

UNIVERSIDAD PRIVADA ANTONOR ORREGO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA
ELECTRÓNICA



TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO ELECTRONICO

“Diseño e implementación de un identificador de procesos usando plataforma de 8 bits para modelar sistemas de primer y segundo orden”

Área de Investigación:

Control de Procesos Industriales

Autor(es):

Br. Castillo Valera, Benjhy Jordan

Br. Rodríguez Rodríguez, Carlos Benjamín

Jurado Evaluador:

Presidente: Vargas Díaz, Luis Alberto

Secretario: Llanos León, Lenin Humberto

Vocal: De La Cruz Rodríguez, Oscar Miguel

Asesor:

Linares Vertiz, Saul Noe

Código Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-8810-9224>

TRUJILLO – PERÚ
2021

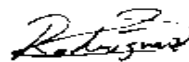
Fecha de sustentación: 2021/07/12

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN IDENTIFICADOR DE PROCESOS
USANDO PLATAFORMA DE 8 BITS PARA MODELAR SISTEMAS DE PRIMER Y
SEGUNDO ORDEN**

Elaborado Por:



Br. Benjhy Jordan Castillo Valera



Br. Carlos Benjamín Rodríguez Rodríguez

Aprobado por:



Ing. LUIS ALBERTO VARGAS DIAZ
PRESIDENTE
CIP N° 104175



Ing. LENIN HUMBERTO LLANOS LEÓN
SECRETARIO
CIP N° 139213



Ms. OSCAR MIGUEL DE LA CRUZ RODRIGUEZ
VOCAL
CIP N° 85598



Ing. SAÚL NOE LINARES VERTIZ
ASESOR
CIP N° 142213

DEDICATORIA

*Con todo mi corazón y sincera
gratitud a mi Dios y mis padres,
porque este logro no es solo mío,
sino de ellos y también de las
personas que quiero, que están
apoyándome siempre en este
gran camino.*

Benjhy J. Castillo Valera.

*A Dios y mis padres por darme la vida,
las enseñanzas necesarias para hacer que
este logro sea posible; a mis hermanas y
mi hermano que son un apoyo constante
en mi vida.*

Carlos B. Rodríguez Rodríguez.

AGRADECIMIENTO

Con mucha gratitud, a todos los docentes ingenieros de la Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica UPAO, que compartieron con nosotros sus conocimientos para hacer posible una de nuestras metas en nuestra vida profesional, especialmente al Ing. Saúl Linares Vértiz, por su paciencia, motivación y su valiosa guía y asesoramiento profesional; por haber inculcado en nosotros el sentido de responsabilidad y rigor académico, sin los cuales no habiéramos hecho posible este trabajo de investigación, para así obtener la titulación profesional.

Muchas gracias a todos por el apoyo que nos brindaron.

Los autores

RESUMEN

El presente trabajo de investigación desarrolla un algoritmo para la identificación de procesos con plataformas de 8 bits, en particular con el microcontrolador 16f877, en el capítulo I se aborda la realidad problemática y los objetivos de la investigación, en capítulo II se tocan los conceptos teóricos para realizar la investigación, en el capítulo III en la primera parte se realiza la toma de datos usando la plataforma de Matlab, para en la siguiente realizar la toma de datos usando el microcontrolador 16f877, se realizaron pruebas en estado Estacionario y en estado Permanente, en el capítulo IV se procesan los datos obtenidos en tablas y gráficos, en el capítulo V se realiza la discusión de los resultados y finalmente se realizan las conclusiones y recomendaciones.

Palabras Claves: Algoritmo, microcontrolador, estado estacionario.

ABSTRACT

The present research work develops an algorithm for the identification of processes with 8-bit platforms, in particular with the 16f877 microcontroller, in chapter I the problematic reality and the objectives of the research are addressed, in chapter II the theoretical concepts are touched To carry out the research, in chapter III in the first part the data collection is carried out using the Matlab platform, and in the next part the data collection is carried out using the 16f877 microcontroller, tests were carried out in state Stationary and in a permanent state, in chapter IV the data obtained in tables and graphs are processed, in chapter V the results are discussed and finally the conclusions and recommendations are made.

Keywords: algorithm, microcontroller, steady state.

PRESENTACIÓN

Señores miembros del Jurado:

De conformidad y en cumplimiento de los requisitos estipulados en el Reglamento de Grados y Títulos de la Universidad Privada Antenor Orrego y el Reglamento Interno de la Carrera Profesional de Ingeniería Electrónica para obtener el Título Profesional de Ingeniero Electrónico, se pone a vuestra disposición el presente trabajo de tesis titulado: **“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN IDENTIFICADOR DE PROCESOS USANDO PLATAFORMA DE 8 BITS PARA MODELAR SISTEMAS DE PRIMER Y SEGUNDO ORDEN”**

Este trabajo, es el resultado de la aplicación de los conocimientos adquiridos en la formación profesional en la Universidad, excusando anticipadamente de los posibles errores involuntarios cometidos en su desarrollo.

Trujillo, 12 de julio de 2021

Br. Castillo Valera, Benjhy Jordan

Br. Rodríguez Rodríguez, Carlos Benjamín

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CARÁTULA	¡Error! Marcador no definido.
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTO	v
RESUMEN	vi
ABSTRACT	vii
PRESENTACIÓN	viii
ÍNDICE DE CONTENIDOS	ix
ÍNDICE DE TABLAS	x
ÍNDICE DE GRÁFICOS	x
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Problema de investigación	1
1.2. Objetivos de la investigación	2
1.3. Justificación del estudio	2
II. MARCO DE REFERENCIA	3
2.1. Antecedentes del estudio	3
2.2. Marco Teórico	5
2.3. Marco conceptual	11
2.4. Hipótesis	11
2.5. Variables e indicadores	12
III. METODOLOGÍA EMPLEADA	14
3.1. Tipo y nivel de investigación	14
3.2. Población y muestra de estudio	14
3.3. Diseño de investigación	14
3.4. Técnicas e instrumentos de investigación	14
IV. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	18
4.1. Respuesta Estacionaria.	18
4.2. Respuesta transitoria.	56
4.3. Procesamiento y análisis de datos	114

V. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	120
CONCLUSIONES	¡Error! Marcador no definido.
RECOMENDACIONES	¡Error! Marcador no definido.
REFERENCIAS	¡Error! Marcador no definido.
ANEXOS	¡Error! Marcador no definido.

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Operacionalización de la variable independiente	13
Tabla 2 Operacionalización de la variable dependiente	13
Tabla 3 Respuesta estacionaria con 10 coeficientes para sistema de primer orden	114
Tabla 4 Respuesta estacionaria con 20 coeficientes para sistema de primer orden	114
Tabla 5 Respuesta estacionaria Matlab	115
Tabla 6 Respuesta transitoria Matlab	115
Tabla 7 Respuesta estacionaria Microcontrolador	115
Tabla 8 Respuesta transitoria microcontrolador	116
Tabla 9 Error porcentual para la respuesta estacionaria con 10 coeficientes	120
Tabla 10 Error porcentual para la respuesta estacionaria con 20 coeficientes	121

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Tabla 1 Operacionalización de la variable independiente	13
Tabla 2 Operacionalización de la variable dependiente	13
Tabla 3 Respuesta estacionaria con 10 coeficientes para sistema de primer orden	114
Tabla 4 Respuesta estacionaria con 20 coeficientes para sistema de primer orden	114
Tabla 5 Respuesta estacionaria Matlab	115
Tabla 6 Respuesta transitoria Matlab	115

Tabla 7 Respuesta estacionaria Microcontrolador	115
Tabla 8 Respuesta transitoria microcontrolador	116
Tabla 9 Error porcentual para la respuesta estacionaria con 10 coeficientes	120
Tabla 10 Error porcentual para la respuesta estacionaria con 20 coeficientes	121

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Diagrama de bloques de la estructura LMS	6
Figura 2 Transformada Z	9
Figura 3 PIC16F877	10
Figura 4 Filtro adaptativo	15
Figura 5 Modelo de planta con $s=-1$	18
Figura 6 Configuración de la señal de entrada.....	19
Figura 7 Configuración del bloque LMS para un factor de convergencia de 0.1	20
Figura 8 Respuesta del sistema	21
Figura 9 Respuesta del sistema en un tiempo de 4000s	22
Figura 10 Configuración del bloque LMS para un factor de convergencia de 0.01	23
Figura 11 Respuesta del sistema en un tiempo de 20000s.....	24
Figura 12 Señal con error en la identificación	25
Figura 13 Configuración del bloque LMS para un factor de convergencia de 0.001	26
Figura 14 Respuesta del sistema para un tiempo de 20000s.....	27
Figura 15 Configuración del bloque LMS para un factor de convergencia de 0.001 y número de coeficientes a 10.....	28
Figura 16 Configuración del sistema en simulink.....	29
Figura 17 Respuesta del sistema para un factor de convergencia de 0.001 y número de coeficientes a 10.....	30
Figura 18 Respuesta del sistema en un tiempo de 14000s.....	31
Figura 19 Configuración del sistema para un factor de convergencia a 0.01	32
Figura 20 Tiempo de estabilización para un factor de convergencia de 0.01	33
Figura 21 Respuesta del sistema para un factor de convergencia a 0.01	34
Figura 22 Configuración del sistema en simulink para factor de convergencia a 0.015	35

Figura 23 Tiempo de estabilización para un factor de convergencia de 0.015.....	36
Figura 24 Respuesta del sistema para un factor de convergencia de 0.015.....	37
Figura 25 Configuración del sistema en simulink para un factor de convergencia de 0.02 .	38
Figura 26 Respuesta del sistema para un factor de convergencia de 0.02.....	39
Figura 27 Tiempo de estabilización para un factor de convergencia de 0.02.....	40
Figura 28 Configuración del sistema en simulink factor de convergencia a 0.001	41
Figura 29 Respuesta del sistema para un factor de convergencia de 0.001.....	42
Figura 30 Tiempo de estabilización para un factor de convergencia de 0.001.....	43
Figura 31 Configuración del sistema en simulink para factor de convergencia a 0.002.....	44
Figura 32 Respuesta del sistema para un factor de convergencia a 0.002.....	45
Figura 33 Tiempo de estabilización para un factor de convergencia de 0.002.....	46
Figura 34 Configuración del sistema en simulink para un factor de convergencia a 0.005 .	47
Figura 35: Respuesta del sistema para un factor de convergencia a 0.005.....	48
Figura 36 Tiempo de estabilización para un factor de convergencia de 0.005.....	49
Figura 37 Configuración del sistema en simulink para un factor de convergencia a 0.008 .	50
Figura 38 Respuesta del sistema para un factor de convergencia a 0.008.....	51
Figura 39 Tiempo de estabilización para un factor de convergencia de 0.008.....	52
Figura 40 Configuración del sistema en simulink para un factor de convergencia a 0.01 ...	53
Figura 41 Respuesta del sistema para un factor de convergencia a 0.01.....	54
Figura 42 Tiempo de estabilización para un factor de convergencia de 0.01.....	55
Figura 43 Configuración del sistema en simulink para un factor de convergencia a 0.001 con 6 coeficientes	56
Figura 44 Configuración de parámetros para un factor de convergencia a 0.001 con 6 coeficientes	57
Figura 45 Configuración de parámetros LMS para un factor de convergencia a 0.001 con 6 coeficientes	58
Figura 46 Respuesta transitoria para un factor de convergencia a 0.001 con 6 coeficientes	59
Figura 47 Configuración de parámetros para un factor de convergencia a 0.01 con 6 coeficientes	60
Figura 48 Respuesta del sistema para un factor de convergencia a 0.01 con 6 coeficientes	61

Figura 49 Respuesta transitoria para un factor de convergencia a 0.01 con 6 coeficientes .	62
Figura 50 Configuración de parámetros para un factor de convergencia a 0.1 con 6 coeficientes	63
Figura 51 Respuesta del sistema para un factor de convergencia a 0.1 con 6 coeficientes ..	64
Figura 52 Respuesta transitoria para un factor de convergencia a 0.1 con 6 coeficientes ...	65
Figura 53 Configuración de parámetros para un factor de convergencia a 0.001 con 10 coeficientes	66
Figura 54 Configuración de parámetros LMS para un factor de convergencia a 0.001 con 10 coeficientes	67
Figura 55 Respuesta transitoria para un factor de convergencia a 0.001 con 10 coeficientes	68
Figura 56 Configuración del sistema en simulink para un factor de convergencia a 0.01 con 10 coeficientes.....	69
Figura 57 Configuración de parámetros LMS para un factor de convergencia a 0.01 con 10 coeficientes	70
Figura 58 Respuesta del sistema para un factor de convergencia de 0.01 con 10 coeficientes	71
Figura 59 Respuesta transitoria para un factor de convergencia a 0.01 con 10 coeficientes	72
Figura 60 Configuración del sistema en simulink para un factor de convergencia a 0.1 con 10 coeficientes.....	73
Figura 61 Configuración de parámetros LMS para un factor de convergencia a 0.1 con 10 coeficientes	74
Figura 62 Respuesta del sistema para un factor de convergencia a 0.1 con 10 coeficientes	75
Figura 63 Respuesta transitoria para un factor de convergencia a 0.1 con 10 coeficientes .	76
Figura 64 Circuito basado en plataforma de 8 bits.....	77
Figura 65 Entrada y salida de la planta.....	78
Figura 66 Respuesta para un factor de convergencia a 0.001 y número de coeficientes a 10	81
Figura 67 Respuesta en Proteus para un factor de convergencia a 0.001 y número de coeficientes a 10.....	81

