcionamiento este tipo de sistemas y el esfuerzo se ve recomenzado al ver en carne propia estos fenómenos.

De este trabajo se rescata que puede ser utilizado como literatura para el aprendizaje de las FPAA, el uso correcto del dispositivo NI ELVIS II para la generación experimental

de diagramas de Bode y metodologías de diseño para integradores de orden fraccionario.

Para trabajos futuros se puede considerar utilizar las metodologías presentadas aquí para:

1. Explorar la topología de segundo orden y probar esquemas de diseño que mejoren su rendimiento.
2. Diseñar sistemas de control de orden fraccionario e implementarlos utilizando la FPAA.
3. Implementar osciladores caóticos de orden fraccionario para su utilización en aplicaciones.

Apéndice A

Códigos

```
1 % Convertir sym a funcion de transferencia
2 function R = syms2tf(G)
3     [symNum,symDen] = numden(G); % Obtener num y den funcion simbolica
4     TFnum = sym2poly(symNum);    % Convertir num sym a polinomio
5     TFden = sym2poly(symDen);    % Convertir den sym a polinomio
6     R = tf(TFnum,TFden);         % Generar funcion de transferencia
7 end
```

Código A.1: Función syms2tf

```
1 function R = cfetf(alfa,n)
2 % Calcula la aproximacion utilizando CFE de un integrador fraccional
3 % 1/s^(alfa)
4 %     R = cfetf(alfa,n)
5 %     alfa: es el orden del integrador
6 %     n : es el numero de terminos de la aproximacion
7     syms s x;
8     eqns = sym(zeros(n,1));
9     for i=n:-1:2
10         if i == n
11             eqns(i) = 1 + n_term_cfe(i,alfa)*x;
12         else
13             eqns(i) = 1 + (n_term_cfe(i,alfa)*x)/eqns(i+1);
14         end
15     end
16     eqns(1) = 1/(1 - (alfa*x/eqns(2)));
17     derivate = simplify(subs(eqns(1),x,s-1));
18     integrator = collect(1/derivate);
19     sys = syms2tf(integrator);
20 %     pretty(integrator);
21     R = sys;
22 end
23 %% Funciones
24 function R = psi_cfe(x)
25     R = floor(x/2);
26 end
27
28 function R = n_term_cfe(n,k)
29     R = ( psi_cfe(n) * ( psi_cfe(n) + k*(-1)^n ) )/( (n-1)*(n));
30 end
```

Código A.2: Función cfetf

```

1 %% Lookup Table
2 paso = 6/256;
3 Vin = (-3:paso:3);
4 % w = 10;
5 % Vout = 2*sinc((w/pi)*Vin);
6 % k,s,beta,x
7 Vout = saturation_cust(1,0.7,0.1,Vin);
8 data = Vout(1:end-1)';
9 %% Escribir a archivo de Excel CSV
10 csvwrite('Lookup22.csv',data);
11 %% Ver grafica
12 plot(Vin,Vout);
13 grid on;
14 grid minor;
15 ylabel('$\mathrm{Vout}$ (V)', 'interpreter','latex');
16 xlabel('$\mathrm{Vin}$ (V)', 'interpreter','latex');
17 set(gca, 'TickLabelInterpreter','latex');
18 title('Lookup table', 'interpreter','latex');

```

Código A.3: Generar lookup table

```

1 * Simulacion de filtro pasabajas activo
2 V1 V+ 0 15
3 V2 V- 0 -15
4 V3 Vin 0 AC 1
5 XU1 0 Vn V+ V- Vout TL081
6 R1 Vn Vin 8.2k
7 C1 Vout Vn 1n
8 R2 Vout Vn 8.2k
9 .inc TL081.301
10 .ac dec 1000 1000 10MEG
11 .backanno
12 .end

```

Código A.4: Simulación spice pasabajas

```

1 %% Bode pasabajas
2 clear all;
3 close all;
4 clc;
5
6 %% Funcion de transferencia
7 text = 'Frequency (Hz)';
8 Rf = 8.2e3;
9 Ri = 8.2e3;
10 C = 1e-9;
11 wo = 1/(Rf*C);
12 k = Rf/Ri;
13
14 %% Cargar datos simulacion
15 data_sim = load('pasa_bajas.txt');
16 wout_sim = data_sim(:,1);
17 mag_sim = data_sim(:,2);
18 phase_sim = data_sim(:,3);
19
20 %% Cargar datos experimentales
21 data_exp = load('elvis.txt');
22 wout_exp = data_exp(:,1);

```

```

23 mag_exp = data_exp(:,2);
24 phase_exp = data_exp(:,3);
25
26 num = -k*wo;
27 den = [1 wo];
28 sys = tf(num,den);
29 w = 2*pi*logspace(3,7,500);
30 [mag, phase, wout] = bode(sys,w);
31 wout = wout / (2*pi);
32
33 subplot(2,1,1)
34 semilogx(wout,20*log10(mag(:)), 'DisplayName', 'Ideal');
35 hold on;
36 semilogx(wout_sim,mag_sim, 'DisplayName', 'Simulaci\'on');
37 semilogx(wout_exp,mag_exp, 'DisplayName', 'Experimental');
38 xlabel(text, 'interpreter', 'latex');
39 ylabel('Magnitud (dB)', 'interpreter', 'latex');
40 grid on;
41 axis([1e3 1e7 -60 10]);
42 set(gca, 'TickLabelInterpreter', 'latex');
43 legend('interpreter', 'latex');
44
45 subplot(2,1,2)
46 semilogx(wout,phase(:), 'DisplayName', 'Ideal');
47 hold on;
48 semilogx(wout_sim,phase_sim, 'DisplayName', 'Simulaci\'on');
49 semilogx(wout_exp,phase_exp, 'DisplayName', 'Experimental');
50 xlabel(text, 'interpreter', 'latex');
51 ylabel('Fase (deg)', 'interpreter', 'latex');
52 grid on;
53 set(gca, 'TickLabelInterpreter', 'latex');
54 legend('interpreter', 'latex');

```

Código A.5: Diagramas de Bode comparativos ideal vs spice vs experimental

```

1 %% Clear subroutine
2 clear all;
3 close all;
4 clc;
5 %%
6 paso = 0.05;
7 alpha = (0.1:paso:0.95)';           % Orden del integrador
8 kf = 2*pi*1000;                       % Factor de escalamiento
9 A = (1 - alpha)./(1 + alpha);
10 Gh = A;                               % Ganancia de alta frecuencia
11 Gl = 1./A;                            % Ganancia de baja frecuencia
12 fp = (A*kf)./(2*pi*1000);             % Frecuencia de polo en kHz
13 fz = (kf)./(A*2*pi*1000);             % Frecuencia de zero en kHz
14 T = table(alpha,fp,fz,Gl,Gh);
15 disp(T);
16
17 %% Latex table
18 T_latex.data = table(alpha,fp,fz,Gl,Gh);
19 T_latex.dataFormat = {' %1.2f', 1, ' %6f', 4};
20 % disp(T_latex.data);
21 latex = latexTable(T_latex);