Figura 68 Respuesta para un factor de convergencia a 0.01 y número de coeficientes a 10	82
Figura 69 Respuesta en Proteus para un factor de convergencia a 0.01 y número de coeficientes a 10.....	82
Figura 70 Respuesta para un factor de convergencia a 0.015 y número de coeficientes a 10.....	83
Figura 71 Respuesta en Proteus para un factor de convergencia a 0.015 y número de coeficientes a 10.....	83
Figura 72 Respuesta para un factor de convergencia a 0.02 y número de coeficientes a 10	84
Figura 73 Respuesta en Proteus para un factor de convergencia a 0.02 y número de coeficientes a 10.....	84
Figura 74 Respuesta para un factor de convergencia a 0.001 y número de coeficientes a 10.....	85
Figura 75 Respuesta en Proteus para un factor de convergencia a 0.001 y número de coeficientes a 10.....	85
Figura 76 Respuesta para un factor de convergencia a 0.001 y número de coeficientes a 20.....	86
Figura 77 Respuesta en PROSPICE para un factor de convergencia a 0.001 y número de coeficientes a 20.....	87
Figura 78 Respuesta en Proteus para un factor de convergencia a 0.001 y número de coeficientes a 20.....	87
Figura 79 Respuesta en PROSPICE para un factor de convergencia a 0.008 y número de coeficientes a 20.....	88
Figura 80 Respuesta en Proteus para un factor de convergencia a 0.008 y número de coeficientes a 20.....	89
Figura 81 Respuesta para un factor de convergencia a 0.001 y número de coeficientes a 6	90
Figura 82 Respuesta para un factor de convergencia a 0.01 y número de coeficientes a 6..	90
Figura 83 Respuesta para un factor de convergencia a 0.1 y número de coeficientes a 6 ...	91
Figura 84 Tiempo de duración del algoritmo para un factor de convergencia a 0.1 y número de coeficientes a 6	92

Figura 85 Respuesta en PROSPICE para un factor de convergencia a 0.001 y número de coeficientes a 10.....	93
Figura 86 Respuesta en PROSPICE para un factor de convergencia a 0.01 y número de coeficientes a 10.....	94
Figura 87 Respuesta en PROSPICE para un factor de convergencia a 0.1 y número de coeficientes a 10.....	95
Figura 88 Tiempo de duración del algoritmo para un factor de convergencia a 0.1 y número de coeficientes a 10	96
Figura 89 Circuito de segundo orden	97
Figura 90 Configuración de los parámetros LMS para un factor de convergencia a 0.001 y número de coeficientes a 10.....	98
Figura 91 Configuración del bloque LMS en simulink para un factor de convergencia a 0.001 y número de coeficientes a 10	99
Figura 92 Respuesta en simulink para un factor de convergencia a 0.001 y número de coeficientes a 10.....	100
Figura 93 Tiempo de adaptación para un factor de convergencia a 0.001 y número de coeficientes a 10.....	100
Figura 94 Configuración de los parámetros LMS para un factor de convergencia a 0.01 y número de coeficientes a 10.....	101
Figura 95 Configuración del bloque LMS en simulink para un factor de convergencia a 0.01 y número de coeficientes a 10	102
Figura 96 Respuesta en simulink para un factor de convergencia a 0.01 y número de coeficientes a 10.....	102
Figura 97 Tiempo de adaptación para un factor de convergencia a 0.01 y número de coeficientes a 10.....	103
Figura 98 Configuración del parámetro LMS para un factor de convergencia a 0.001 y número de coeficientes a 10.....	104
Figura 99 Configuración del bloque LMS en simulink para un factor de convergencia a 0.001 y número de coeficientes a 10	105

Figura 100 Respuesta transitoria para un factor de convergencia a 0.001 y número de coeficientes a 10.....	105
Figura 101 Configuración del parámetro LMS para un factor de convergencia a 0.01 y número de coeficientes a 10.....	106
Figura 102 Respuesta transitoria para un factor de convergencia a 0.01 y número de coeficientes a 10.....	107
Figura 103 Configuración del parámetro LMS para un factor de convergencia a 0.1 y número de coeficientes a 10.....	108
Figura 104 Respuesta transitoria para un factor de convergencia a 0.1 y número de coeficientes a 10.....	109
Figura 105 Circuito con el microcontrolador PIC 16F877	110
Figura 106 Respuesta en PROSPICE para un factor de convergencia a 0.001 y número de coeficientes a 10.....	111
Figura 107 Respuesta en PROSPICE para un factor de convergencia a 0.01 y número de coeficientes a 10.....	112
Figura 108 Respuesta transitoria en PROSPICE para un factor de convergencia a 0.01 y número de coeficientes a 10.....	112
Figura 109 Respuesta en PROSPICE para un factor de convergencia a 0.1 y número de coeficientes a 10.....	113

I. INTRODUCCIÓN

1.1. Problema de investigación

a. Descripción de la realidad problemática

Según Ogata (2010, p.2): “Los procesos industriales tiene una relación entre la entrada y la salida la que es llamada función de transferencia, esta es usada para determinar la estabilidad del proceso y permitir el cálculo del tiempo de establecimiento que es el parámetro crítico en los procesos industriales”. Por consiguiente, esta función de transferencia se puede calcular de forma teórica modelando la planta mediante ecuaciones diferenciales y luego pasando este sistema dinámico al plano de Laplace, esto permite al diseñador incrustar un bloque en serie con la función de transferencia para que se mejore su tiempo de respuesta, este bloque por lo general es llamado controlador de acción Proporcional, Integral y Derivativo (PID).

Los modelos dinámicos que describen el modelo de la planta en la práctica son variables en el tiempo, esto quiere decir que con el tiempo las funciones de transferencias de las plantas cambian, esto ocurre por lo general debido a que las piezas que conforman la planta se deterioran con el tiempo y esto modifica el sistema dinámico, también cuando se realiza un mantenimiento correctivo a la planta y se realizan modificaciones en ella, todo esto provoca un cambio en la función de transferencia de la planta y por lo tanto el controlador diseñado para la mejora del tiempo de respuesta ya no sea el esperado.

El problema radica en determinar el modelo de la planta cuando este cambia en forma temporal

$$F(s, t_1) \neq F(s, t_2)$$

b. Descripción del problema

La falta de identificadores de procesos de primer y segundo orden variantes en el tiempo.

c. Formulación del problema

¿Cómo implementar un identificador de procesos en una plataforma de 8 bits para determinar modelos de primer y segundo orden?

1.2. Objetivos de la investigación

a. Objetivo general

Diseñar e implementar un identificador de procesos de primer y segundo orden.

b. Objetivos específicos

- Implementar el algoritmo para identificar procesos en una plataforma de 8 bits haciendo uso del lenguaje de alto nivel.
- Verificar el identificador de procesos en sistemas de primer y segundo orden a través de la función de transferencia.

1.3. Justificación del estudio

Esta investigación se realiza porque existe la necesidad de generar tecnología de bajos recursos computacionales para la identificación de procesos, y a la vez permitirá usar los parámetros de las funciones de transferencia para implementar controladores adaptativos ya que el sistema calcula el cambio de cada parámetro en el tiempo.

II. MARCO DE REFERENCIA

2.1. Antecedentes del estudio

Para validar esta investigación, se presenta los antecedentes de diversos estudios con referencia a la identificación de procesos, encontrados en tesis de grado de universidades nacionales y/o internacionales.

Según (Reyes & Sánchez, 2017), en su investigación titulada **“Diseño de un sintonizador para controladores PID aplicados a sistemas eléctricos de primer orden”**; Se centra en realizar un diseño de un sistema de auto sintonía para sistemas eléctricos de primer orden de tipo R-C, en una plataforma basada en microcontroladores PIC. El método del relevador por las características que presenta, será implementado en el presente trabajo de investigación, las cuales lo hacen un método apto para ser implementado en un sistema digital.

Según (Poma, 2018), en su investigación titulada **“Diseño e implementación de un sistema de telemando y automatización de bombeo de agua, basado en microcontroladores PIC”**; en la tesis se implementó un circuito de Control de Nivel, que se encargue de automatizar el sistema de bombeo de agua y un reloj calendario digital. Además, la implementación del circuito de Telemando, que vía línea telefónica realiza el control ON/OFF del Circuito de Control de Nivel, como también los Circuitos de Protección.

Según (Lima, 2015), en su investigación titulada **“Implementación de control PID para un esterilizador a calor seco con microcontrolador PIC”**; La tesis consiste en la Implementación de un control PID en un microcontrolador PIC para un esterilizador

de calor seco. El diseño contempla una interfaz de usuario para poder configurar la temperatura de esterilización, según la cual el sistema regula la temperatura mediante el control PID digital y control de potencia por PWM usando como actuador una resistencia calefactora de 700 vatios y como sensor de realimentación una termocupla tipo J, además controla el tiempo de esterilizado que también es configurable.

Según (Aluisa, 2014), en su investigación titulada **“Desarrollo de un sistema de identificación de procesos industriales en línea, usando la plataforma open-source Arduino y Matlab/Simulink”**; determina que el algoritmo RLS es el más adecuado para emular plantas en línea. Aluisa en su trabajo y aprovechando el código abierto de la plataforma Arduino, logra una sencilla y adecuada interacción de la tarjeta Mega 2560 empleada para la captura de datos, con el programa Simulink, usada para la construcción de los algoritmos necesarios de identificación, así como su operación en tiempo real, enlazados en línea con el PLC.

Según (Vivanco, 2013), en su investigación titulada **“ANÁLISIS DE SISTEMAS DE CONTROL DE PRIMER Y SEGUNDO ORDEN USANDO LENGUAJES DE PROGRAMACIÓN MATLAB-SIMULINK”**, desarrolla un estudio minucioso de los controles automáticos dinámicos, empezando su análisis manifestando la relevancia del modelado matemático con lazos de control y la adecuación para su simulación en Matlab o Simulink. Vivanco, parte del estudio y análisis del comportamiento de los controles automáticos dinámicos y expone la importancia del manejo de esta competencia para mejorar la eficiencia y productividad en el sector industrial.

Según (Millán, 2012), en su trabajo, “**Estudio y comparativa de diferentes algoritmos adaptativos para la identificación de sistemas**”, expone una búsqueda y clasificación de diversos algoritmos adaptativos usados en la identificación de sistemas en los que se desconozca su respuesta impulsional. En el desarrollo de su proyecto, propone la comparativa de eficiencia y rapidez de convergencia recogida de los resultados conseguidos. Millán, manifiesta además los alcances de otras adecuaciones de uso de los algoritmos adaptativos tales como en la reducción de ruido o en la cancelación de interferencias.

2.2. Marco Teórico

2.2.1. Algoritmo LMS (Least Mean Square)

Según Pérez (2004, p. 139): “el algoritmo de mínimos cuadrados promediados fue propuesto por primera vez por Widrow y Hoff en 1960, y es el algoritmo de filtrado adaptativo más usado ya que realiza una simplificación del cálculo del vector gradiente posible modificando apropiadamente la función de costo (Stearms and Widrow, 1985; Widrow and Hoff, 1960)”.

Por consiguiente, “este algoritmo pertenece a la familia de algoritmos de gradiente estocástico, fundamentado en la búsqueda del gradiente descendente, el cual calcula el sentido de la máxima variación de la función de error y posteriormente, se mueve por la superficie de error en sentido negativo del gradiente apuntando hacia un mínimo local” (Pérez, 2004, p. 140).

El algoritmo LMS típico se describe en la ecuación (1):

$$W[k] = W[k - 1] - \mu \nabla \dots \dots \dots \text{ec. (1)}$$

Donde $W[k]$ es el vector de coeficientes del filtro, ∇ es el gradiente de la superficie de error cuadrático medio y μ es un parámetro constante que controla la estabilidad y velocidad de adaptación del algoritmo.

2.2.2. Apreciación general de la estructura y operación del algoritmo LMS

Según Pérez (2004, p. 145): “el algoritmo LMS es un algoritmo de filtrado lineal adaptativo que consiste de dos procesos básicos: Un proceso de filtrado, que involucra (a) calcular la salida de un filtro transversal, la cual es producida por un conjunto de valores de entrada y (b) generar una estimación del error por la comparación de la salida y la respuesta deseada”.

Un proceso adaptativo, el cual involucra el ajuste automático de los valores de los coeficientes del filtro, de acuerdo con la estimación del error. Así, que la combinación de estos dos procesos constituye un lazo de realimentación alrededor del algoritmo LMS, así como se ilustra en la Figura 1.

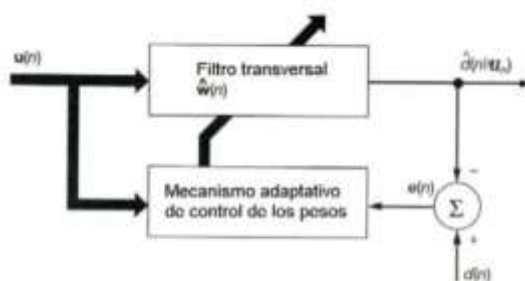


Figura 1 Diagrama de bloques de la estructura LMS
Fuente: Robbins y Monro

2.2.3. Transformada Z

Según Ogata (1996, p. 142): “es una herramienta matemática muy utilizada en el análisis y la síntesis de sistemas de control en tiempo discreto es la transformada z. El papel de la transformada z en sistemas en tiempo discreto es similar al de la transformada de Laplace en sistemas en tiempo continuo”.