```

Código A.6: A10_calculo_valores_FilterBilinear

```

1 %% Clean subroutine
2 clear all;
3 close all;
4 clc;
5 format short;
6 %%
7 sys1 = 16e6;                % 16 MHz
8 n = [1, ( 2:2:510)];
9 freq = ((sys1./n)/1000)';    % en kHz
10 freq_min = freq/1000;
11 freq_max = freq/10;
12 T = table(freq, n', freq_min, freq_max);
13 disp(T);

```

Código A.7: A11_rango_de_frecuencias_absolutas_FilterBilinear

```

1 %% Clean subroutine
2 clear all;
3 close all;
4 clc;
5 format short;
6 %% Calcular fp y fz
7 paso = 0.01;
8 alpha = (paso:paso:0.99)';    % Orden fraccionario
9 kf = 2*pi*1000;                % Factor de escalamiento
10 A = (1 - alpha)./(1 + alpha);
11 fp = (A*kf)./(2*pi*1000);      % Frecuencia de polo en kHz
12 fz = (kf)./(A*2*pi*1000);      % Frecuencia de cero en kHz
13
14 %% Rango de frecuencias absolutasAinz
15 sys1 = 16e6;                % 16 MHz
16 n = [1, ( 2:2:510)];        % n
17 freqs = ((sys1./n)/1000)';    % in kHz
18 freq_min = freqs/1000;
19 freq_max = freqs/10;
20 %%
21 vv = zeros(size(freqs,1),9);    % Matriz binaria de verdad
22 for i=1:size(freqs,1)          % Frecuencias
23     for j=1:size(alpha,1)      % Ordenes
24         cond1 = fp(j) >= freq_min(i) && fp(j) <= freq_max(i);
25         cond2 = fz(j) >= freq_min(i) && fz(j) <= freq_max(i);
26         if cond1 && cond2
27             vv(i,j) = 1;
28         else
29             vv(i,j) = 0;
30         end
31     end
32 end
33 R = [freqs freq_min freq_max vv];
34 % csvwrite('Analisis.csv',R);
35 %%
36 T = sum(vv,2);                % Suma horizontal
37 Tp = T*paso;                  % Conversion
38 %% Graficar
39 bar(n,Tp,'DisplayName','Orden');
40 title('Frequency analysis FilterBilinear (16 MHz/n)','interpreter','latex');
41 xlabel('$n$ ','interpreter','latex');
42 ylabel('Fractional order $\alpha$', 'interpreter','latex');

```

```

43 % legend('interpreter','latex','FontSize',10);
44 grid on;
45 grid minor;
46 set(gca,'TickLabelInterpreter','latex');

```

Código A.8: A12_grafica_analisis_de_frecuencias_FilterBilinear

```

1 %% Clear subroutine
2 clear all;
3 close all;
4 clc;
5 %%
6 paso = 0.05;
7 alpha = (0.1:paso:0.95)';           % Orden del integrador
8 kf = 2*pi*1000;                       % Factor de escalamiento
9 A = (1 - alpha)./(1 + alpha);
10 G1 = 1./A;                           % Ganancia de alta frecuencia
11 G2 = A;                               % Ganancia de baja frecuencia
12 f0 = (A*kf)./(2*pi*1000);            % Frecuencia de polo en kHz
13 T = table(alpha,G1,G2,f0);
14 disp(T);
15
16 %% Latex table
17 T_latex.data = table(alpha,G1,G2,f0);
18 T_latex.dataFormat = {'%1.2f',1,'%6f',3};
19 % disp(T_latex.data);
20 latex = latexTable(T_latex);

```

Código A.9: B10_calculo_valores_suma_filtros

```

1 %% Clean subroutine
2 clear all;
3 close all;
4 clc;
5 format short;
6 %% Calcular fp y fz
7 paso = 0.01;
8 alpha = (paso:paso:0.99)';           % Orden fraccionario
9 kf = 2*pi*1000;                       % Factor de escalamiento
10 A = (1 - alpha)./(1 + alpha);
11 G1 = 1./A;                           % Ganancia de alta frecuencia
12 G2 = A;                               % Ganancia de baja frecuencia
13 f0 = (A*kf)./(2*pi*1000);            % Frecuencia de polo en kHz
14
15 % fp = (A*kf)./(2*pi*1000);           % Frecuencia de polo en kHz
16 % fz = (kf)./(A*2*pi*1000);          % Frecuencia de cero en kHz
17
18 %% Rango de frecuencias absolutas
19 sys1 = 16e6;                          % 16 MHz
20 n = [1,( 2:2:510)];                   % n
21 freqs = ((sys1./n)/1000)';            % in kHz
22 freq_min = freqs/1000;
23 freq_max = freqs/10;
24 %%
25 vv = zeros(size(freqs,1),9);          % Matriz binaria de verdad
26 for i=1:size(freqs,1)                 % Frecuencias
27     for j=1:size(alpha,1)             % Ordenes
28         cond1 = f0(j) >= freq_min(i) && f0(j) <= freq_max(i);
29         cond2 = 1;

```

```

30     if cond1 && cond2
31         vv(i,j) = 1;
32     else
33         vv(i,j) = 0;
34     end
35 end
36 end
37 R = [freqs freq_min freq_max vv];
38 % csvwrite('Analisis.csv',R);
39 %%
40 T = sum(vv,2);          % Suma horizontal
41 Tp = T*paso;           % Conversion
42 %% Graficar
43 bar(n,Tp,'DisplayName','Orden');
44 title('Análisis de frecuencias suma de filtros (16 MHz/n)','interpreter','latex');
45 xlabel('Divisi\''on $n$ ','interpreter','latex');
46 ylabel('Orden fraccionario $\alpha$','interpreter','latex');
47 % legend('interpreter','latex','FontSize',10);
48 grid on;
49 grid minor;
50 set(gca,'TickLabelInterpreter','latex');

```

Código A.10: B12_grafica_analisis_de_frecuencias_suma_filtros

```

1 %% Clear subroutine
2 clear all;
3 close all;
4 clc;
5 %%
6 paso = 0.05;
7 alpha = (0.1:paso:0.95)';          % Orden del integrador
8 kf = 2*pi*1000;                    % Factor de escalamiento
9 D = (alpha.^2 - 3*alpha + 2)./(alpha.^2 + 3*alpha + 2);
10 C = (8 - 2*alpha.^2)./(alpha.^2 + 3*alpha + 2);
11
12 Gh = D;
13 fz = (kf)./(1000*2*pi*D.^(1/2));
14 fp = (D.^(1/2)*kf)./(2*pi*1000);
15 Qz = (D.^(1/2))./(C);
16 Qp = (D.^(1/2))./(C);
17 Gl = 1./D;
18
19 T = table(alpha,Gh,Gl,fz,fp,Qz,Qp);
20 disp(T);
21
22 %% Latex table
23 T_latex.data = table(alpha,Gh,Gl,fz,fp,Qp);
24 T_latex.dataFormat = {'%1.2f',1,'%6f',5};
25 % disp(T_latex.data);
26 latex = latexTable(T_latex);

```

Código A.11: C10_calculo_valores_FilterBiquad

```

1 function R = saturation_cust(k,s,beta,x)
2 % f(x) =      k      si x > beta
3 %      sx      si -beta <= x <= beta
4 %      -k      si x < -beta
5 %
6 [m,n] = size(x);

```

```
7
8   R = zeros(m,n);
9   for i = 1:m*n
10      if x(i) < -beta
11         R(i) = -k;
12      elseif -beta <= x(i) && x(i) <= beta
13         R(i) = s*x(i);
14      else
15         R(i) = k;
16      end
17   end
18
19
20 end
```

Código A.12: Función saturación

Apéndice B

Gráficas de análisis de integrador fraccionario con CFE

Figura B.1: Diagramas de magnitud de aproximaciones de integrador fraccionario general.

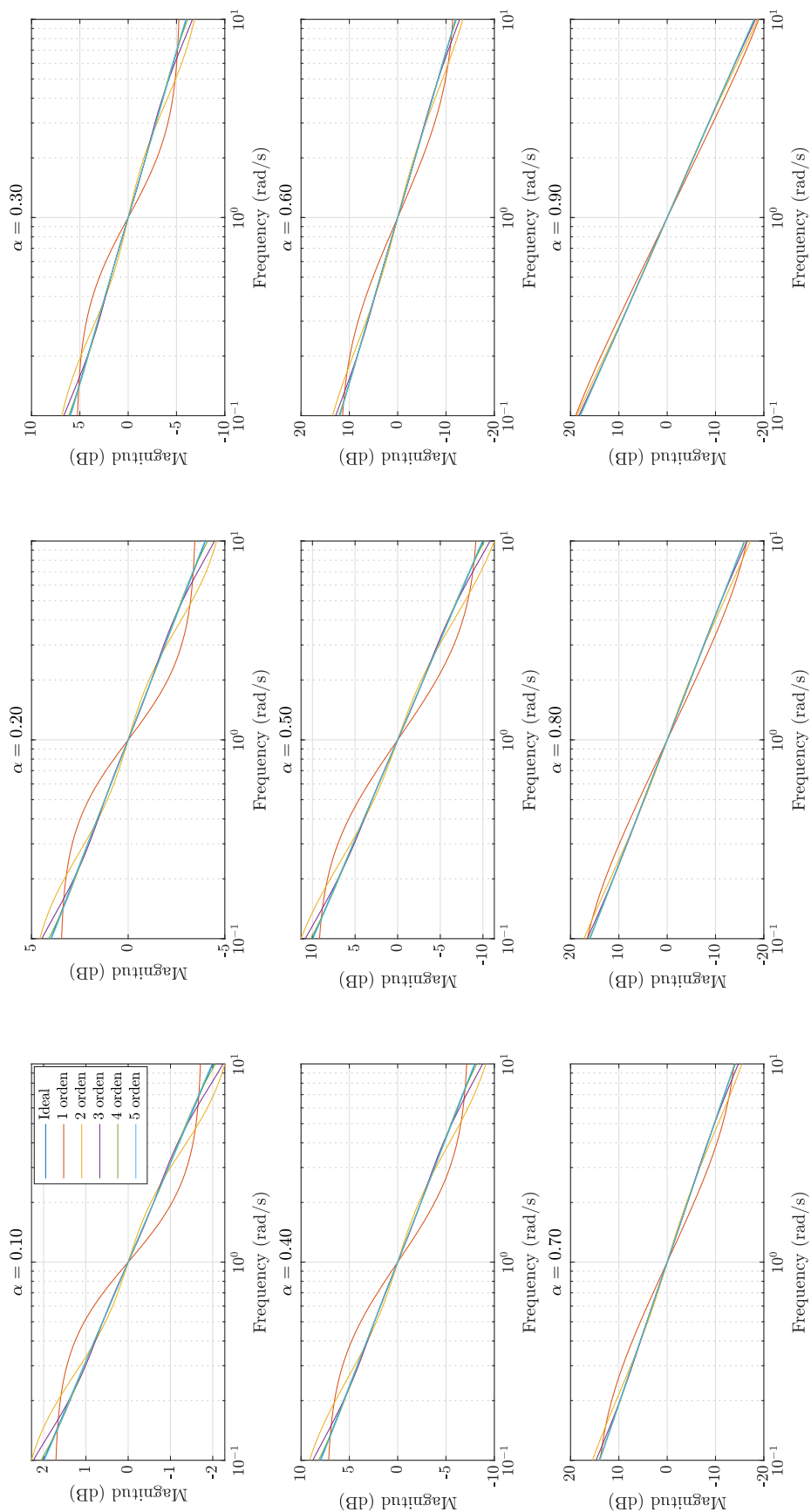


Figura B.2: Diagramas de fase de aproximaciones de integrador fraccionario general.