Por consiguiente, “el método de la transformada Z es un método operacional muy poderoso cuando se trabaja con sistemas en tiempo discreto” (Ogata, 1996, p. 143).

A continuación, se definirá la transformada Z de una función del tiempo o de una secuencia de números.

Al considerar la transformada Z de una función del tiempo $x(t)$, solo se toman en cuenta los valores muestreados de $x(t)$, esto es, $x(0)$, $x(T)$, $x(2T)$,..., donde T es el periodo de muestreo. La transformada Z de una función del tiempo $x(t)$, donde t es positivo, o de la secuencia de valores $x(kT)$, donde k adopta valores de cero o de enteros positivos y T es el periodo de muestreo, se define mediante la siguiente ecuación:

$$X(z) = Z[x(t)] = Z[x(kT)] = \sum_{k=0}^{\infty} x(kT)z^{-k} \quad \text{ec. (2)}$$

Para la mayoría de aplicaciones en ingeniería, la transformada Z unilateral (2) tendrá una solución apropiada en forma cerrada en su región de convergencia.

Observe que cuando $X(z)$, una serie infinita en z^{-1} , converge fuera del círculo $|z| = R$, donde R se conoce como radio de convergencia absoluta. Al utilizar el método de la transformada z para resolver problemas en tiempo discreto no es

necesario especificar los valores de z para los cuales $X(z)$ converge. Por lo tanto se observa que la ecuación (3) da como resultado:

$$X(z) = x(0) + x(T)z^{-1} + x(2T)z^{-2} + \dots + x(kT)z^{-k} + \dots \quad \text{ec. (3)}$$

La ecuación (3) implica que la transformada z de cualquier función en tiempo continuo $x(t)$, puede escribirse mediante inspección, en la forma de una serie. La z^{-k} en esta serie indica la posición en el tiempo en la que se presenta la amplitud $x(kT)$. De manera contraria, si $X(z)$ está dada en la forma de una serie como la que se indicó, la transformada z inversa se puede obtener por inspección como una secuencia de la función $x(kT)$ que corresponde a los valores de $x(t)$ en los valores de tiempo respectivos.

Si la transformada está dada como el cociente de dos polinomios en Z , entonces la transformada Z inversa se puede obtener mediante varios métodos diferentes, tales como el método de la división directa, el método computacional, el método de expansión de fracciones parciales y el método de la integral de inversión.

Transformada de Laplace	Función del tiempo $f(t)$	Transformada z
1	Impulso unitario $\delta(t)$	1
$\frac{1}{s}$	Escalón unitario $u_c(t)$	$\frac{z}{z-1}$
$\frac{1}{1-e^{-Ts}}$	$\delta_r(t) = \sum_{n=0}^{\infty} \delta(t-nT)$	$\frac{z}{z-1}$
$\frac{1}{s^2}$	t	$\frac{Tz}{(z-1)^2}$
$\frac{1}{s^3}$	$\frac{t^2}{2}$	$\frac{T^2z(z+1)}{2(z-1)^3}$
$\frac{1}{s^{n+1}}$	$\frac{t^n}{n!}$	$\lim_{\alpha \rightarrow 0} \frac{(-1)^n}{n!} \frac{\partial^n}{\partial \alpha^n} \left[\frac{z}{z-e^{-\alpha T}} \right]$
$\frac{1}{s+\alpha}$	$e^{-\alpha t}$	$\frac{z}{z-e^{-\alpha T}}$
$\frac{1}{(s+\alpha)^2}$	$te^{-\alpha t}$	$\frac{Tze^{-\alpha T}}{(z-e^{-\alpha T})^2}$
$\frac{\alpha}{s(s+\alpha)}$	$1 - e^{-\alpha t}$	$\frac{(1-e^{-\alpha T})z}{(z-1)(z-e^{-\alpha T})}$
$\frac{\omega}{s^2+\omega^2}$	$\text{sen } \omega t$	$\frac{z \text{ sen } \omega T}{z^2 - 2z \cos \omega T + 1}$
$\frac{\omega}{(s+\alpha)^2+\omega^2}$	$e^{-\alpha t} \text{ sen } \omega t$	$\frac{ze^{-\alpha T} \text{ sen } \omega T}{z^2 - 2ze^{-\alpha T} \cos \omega T + e^{-2\alpha T}}$
$\frac{s}{s^2+\omega^2}$	$\text{cos } \omega t$	$\frac{z(z - \cos \omega T)}{z^2 - 2z \cos \omega T + 1}$
$\frac{s+\alpha}{(s+\alpha)^2+\omega^2}$	$e^{-\alpha t} \text{ cos } \omega t$	$\frac{z^2 - ze^{-\alpha T} \cos \omega T}{z^2 - 2ze^{-\alpha T} \cos \omega T + e^{-2\alpha T}}$

Figura 2 Transformada Z

Fuente: Katsuhiko Ogata

2.2.4. Función de transferencia

Según Valdivia (2012, p. 36): “la función de transferencia de un sistema lineal invariante con el tiempo se define como la transformada de Laplace de la respuesta al impulso, con todas las condiciones iniciales iguales a cero”.

Suponga que $G(s)$ denota la función de transferencia de un sistema con una entrada y una salida, con una entrada $u(t)$ y salida $y(t)$ y respuesta del impulso $g(t)$. Entonces la función de transferencia $G(s)$ se define como:

$$G(s) = L[g(t)] \dots\dots ec. (4)$$

La función de transferencia $G(s)$ se relaciona con la transformada de Laplace de la entrada y la salida a través de la siguiente relación:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} \dots\dots\dots ec. (5)$$

2.2.5. Características del Microcontrolador

El PIC16F877, tiene distintas características, las cuales las podemos obtener de la hoja de datos que brinda el proveedor. A continuación, detallamos las características (ver figura 1).

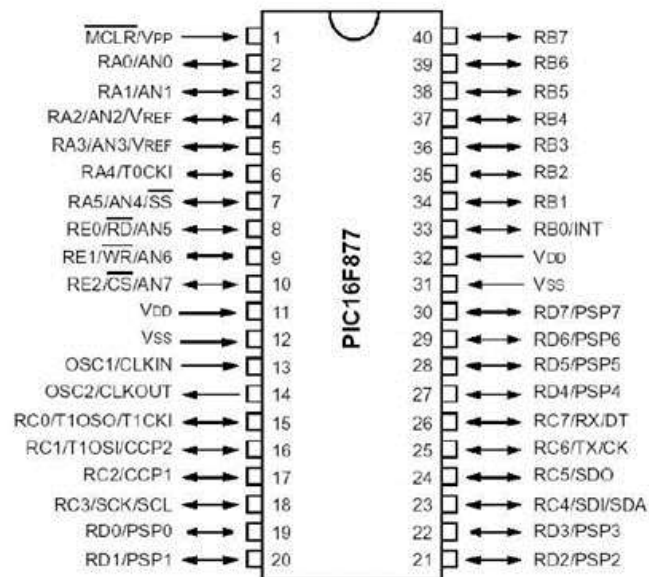


Figura 3 PIC16F877

Fuente: Hoja de datos PIC16F877 – MICROCHIP

2.3. Marco conceptual

Filtro adaptivo LMS: El filtro adaptivo LMS ('least mean square') es un canal de tipo abeto (reacción de motivación limitada) y se utiliza para disminuir la abundancia del sonido del hardware. Muñoz (2007, p. 90).

Microcontrolador:

Para (Palacios, 2004, p.1) el microcontrolador es un chip programable que incluye todo aquello que sea imprescindible para dirigir la operatividad de una tarea dada. El microcontrolador suele necesitar muy pocos componentes adicionales. Los sistemas que trabajan con microcontroladores, obligatoriamente tienen que contar con un área de memoria, por lo general interna, donde se guarda el código que controla la operatividad del microcontrolador. Este programa, una vez compilado y guardado permite realizar las tareas asignadas cada vez que sea necesario.

Una de las mejores ventajas en el uso de microcontroladores en el diseño de sistemas, es la reducción de espacio, así como el volumen de componentes adicionales. De esta forma al reducir la cantidad de elementos empleados, reduce la posibilidad de ocurrencia de fallos. La reducción del volumen y el peso de los sistemas también es otra de las conveniencias. (Palacios, 2004, p. 1).

2.4. Hipótesis

El diseño del algoritmo LMS como identificador de procesos en plataforma de 8 bits permite la determinación del modelo de la planta de primer y segundo orden.

2.5. Variables e indicadores

Variable independiente:

Algoritmo LMS como identificador de procesos en Plataforma de 8 bits

Variable dependiente:

Modelo de Sistemas de primer y segundo orden

Operacionalización de variables

Tabla 1 *Operacionalización de la variable independiente*

VARIABLE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	INDICADORES	TIPO	TÉCNICA	INSTRUMENTO
Algoritmo LMS como identificador de procesos en Plataforma de 8 bits	Conjunto de pasos que permiten la identificación de procesos usando microcontroladores de 8 bits.	Número de coeficientes. Factor de convergencia	escalar de escalar	Observación	Reporte de simulación

Fuente: elaboración propia

Tabla 2 *Operacionalización de la variable dependiente*

VARIABLE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	INDICADORES	TIPO	TÉCNICA	INSTRUMENTO
Modelo de Sistemas de primer y segundo orden	Modelamiento de la planta para sistemas LTI.	Respuesta transitoria Tiempo de atenuación Frecuencia natural	Escalar Segundos rad/s	Observación	Reporte de simulación

Fuente: Elaboración propia

III. METODOLOGÍA EMPLEADA

3.1. Tipo y nivel de investigación

Tipo de investigación

Aplicada: A partir de conocimientos establecidos se dará solución a un problema planteado

Nivel de investigación

Explicativo

3.2. Población y muestra de estudio

Población

Sistemas de primer y segundo orden

Muestra

Sistemas de primer y segundo orden

3.3. Diseño de investigación



X: Algoritmo LMS como identificador de procesos en Plataforma de 8 bits

F: Sistema de primer o segundo orden

Y: modelo de la planta

3.4. Técnicas e instrumentos de investigación

Observación: Consiste en observar fenómenos o hechos con el fin de obtener determinada información necesaria para la investigación.

Reportes de simulación: Permite recrear situaciones o establecer la factibilidad de un experimento.

➤ Reporte de diseño.

Mediante una tabla obtendremos datos de las siguientes variables:

- Respuesta en régimen permanente.
- Función de transferencia discreta
- Respuesta transitoria
- Tiempo de atenuación
- Frecuencia natural

Algoritmo LMS como identificador de Procesos.

En la figura 4 se muestra un filtro adaptativo usado como identificador de procesos en él está implementado un algoritmo LMS. El cual básicamente se refiere a un filtro de respuesta impulsiva finita (FIR) $y(k) = \sum_{i=1}^N a_i u(k - n + 1)$

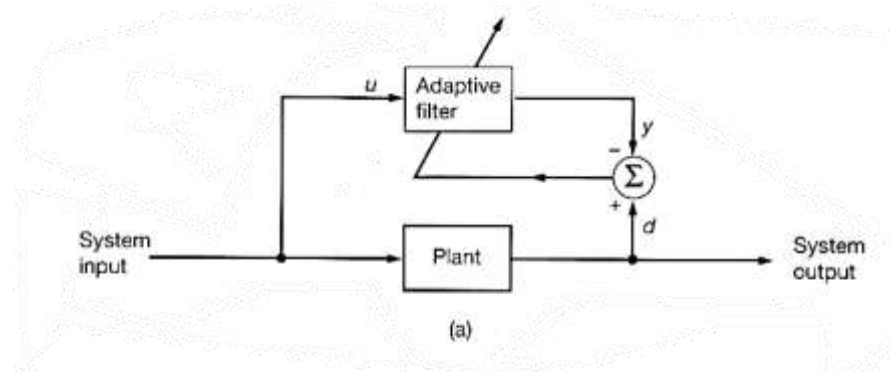


Figura 4 Filtro adaptativo
Fuente: Robbins y Monro

El cálculo de los coeficientes está dado por una función de minimización.

$$a_0(k) = a_0(k-1) - \gamma 2e(k)r_2(k-0)$$

$$a_1(k) = a_1(k-1) - \gamma 2e(k)r_2(k-1)$$

$$a_2(k) = a_2(k-1) - \gamma 2e(k)r_2(k-2)$$

$$\vdots a_{N-1}(k) = a_{N-1}(k-1) - \gamma 2e(k)r_2(k+1-N)$$

Donde:

γ es llamado factor de convergencia

$e(k)$ es llamado error del sistema

$r_2(k) = u(k)$ es la señal de excitación a la planta

El algoritmo para la identificación de procesos esta dado por la siguiente secuencia:

$$d(k) = Ch0(k)$$

$$u(k) = r_2(k) = Ch1(k)$$

$$e(k) = Ch0(k) - y(k)$$

A. Implementar una interrupción cada T mS

B. Definir los coeficientes $a_{0i}, a_{1i}, a_{2i}, a_{3i}, a_{4i}, a_{5i} \dots a_n = 0$

Desplazar los datos de los coeficientes.

$$a_{0f} = a_{0i}; a_{1f} = a_{1i}; \dots a_{5f} = a_{5i} \dots a_{nf} = a_{ni}$$