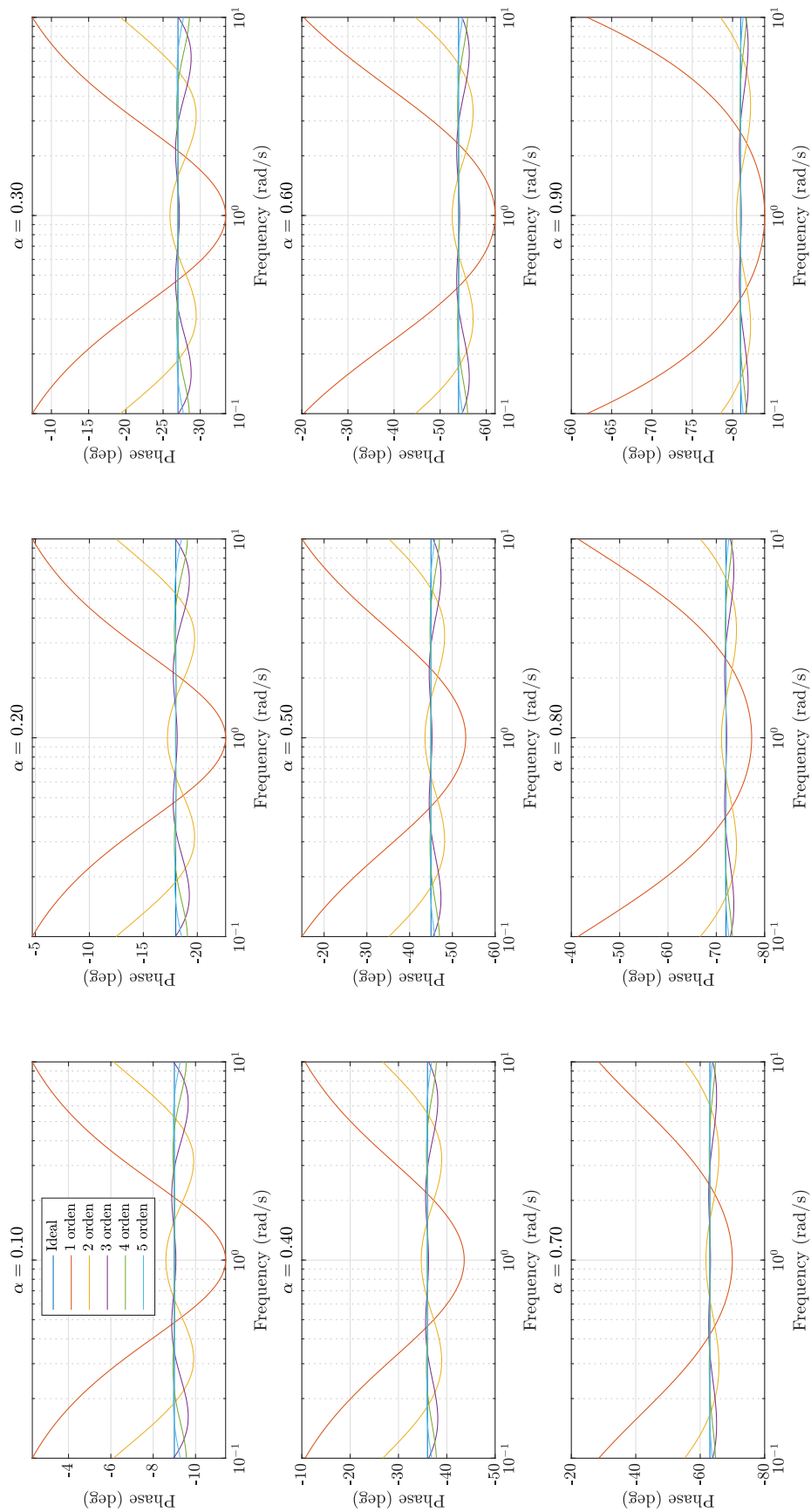


Figura B.3: Diagramas de error de magnitud de aproximaciones de integrador fraccionario general.

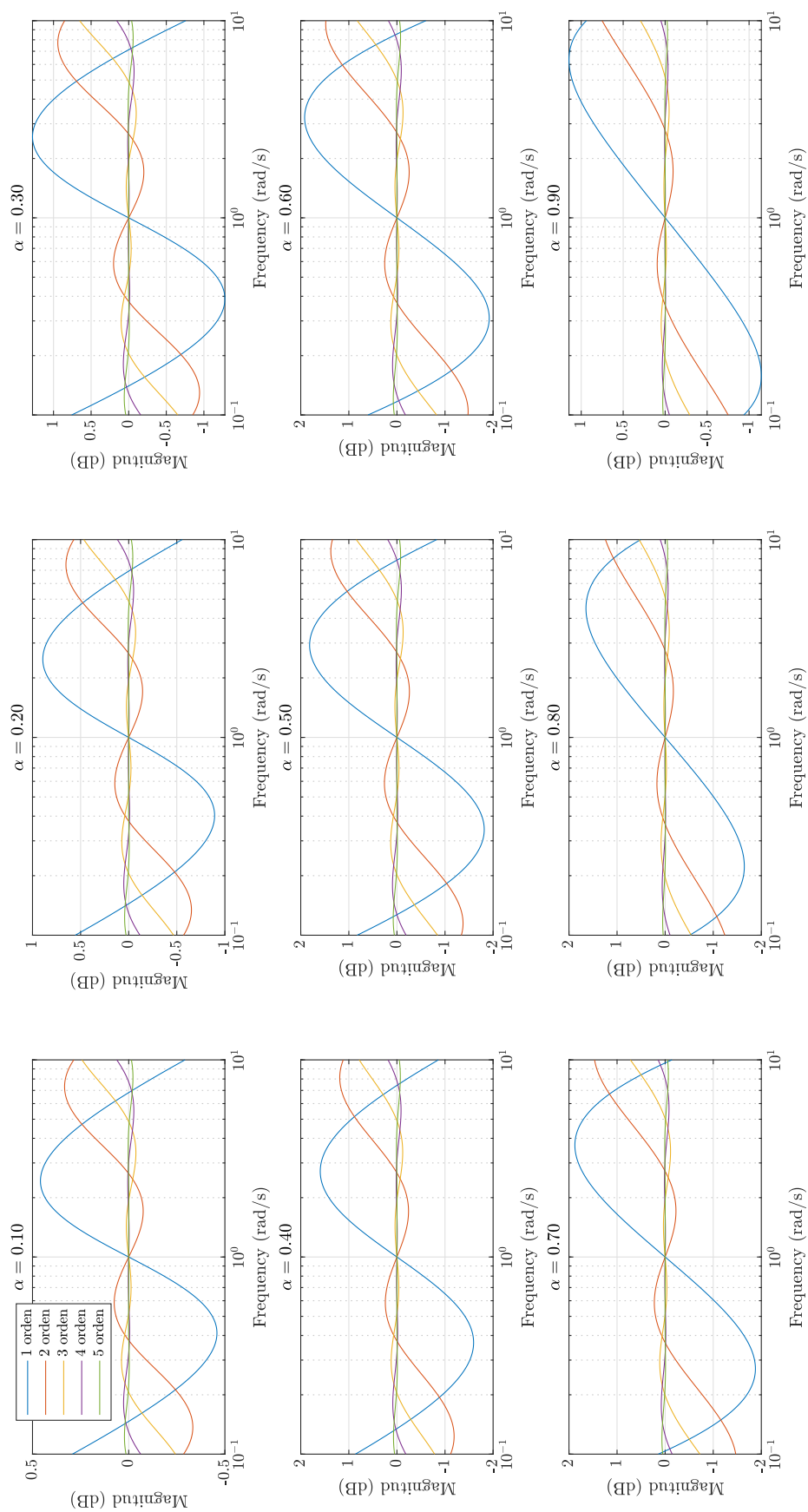


Figura B.4: Diagramas de error de fase de aproximaciones de integrador fraccionario general.