C. Desplazar los valores del canal 1 .

$$r_2(n) = r_2(n-1)$$

$$r_2(n-1) = r_2(n-2)$$

\vdots

$$r_2(3) = r_2(2)$$

$$r_2(2) = r_2(1)$$

$$r_2(1) = r_2(0)$$

D. Capturan $r_2(0) = ch1$.

E. Calculamos $y(k) = a_{0f}r_2(0) + a_{1f}r_2(1) + a_{2f}r_2(2) + a_{3f}r_2(3) +$

$$a_{4f}r_2(4) + a_{5f}r_2(5) \dots a_{nf}r_2(n)$$

F. Calculamos el error $e(k) = ch0 - y(k)$

G. Actualizar los coeficientes.

$$a_{0i} = a_{0f} + \gamma e(k)r2(0)$$

$$a_{1i} = a_{1f} + \gamma e(k)r2(1)$$

$$a_{2i} = a_{2f} + \gamma e(k)r2(2)$$

$$a_{3i} = a_{3f} + \gamma e(k)r2(3)$$

$$a_{4i} = a_{4f} + \gamma e(k)r2(4)$$

$$a_{5i} = a_{5f} + \gamma e(k)r2(5)$$

⋮

$$a_{ni} = a_{nf} + \gamma e(k)r2(n)$$

IV. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

4.1. Respuesta Estacionaria.

Usando un modelo de planta con polo en $s = -1$ y una excitación de entrada a la planta de $2.5v + 2v \sin(2\pi t)$

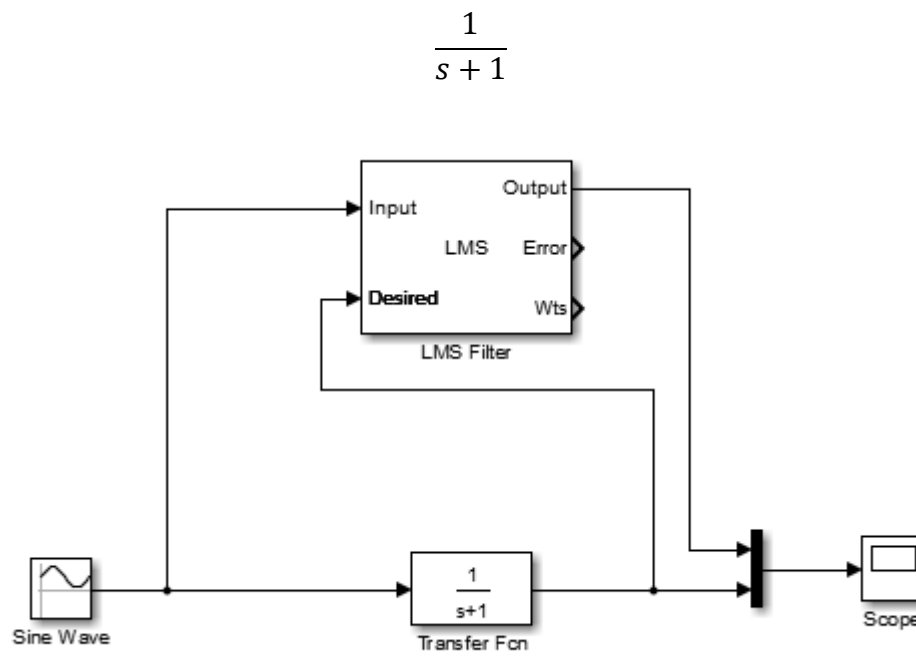


Figura 5 modelo de planta con $s=-1$

Fuente: Elaboración propia

Configuración de la señal de entrada:

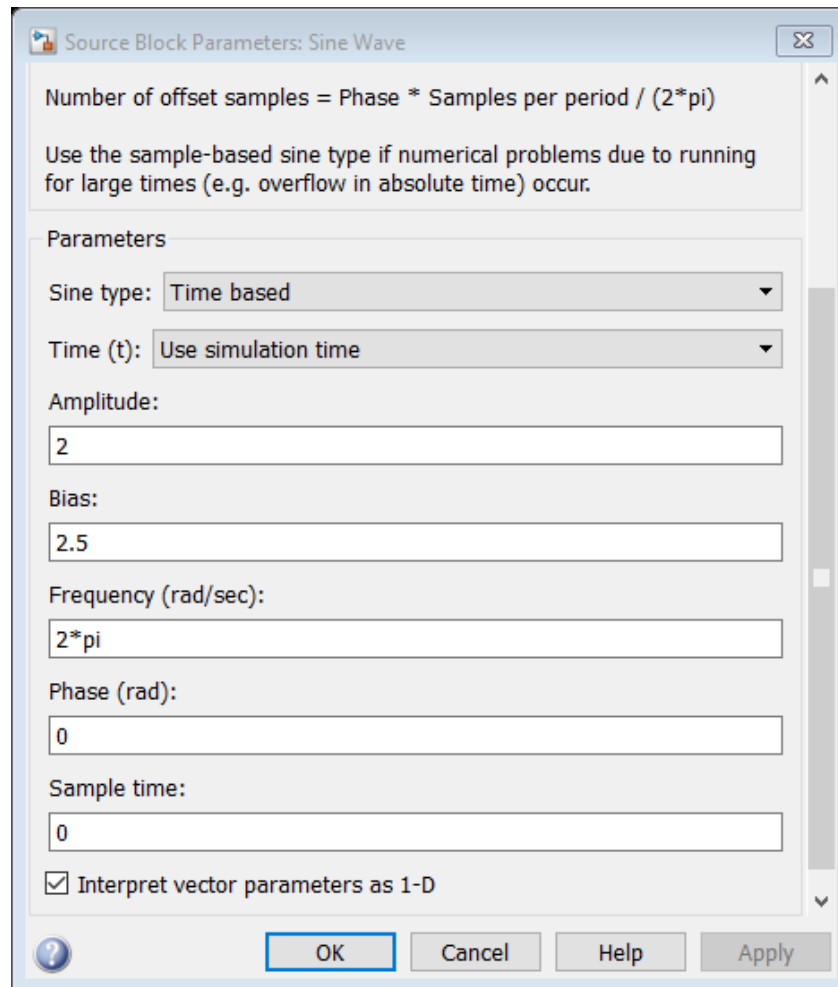


Figura 6 Configuración de la señal de entrada

Fuente: Elaboración propia

4.1.1. Configuración del bloque LMS. Con 6 coeficientes y un factor de convergencia de 0.1

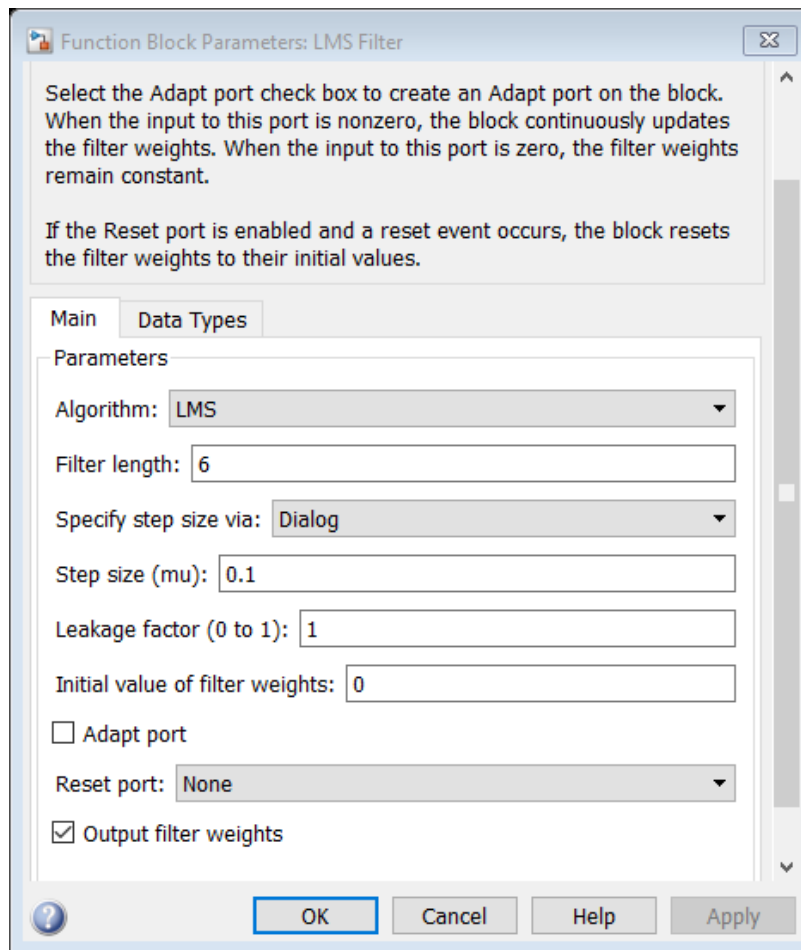


Figura 7 Configuración del bloque LMS para un factor de convergencia de 0.1

Fuente: Elaboración propia

Repuesta del sistema.