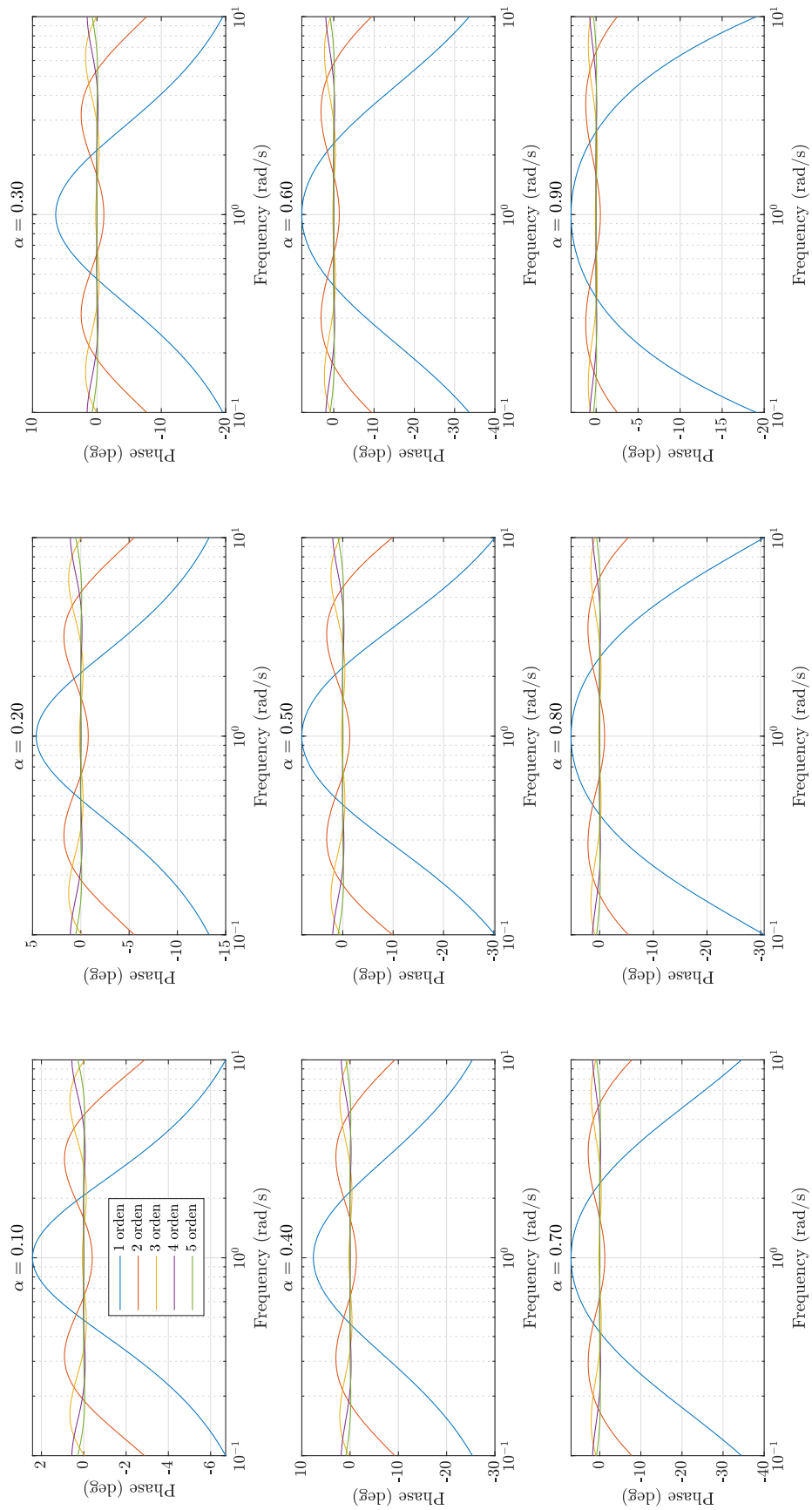


Figura B.5: Diagramas de magnitud normalizada de aproximaciones de integrador fraccionario general.

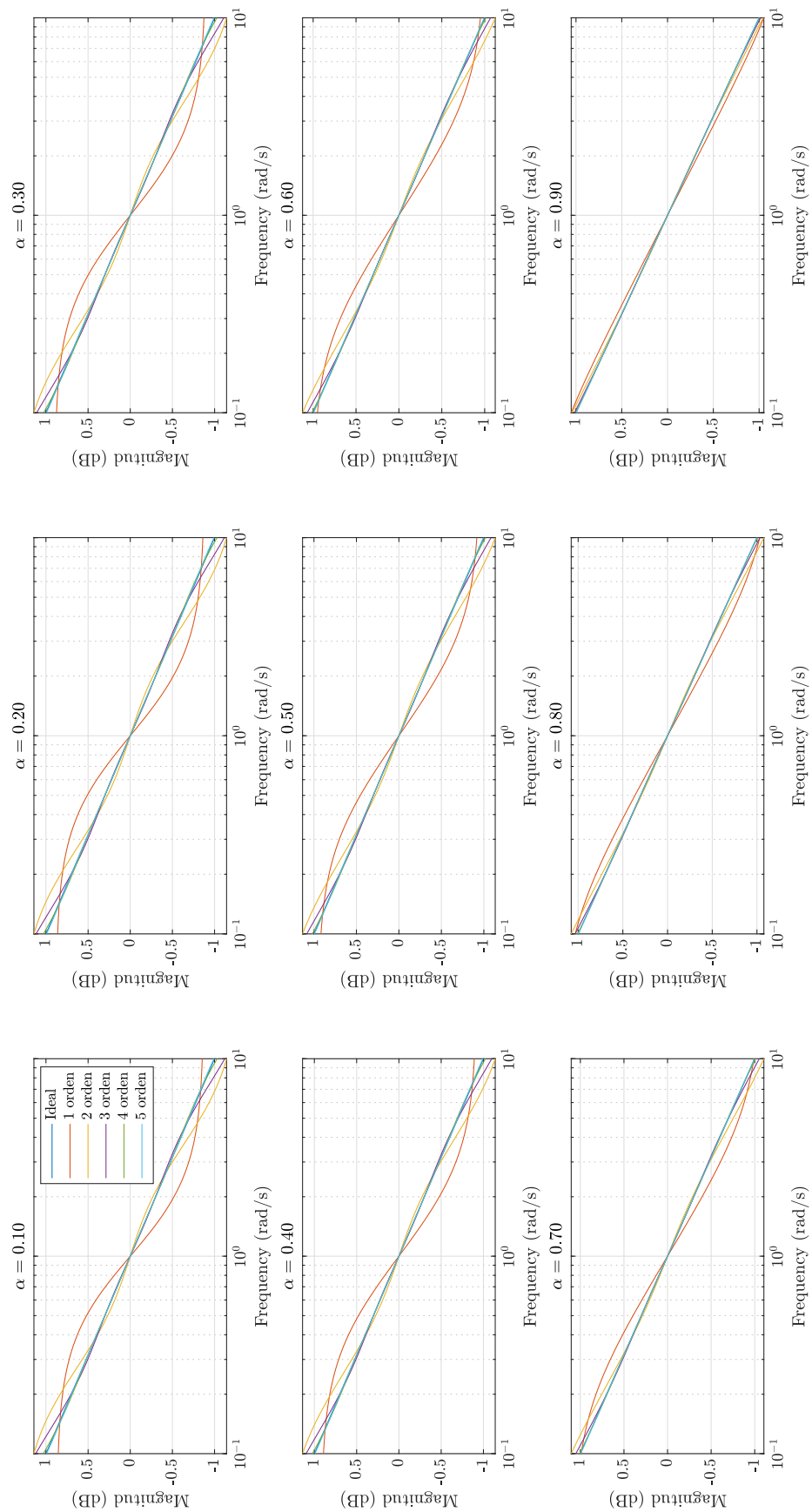


Figura B.6: Diagramas de fase normalizada de aproximaciones de integrador fraccional general.