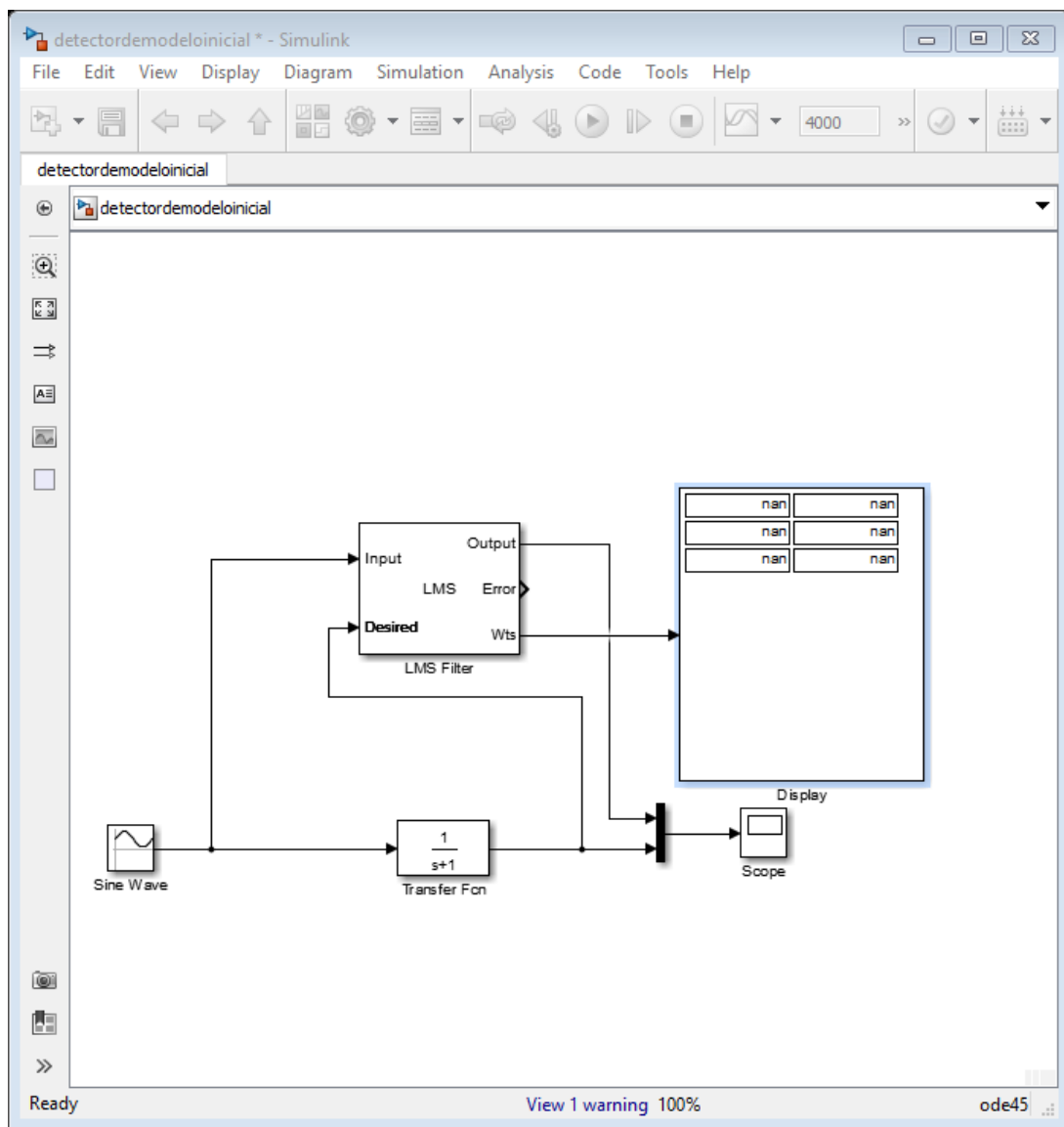


Figura 8 Respuesta del sistema

Fuente: Elaboración propia

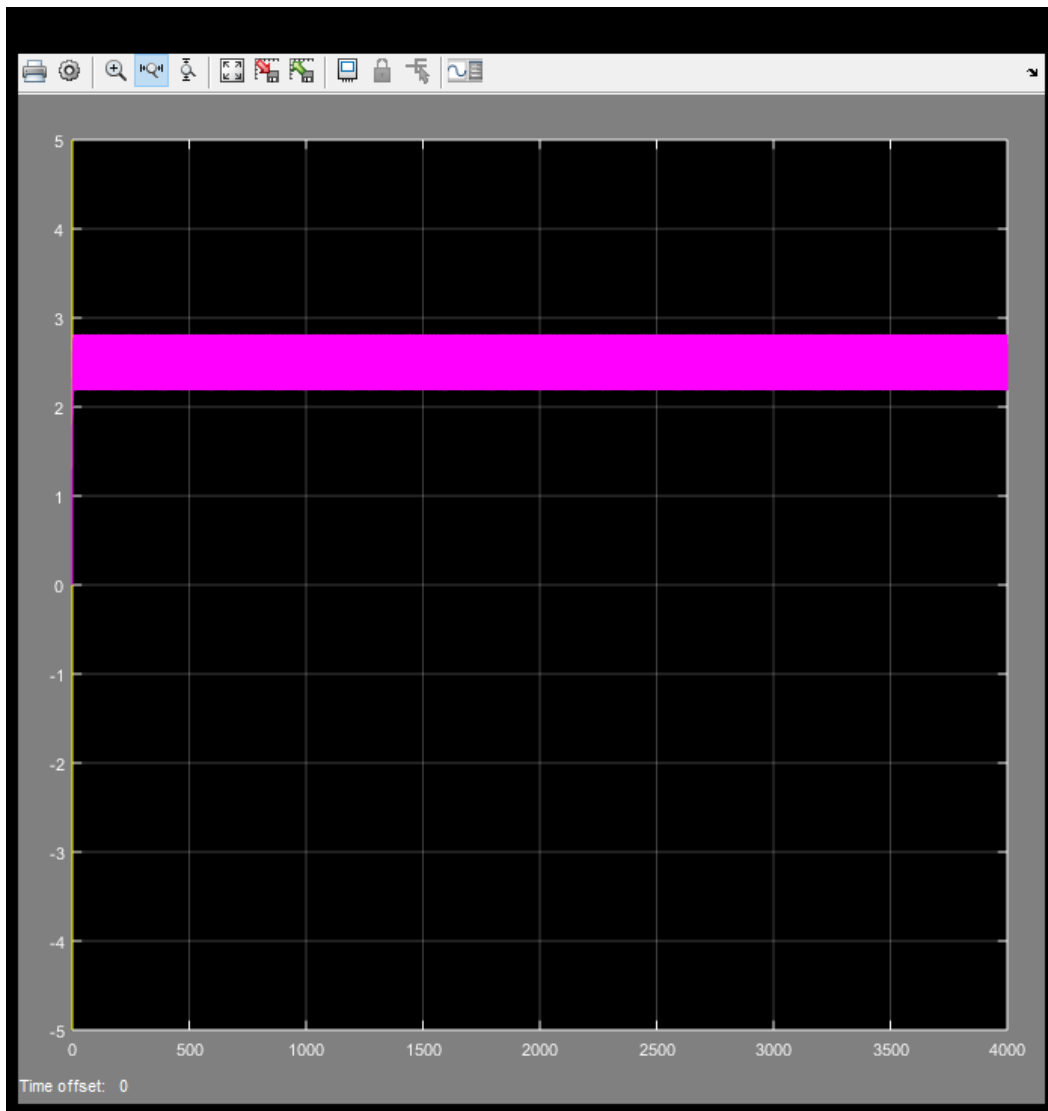


Figura 9 Respuesta del sistema en un tiempo de 4000s

Fuente: Elaboración propia

Se observa que un tiempo de 4000 segundos el sistema no logra identificar al sistema.

4.1.2. Cambio de factor de convergencia a 0.01

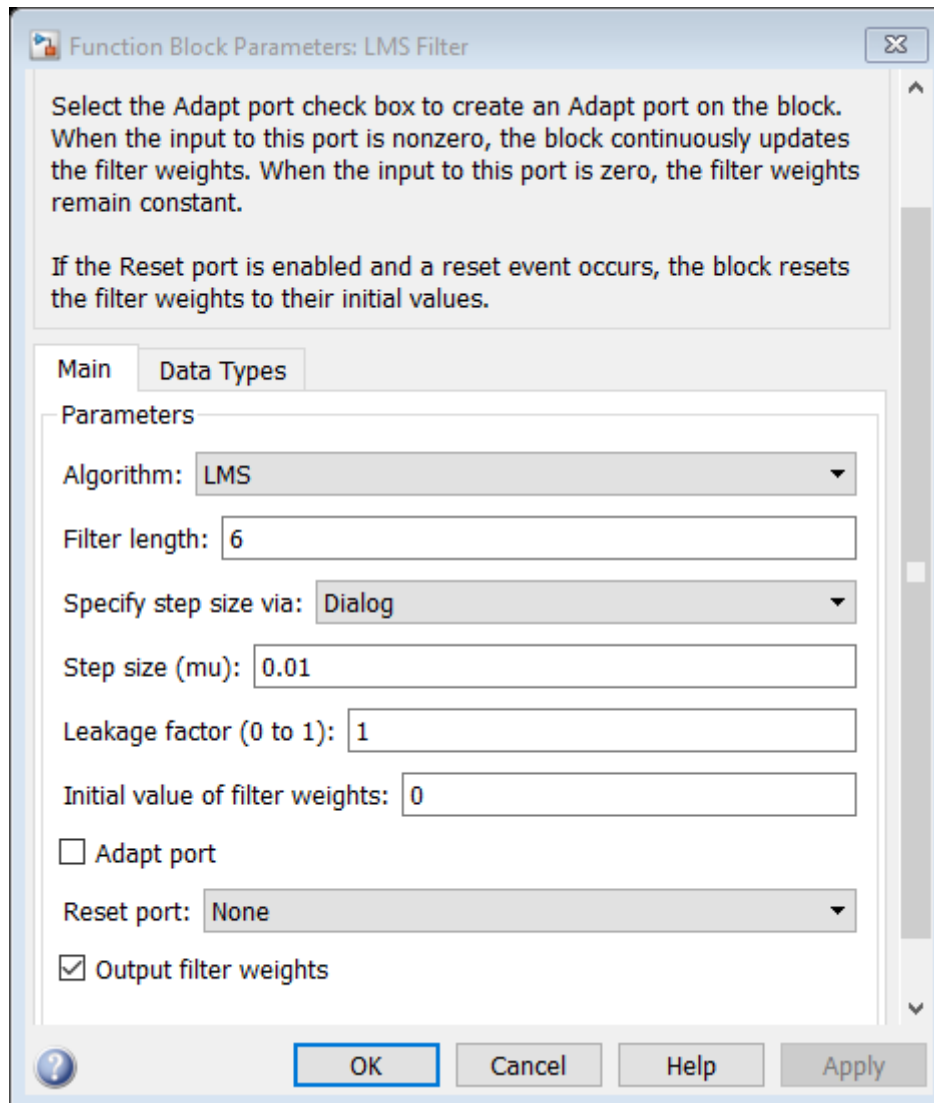


Figura 10 Configuración del bloque LMS para un factor de convergencia de 0.01

Fuente: Elaboración propia

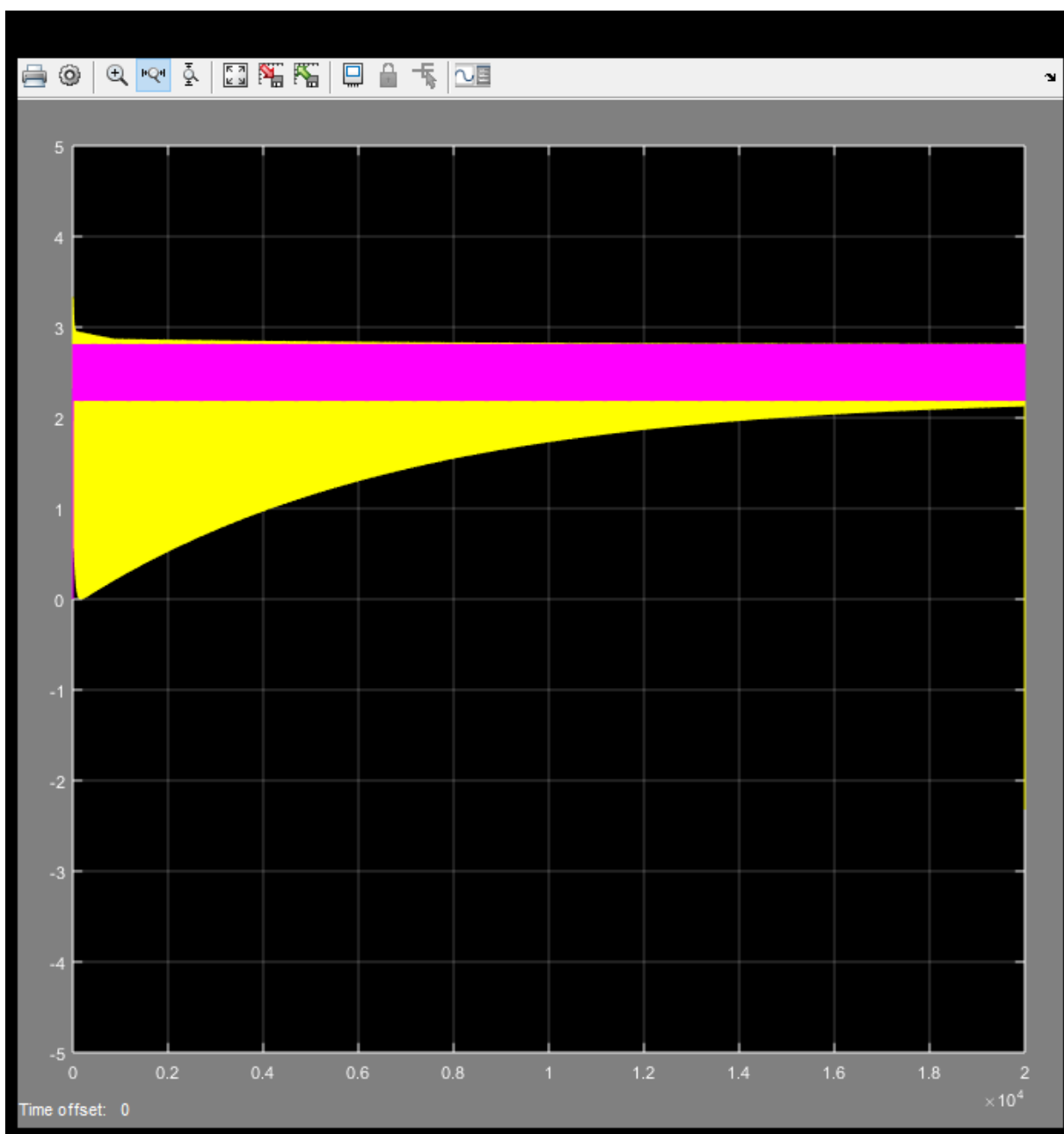


Figura 11 Respuesta del sistema en un tiempo de 20000s

Fuente: Elaboración propia

Tiempo de simulación 20000 segundos

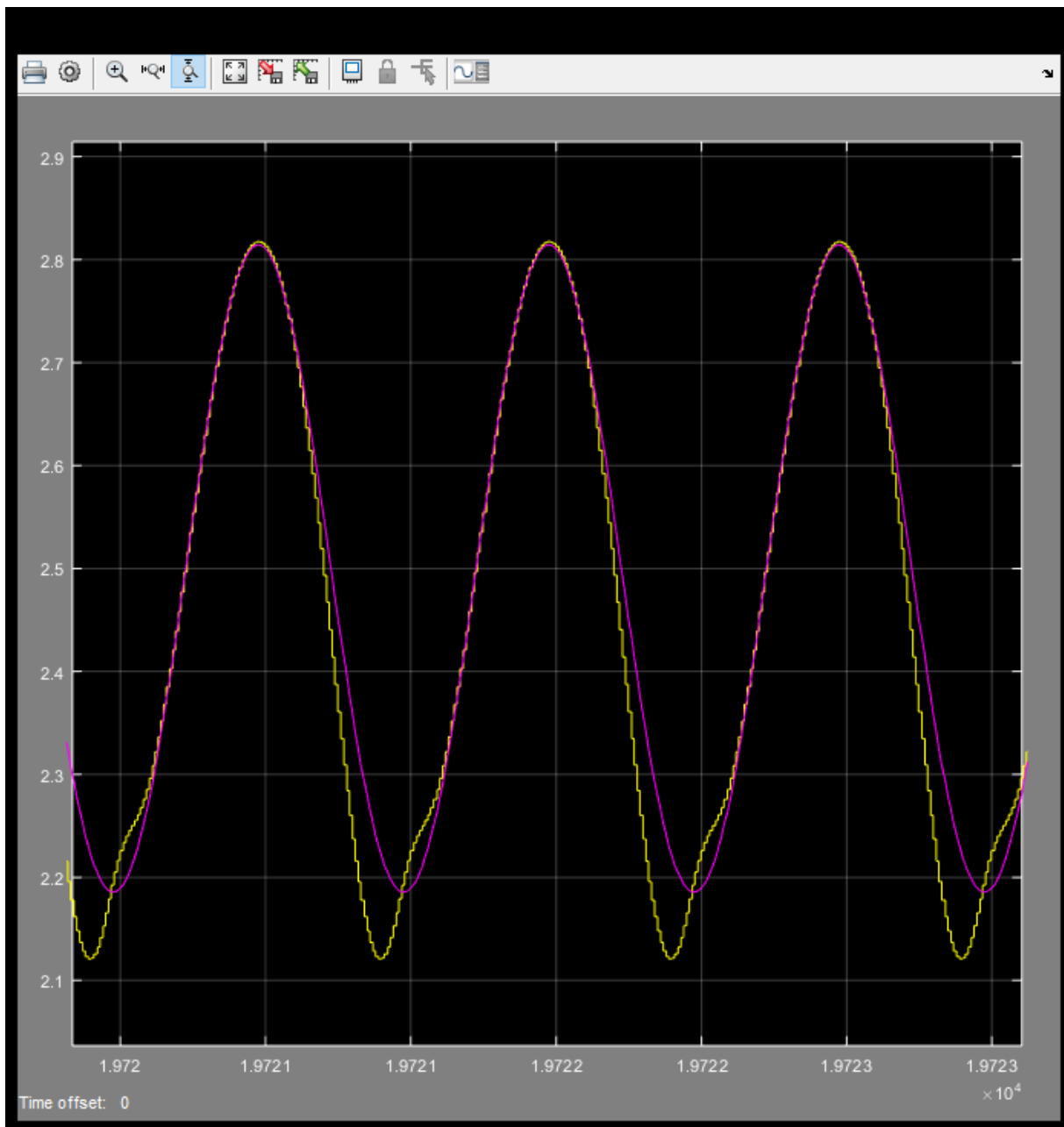


Figura 12 Señal con error en la identificación

Fuente: Elaboración propia

La señal no es idéntica tiene error en la identificación.

4.1.3. Cambio de factor de convergencia a 0.001

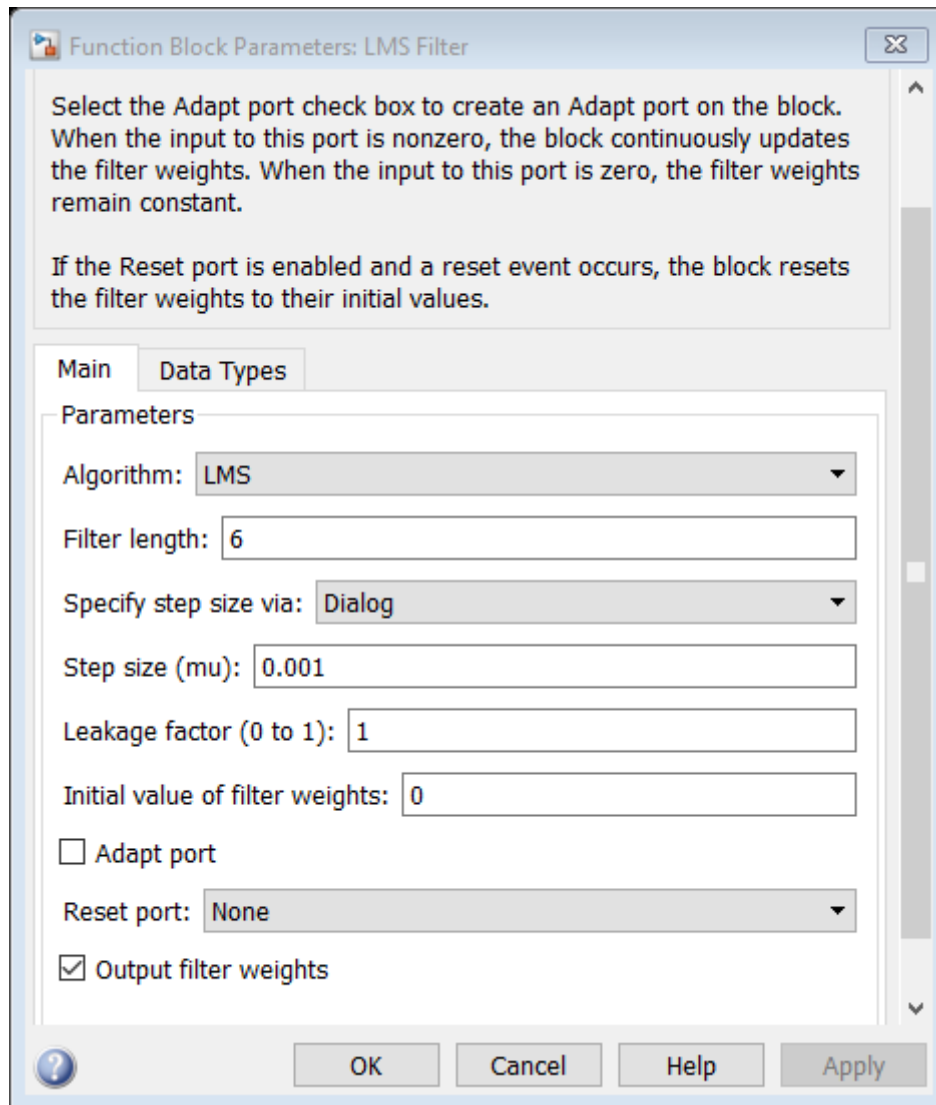


Figura 13 Configuración del bloque LMS para un factor de convergencia de 0.001

Fuente: Elaboración propia

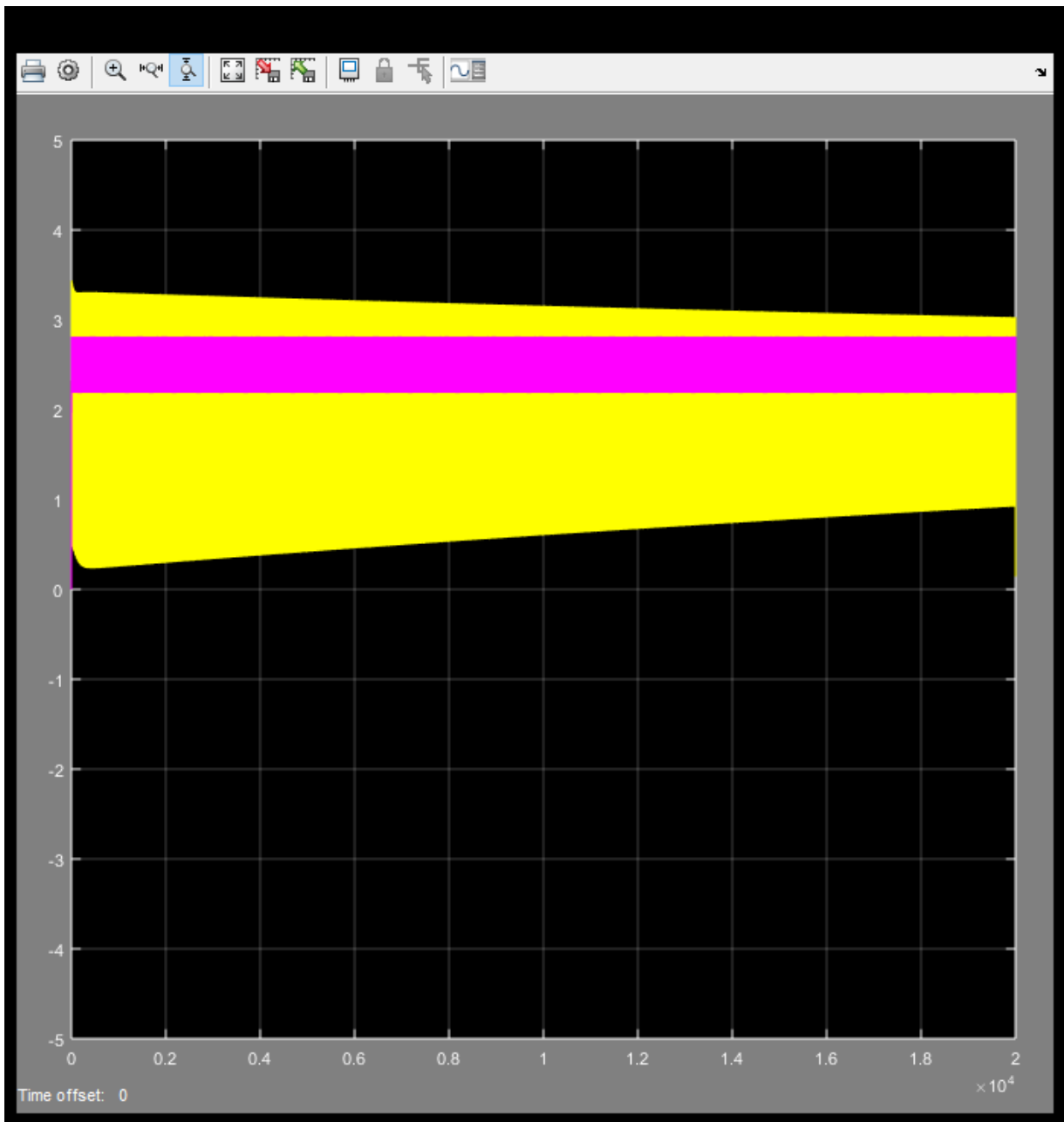


Figura 14 Respuesta del sistema para un tiempo de 20000s

Fuente: Elaboración propia

Tarda más de 20000 segundos en estabilizarse.

4.1.4. Cambio de factor de convergencia a 0.001 y número de coeficientes a 10

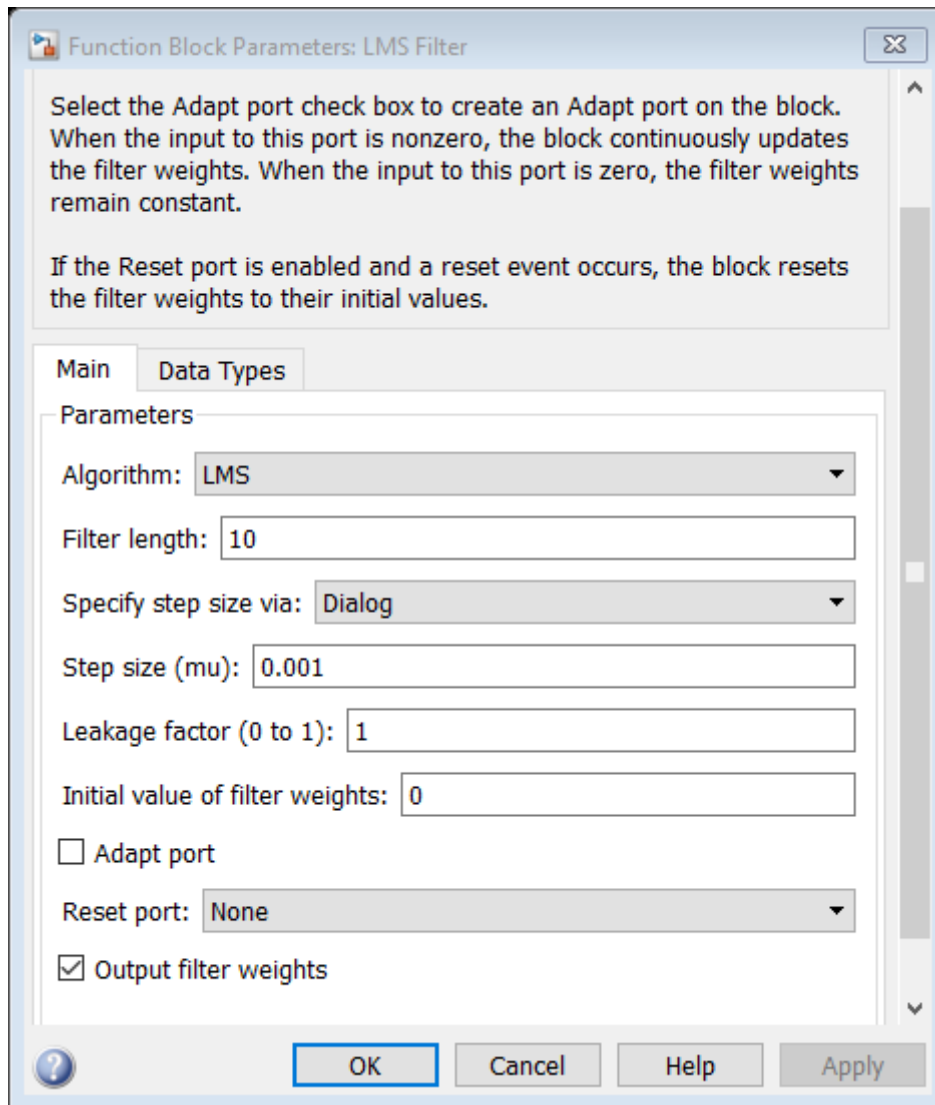


Figura 15 Configuración del bloque LMS para un factor de convergencia de 0.001 y número de coeficientes a 10