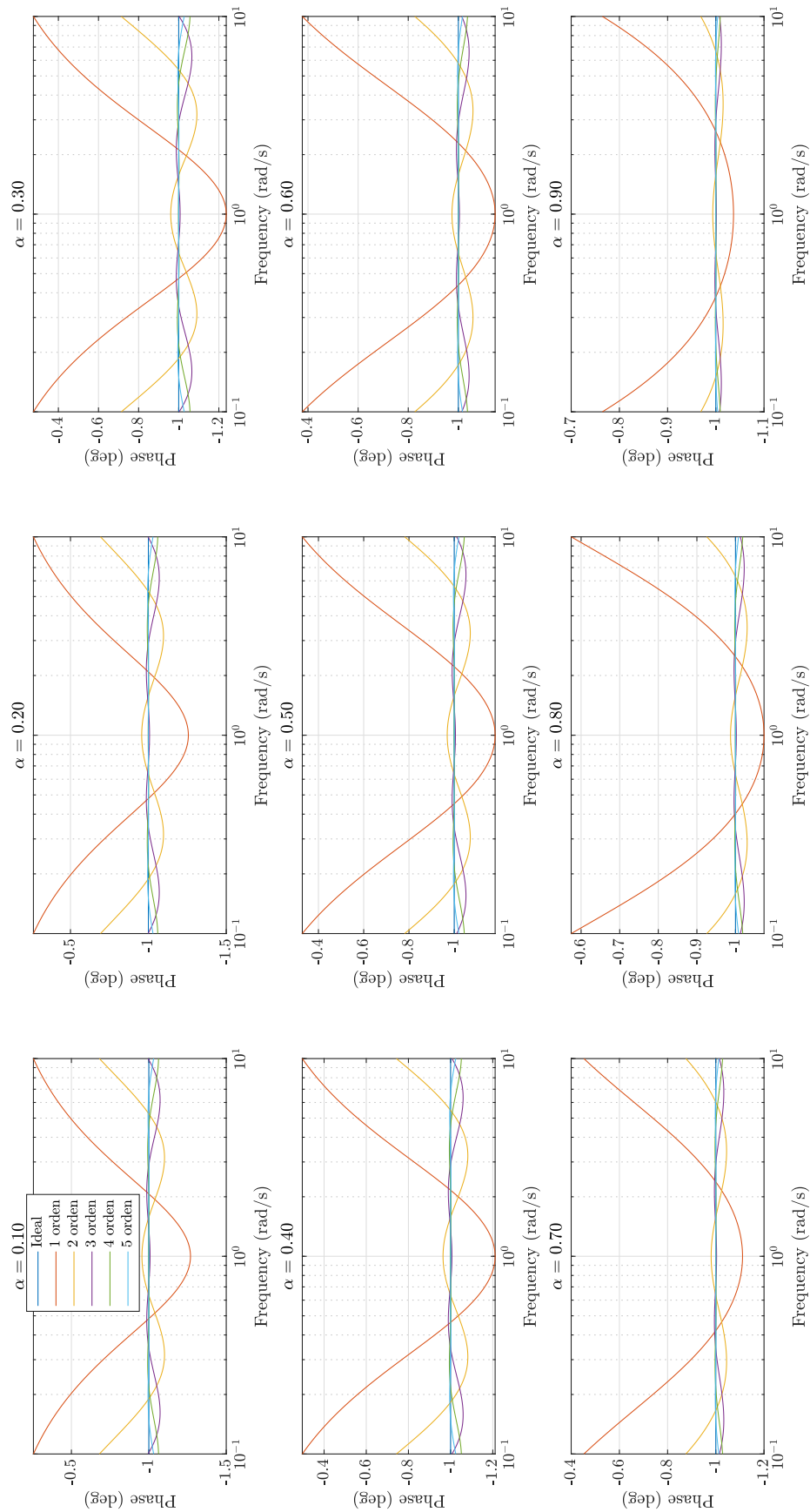


Figura B.7: Diagramas de error de magnitud normalizada de aproximaciones de integrador fraccionario general.