Fuente: Elaboración propia

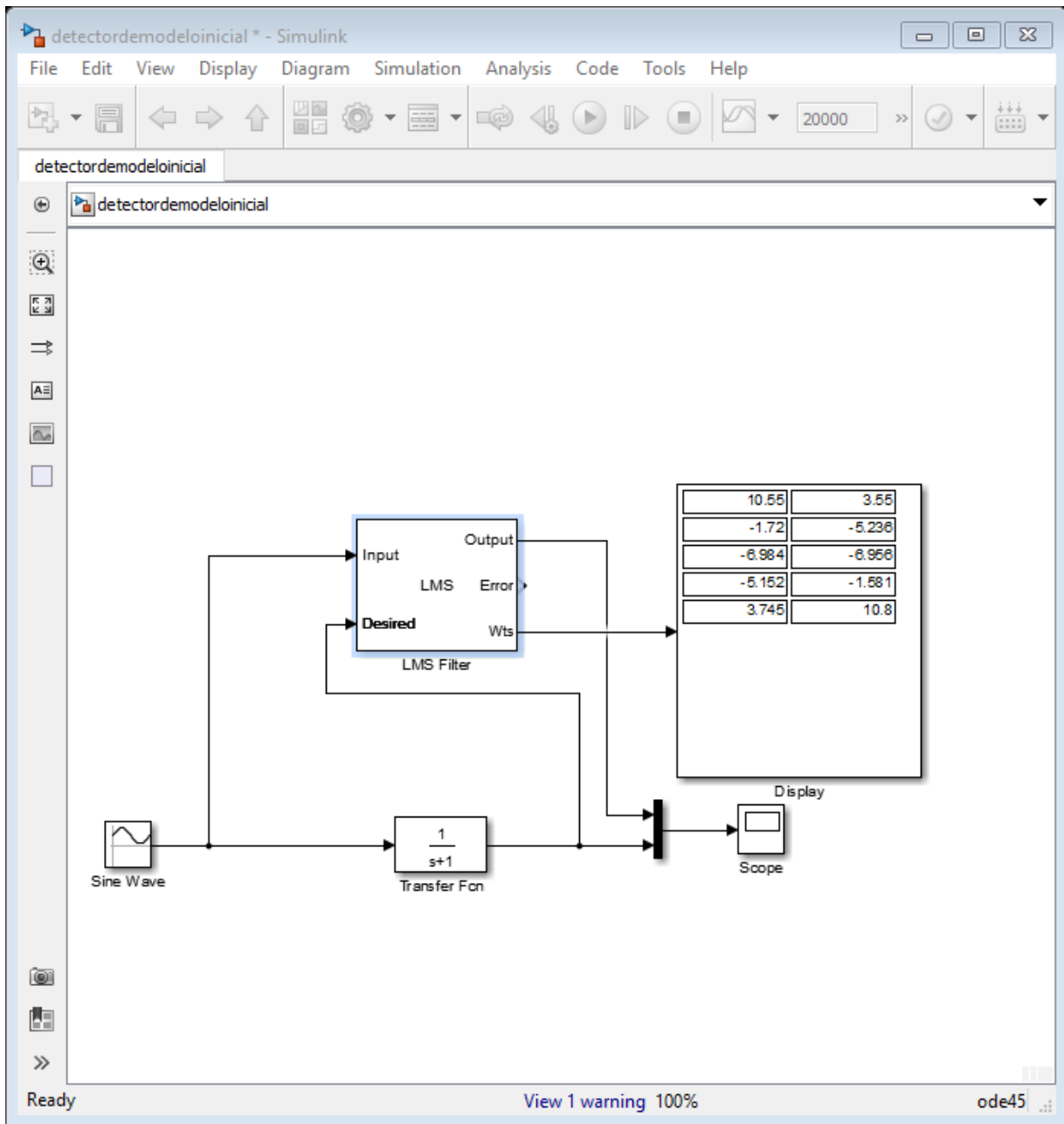


Figura 16 Configuración del sistema en simulink

Fuente: Elaboración propia

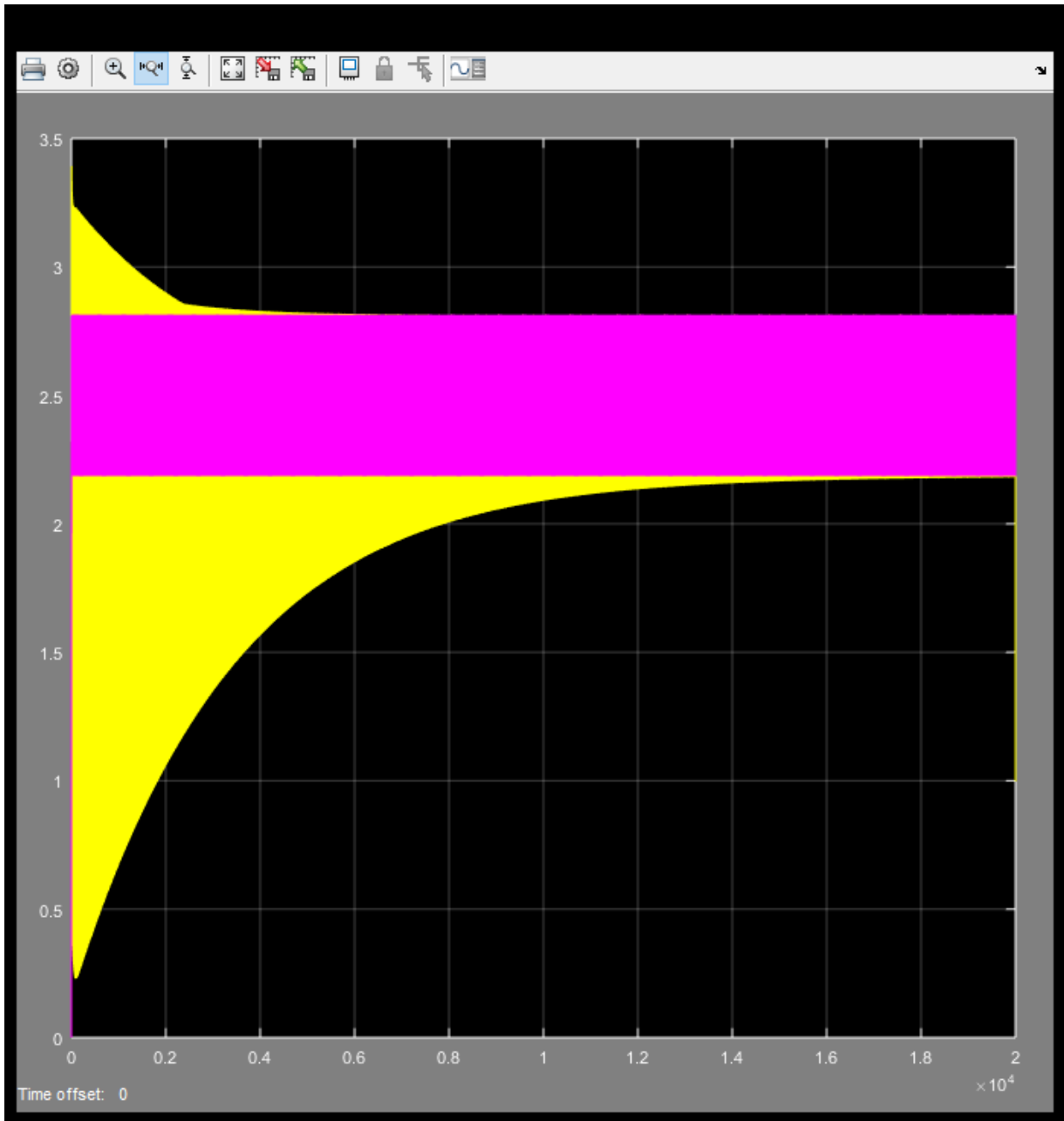


Figura 17 Respuesta del sistema para un factor de convergencia de 0.001 y número de coeficientes a 10

Fuente: Elaboración propia

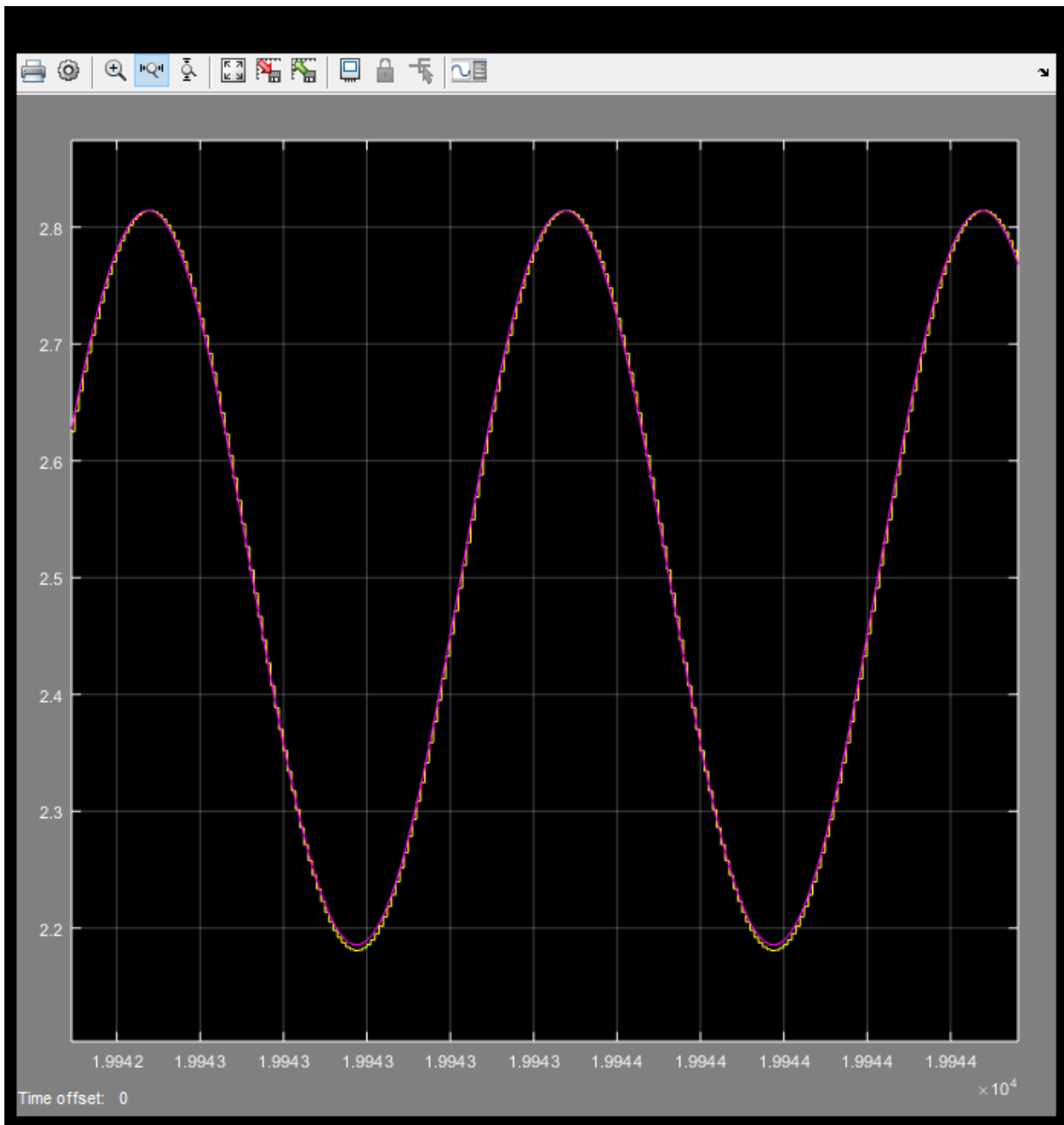


Figura 18 Respuesta del sistema en un tiempo de 14000s

Fuente: Elaboración propia

Se observa que el sistema se estabiliza en aproximadamente alrededor de 14000 segundos que en minutos seria $\frac{1400}{6} =$