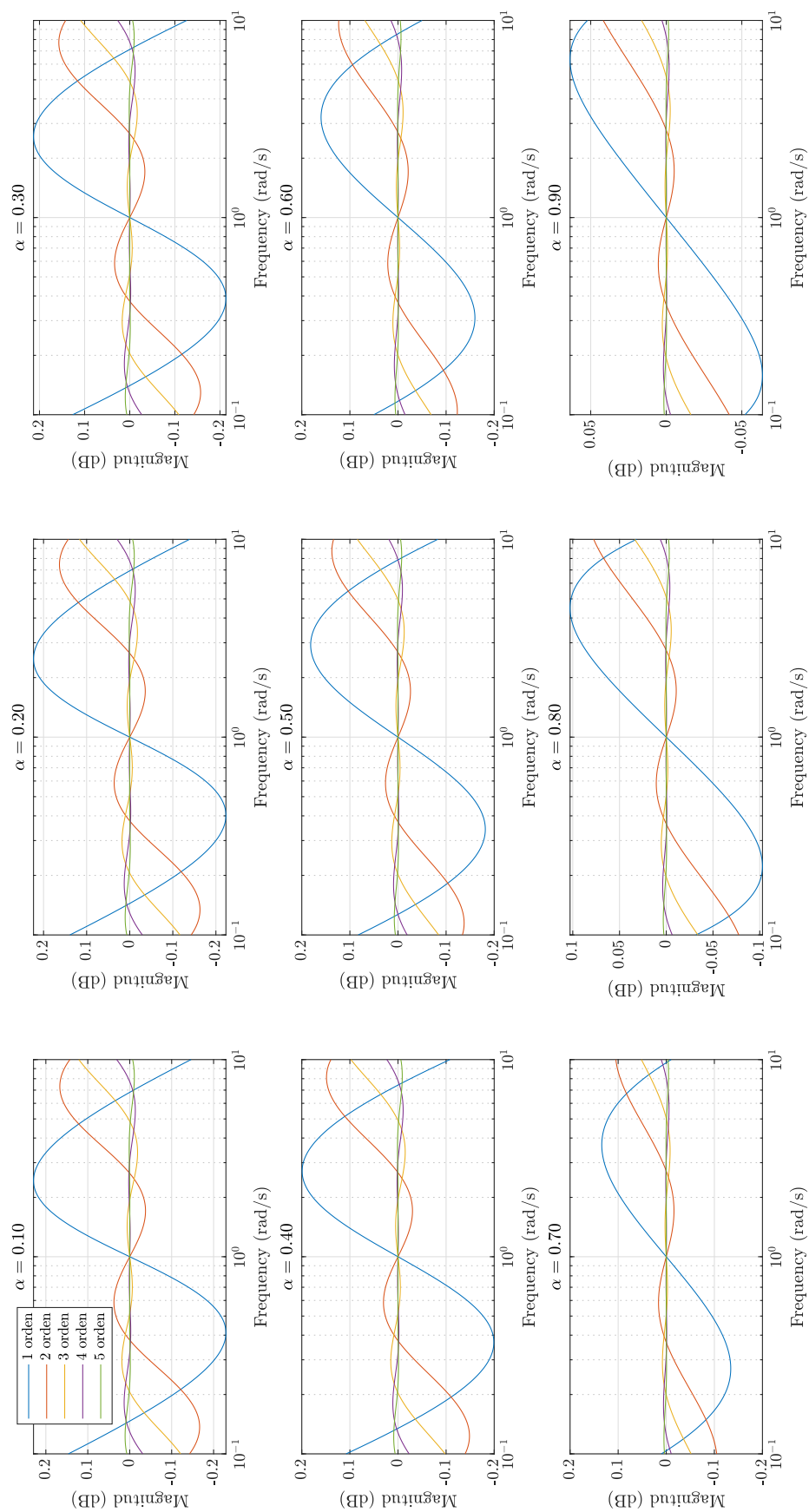
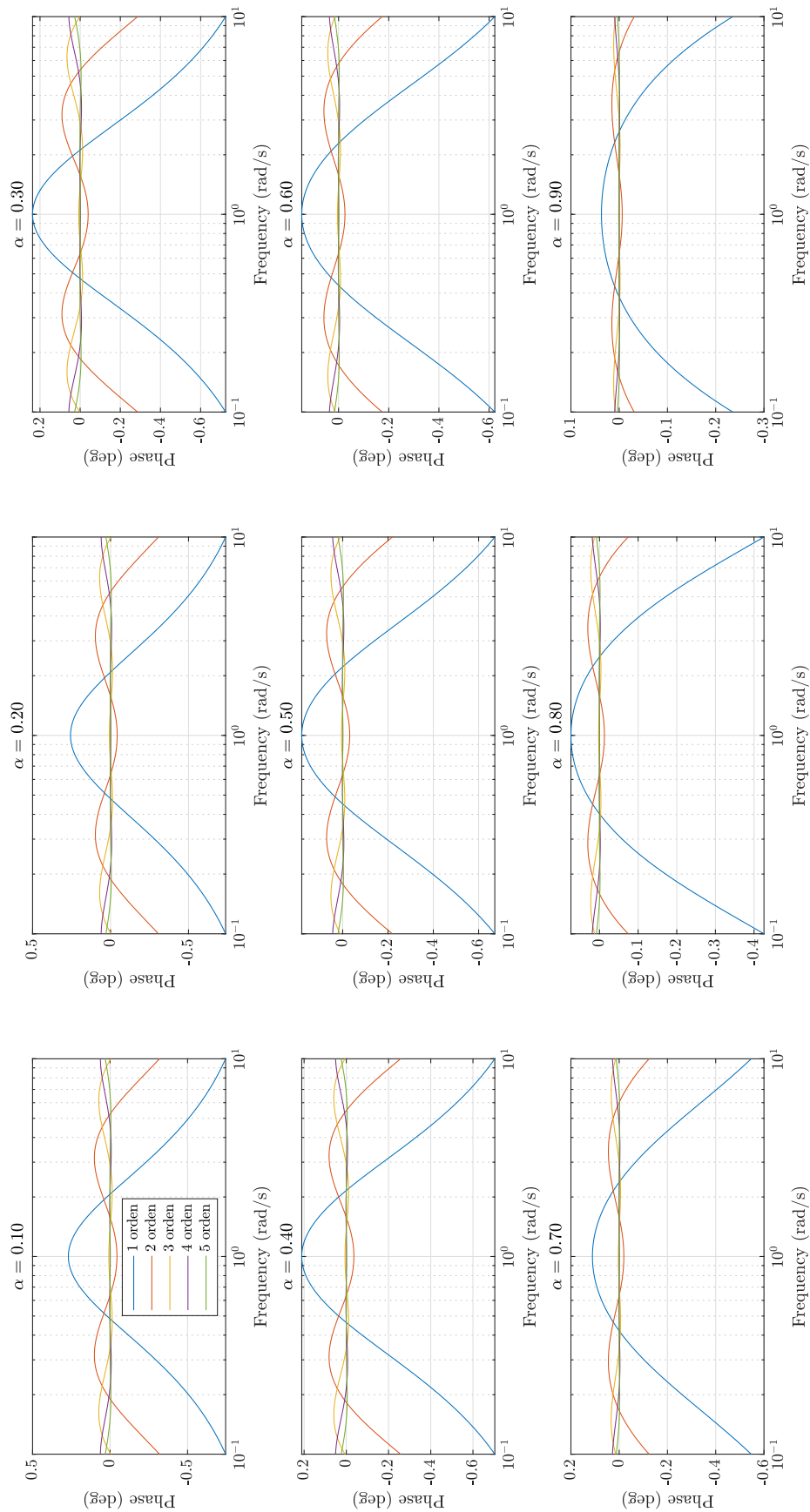


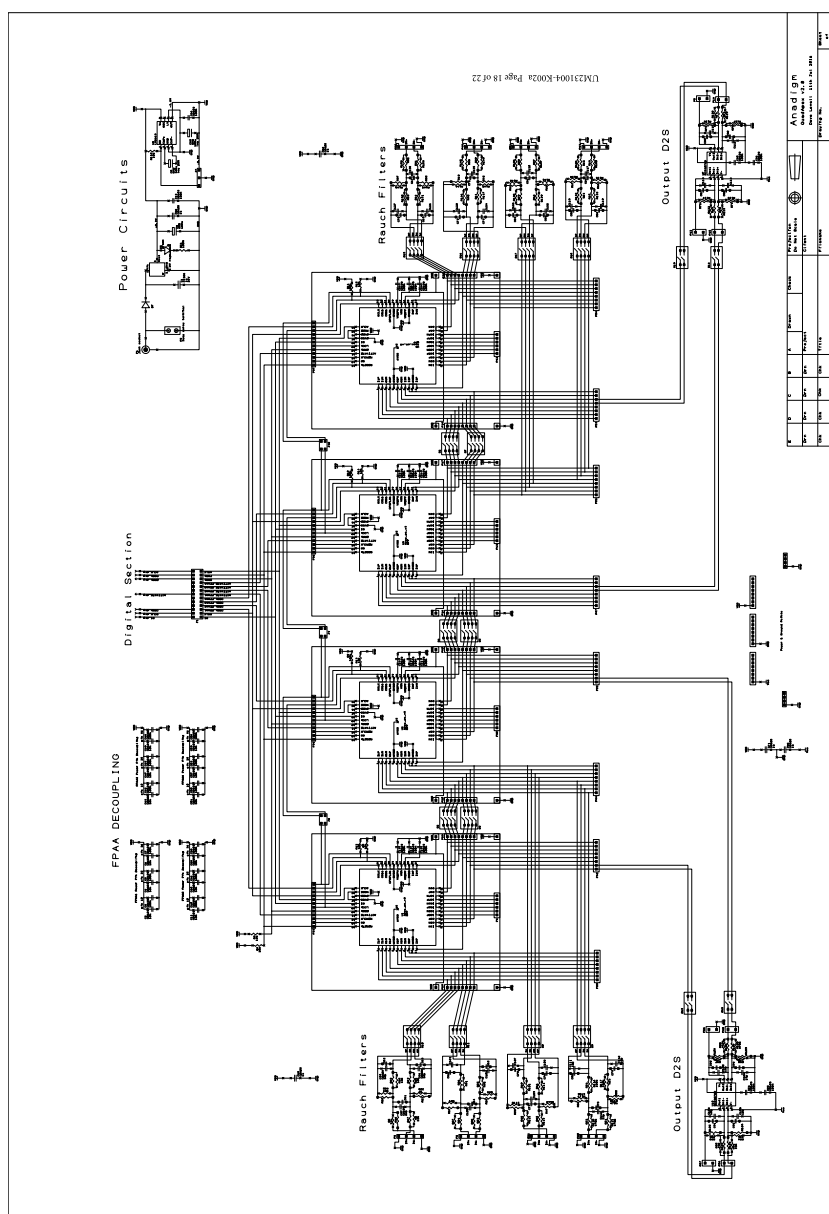
Figura B.8: Diagramas de error de fase normalizada de aproximaciones de integrador fraccionario general.



Apêndice C

Esquemático de QuadApex v2.0

Figura C.1: Diagrama esquemático de QuadApex v2.0



Bibliografía

- [1] J. M. M. Pacheco and E. T. Cuautle, *Electronic Design Automation of Multi-Scroll Chaos Generators*. BENTHAM SCIENCE PUB, 2010.
- [2] A. Buscarino, L. Fortuna, M. Frasca, and G. Sciuto, *A Concise Guide to Chaotic Electronic Circuits*. Springer-Verlag GmbH, 2014.
- [3] I. Petráš, *Fractional-Order Nonlinear Systems*. Springer Berlin Heidelberg, 2011.
- [4] I. Petráš and J. Terpak, “Fractional calculus as a simple tool for modeling and analysis of long memory process in industry,” *Mathematics*, vol. 7, p. 511, jun 2019.
- [5] A. Tepljakov, E. A. Gonzalez, E. Petlenkov, J. Belikov, C. A. Monje, and I. Petráš, “Incorporation of fractional-order dynamics into an existing PI/PID DC motor control loop,” *ISA Transactions*, vol. 60, pp. 262–273, jan 2016.
- [6] S. W. Khubalkar, A. S. Junghare, M. V. Aware, A. S. Chopade, and S. Das, “Demonstrative fractional order – PID controller based DC motor drive on digital platform,” *ISA Transactions*, vol. 82, pp. 79–93, nov 2018.
- [7] M. D. Ortigueira, *Fractional Calculus for Scientists and Engineers*. Springer-Verlag GmbH, 2011.
- [8] G. Wang, D. Chen, J. Lin, and X. Chen, “The application of chaotic oscillators to weak signal detection,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 46, pp. 440–444, apr 1999.
- [9] V. Tepin, *Self-parametric chaotic oscillators for secure communication systems*. St. Petersburg State Polytech. Univ, 2002.
- [10] Y. Chen, I. Petras, and D. Xue, “Fractional order control - a tutorial,” *American Control Conference*, 2009.
- [11] S. Das, *Functional Fractional Calculus for System Identification and Controls*. Springer-Verlag GmbH, 2007.

- [12] E. Gunay and K. Altun, "A performance comparison study of programmable platforms: FPAA and FPGA implementation of COOK communication system," *European Conference on Circuit Theory and Design (ECCTD)*, sep 2017.
- [13] I. S. Jesus and J. A. T. Machado, "Development of fractional order capacitors based on electrolyte processes," *Nonlinear Dynamics*, vol. 56, pp. 45–55, jun 2008.
- [14] K. Biswas, S. Sen, and P. Dutta, "Realization of a constant phase element and its performance study in a differentiator circuit," *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, vol. 53, pp. 802–806, sep 2006.
- [15] A. Charef, "Analogue realisation of fractional-order integrator, differentiator and fractional $PI^\lambda D^\mu$ controller," *IEE Proceedings - Control Theory and Applications*, vol. 153, pp. 714–720, nov 2006.
- [16] B. Krishna, "Studies on fractional order differentiators and integrators: A survey," *Signal Processing*, vol. 91, pp. 386–426, Mar. 2011.
- [17] B. T. Krishna and K. V. V. S. Reddy, "Active and passive realization of fractance device of order $1/2$," *Active and Passive Electronic Components*, vol. 2008, pp. 1–5, 2008.
- [18] A. Tepljakov, E. Petlenkov, and J. Belikov, "Efficient analog implementations of fractional-order controllers," *Proceedings of the 14th International Carpathian Control Conference (ICCC)*, may 2013.
- [19] L. Dorcak, J. Terpak, I. Petras, J. Valsa, and E. Gonzalez, "Comparison of the electronic realization of the fractional-order system and its model," *Proceedings of the 13th International Carpathian Control Conference (ICCC)*, may 2012.
- [20] N. Fragoulis, G. Souliotis, D. Besiris, and K. Giannakopoulos, "Field programmable analogue array design based on the wave active filter design method," *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, vol. 63, pp. 889–895, oct 2009.
- [21] R. Caponetto and D. Porto, "Analog implementation of non integer order integrator via field programmable analog array," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 39, pp. 107–111, jan 2006.
- [22] C. Li, W. J.-C. Thio, J. C. Sprott, H. H.-C. Iu, and Y. Xu, "Constructing infinitely many attractors in a programmable chaotic circuit," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 29003–29012, 2018.

- [23] F. Jiang, X. Wang, J. Jin, and D. Yang, *The application of chaotic duffing oscillators to ballistocardiograph signal detection*. IEEE, jul 2010.
- [24] B. Kumari and N. Gupta, “Experimental investigation on chaotic oscillator coupled dielectric resonator antenna for medical applications,” *IEEE International Conference on Antenna Innovations & Modern Technologies for Ground, Aircraft and Satellite Applications (iAIM)*, nov 2017.
- [25] C. D. Olds, *Continued Fractions*. The Mathematical Association of America, 2009.
- [26] M. S. Charles Alexander, *Fundamentals of Electric Circuits*. McGraw-Hill Education, 2016.
- [27] L. P. Huelsman and P. E. Allen, *Introduction to the Theory and Design of Active Filters (Electrical Engineering Series)*. McGraw-Hill Book Company, 1980.
- [28] K. S. Adel S. Sedra, *Microelectronic Circuits*. Oxford University Press Inc, 2015.