4.1.5. Cambio de factor de convergencia a 0.01 y número de coeficientes a 10

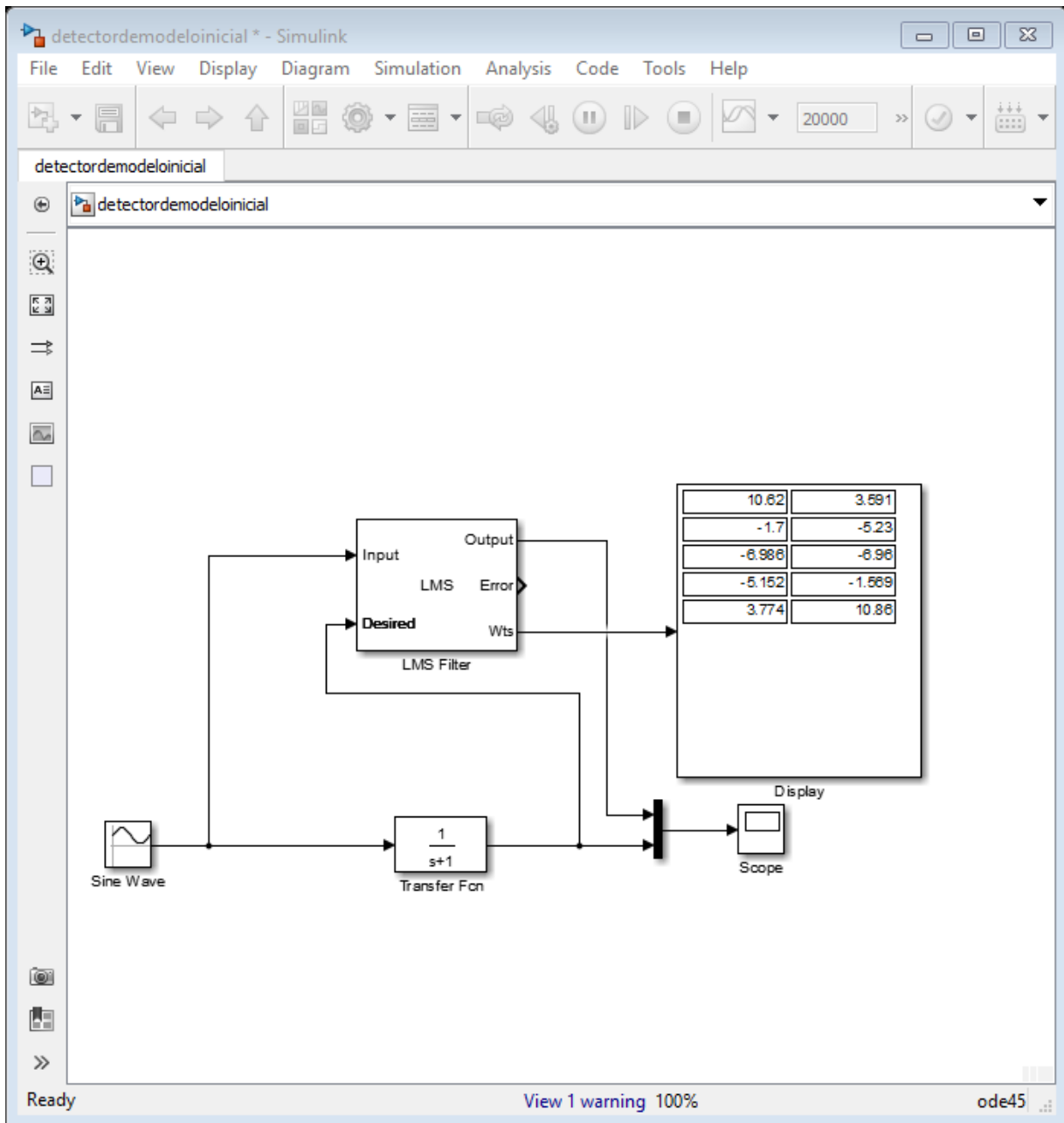


Figura 19 Configuración del sistema para un factor de convergencia a 0.01

Fuente: Elaboración propia

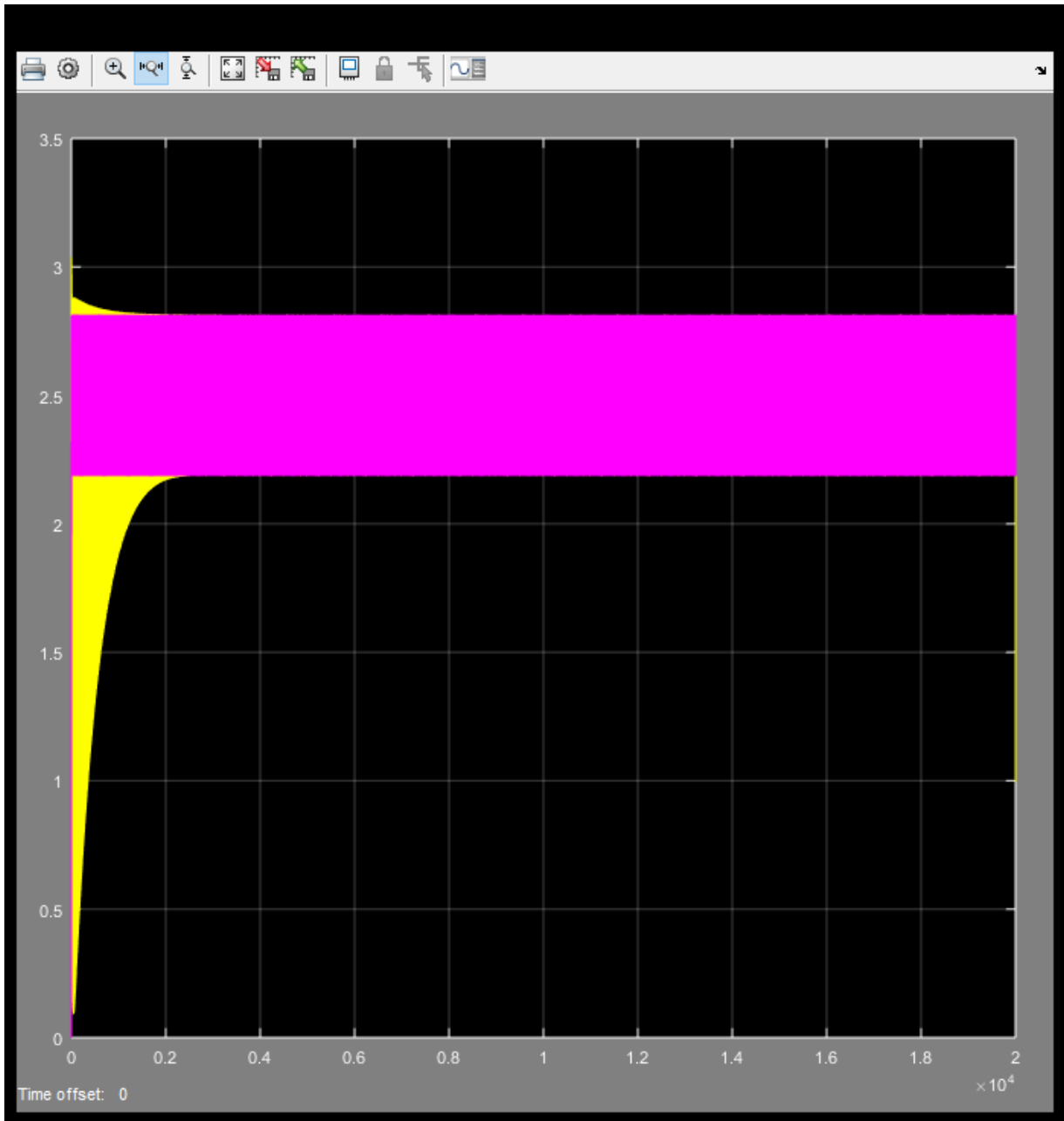


Figura 20 Tiempo de estabilización para un factor de convergencia de 0.01

Fuente: Elaboración propia

Tiempo de estabilización aproximadamente 2280 segundos $\frac{228}{6}$ minutos

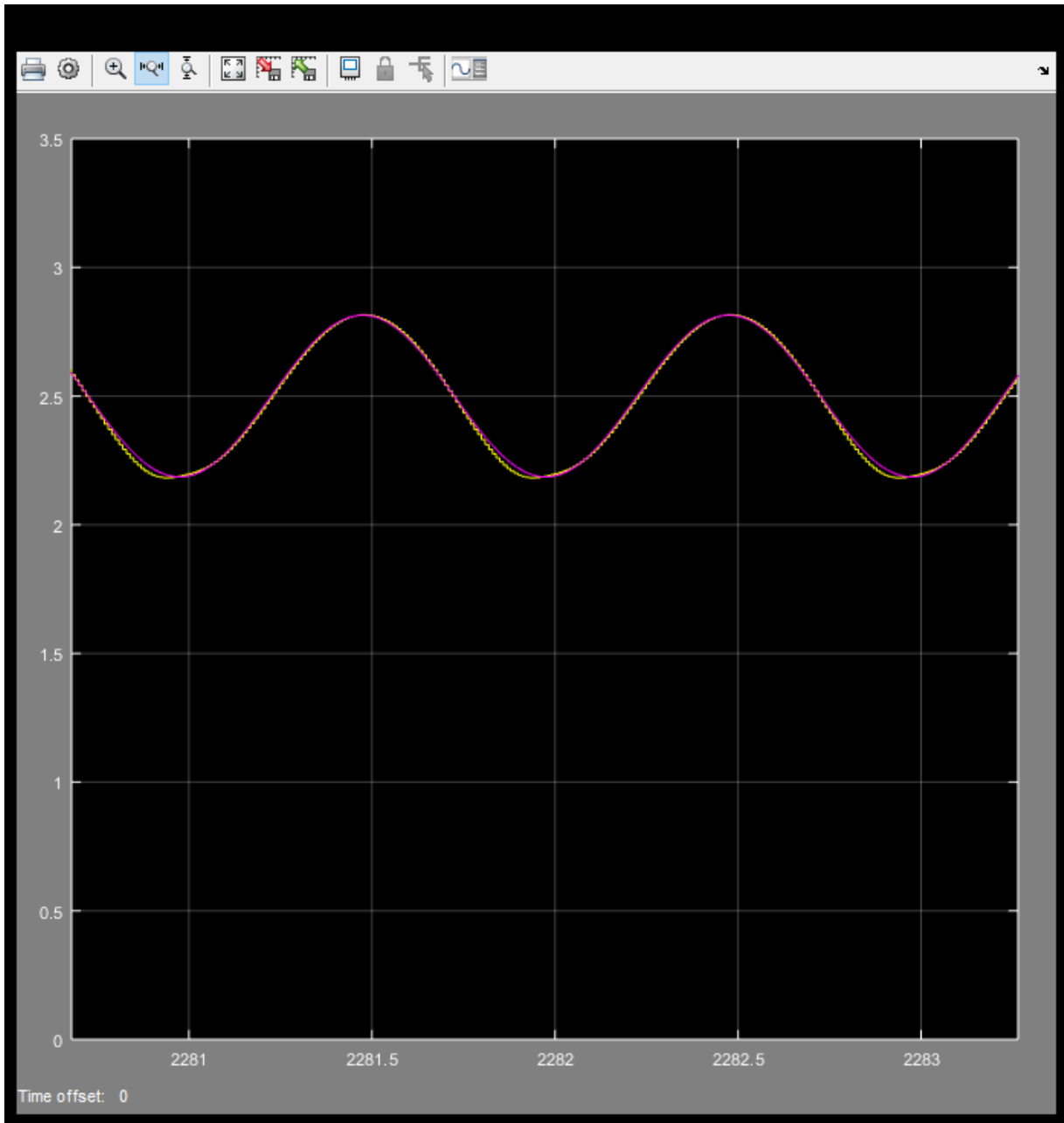


Figura 21 Respuesta del sistema para un factor de convergencia a 0.01

Fuente: Elaboración propia

4.1.6. Cambio de factor de convergencia a 0.015 y número de coeficientes a 10

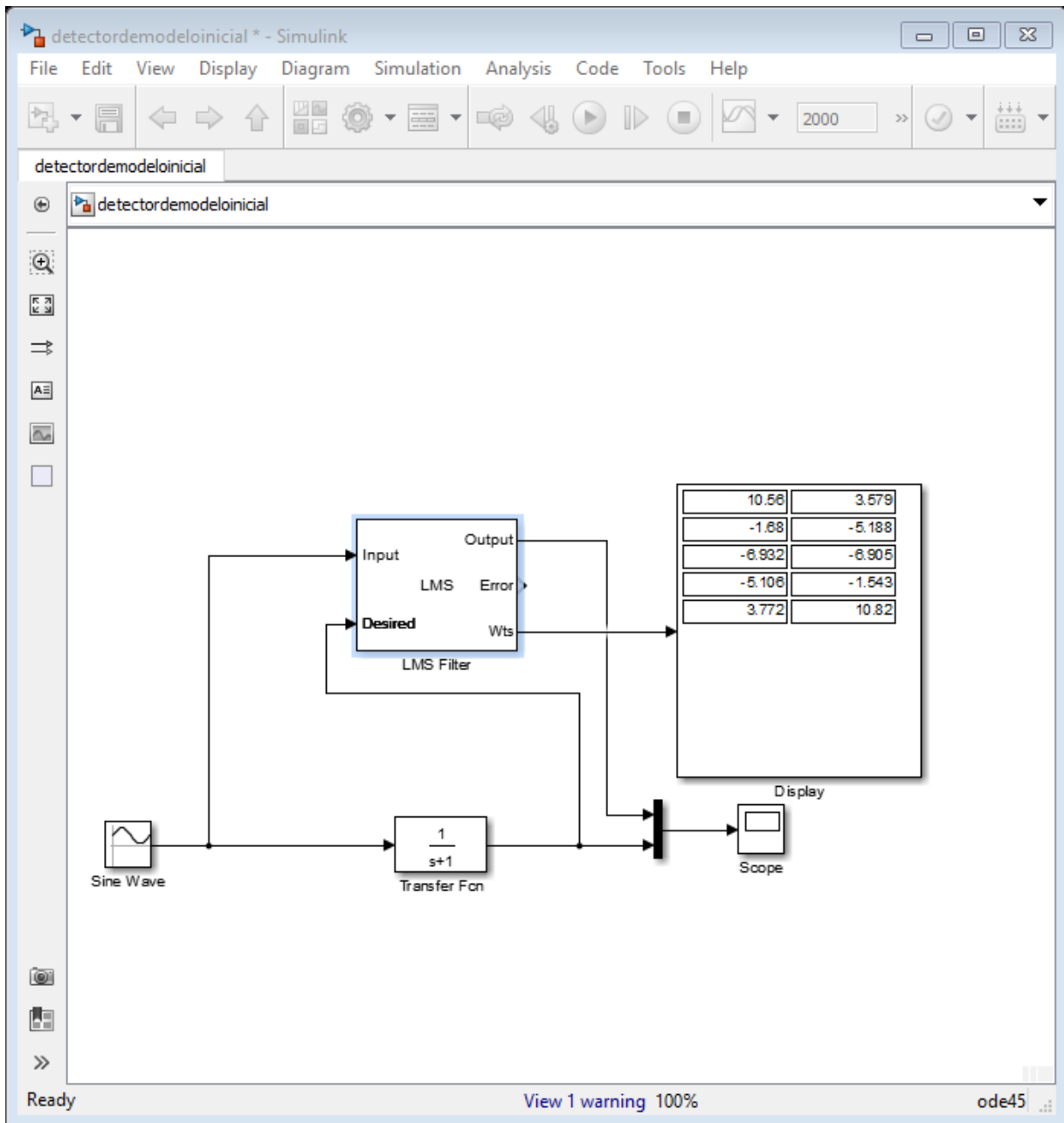


Figura 22 Configuración del sistema en simulink para factor de convergencia a 0.015

Fuente: Elaboración propia

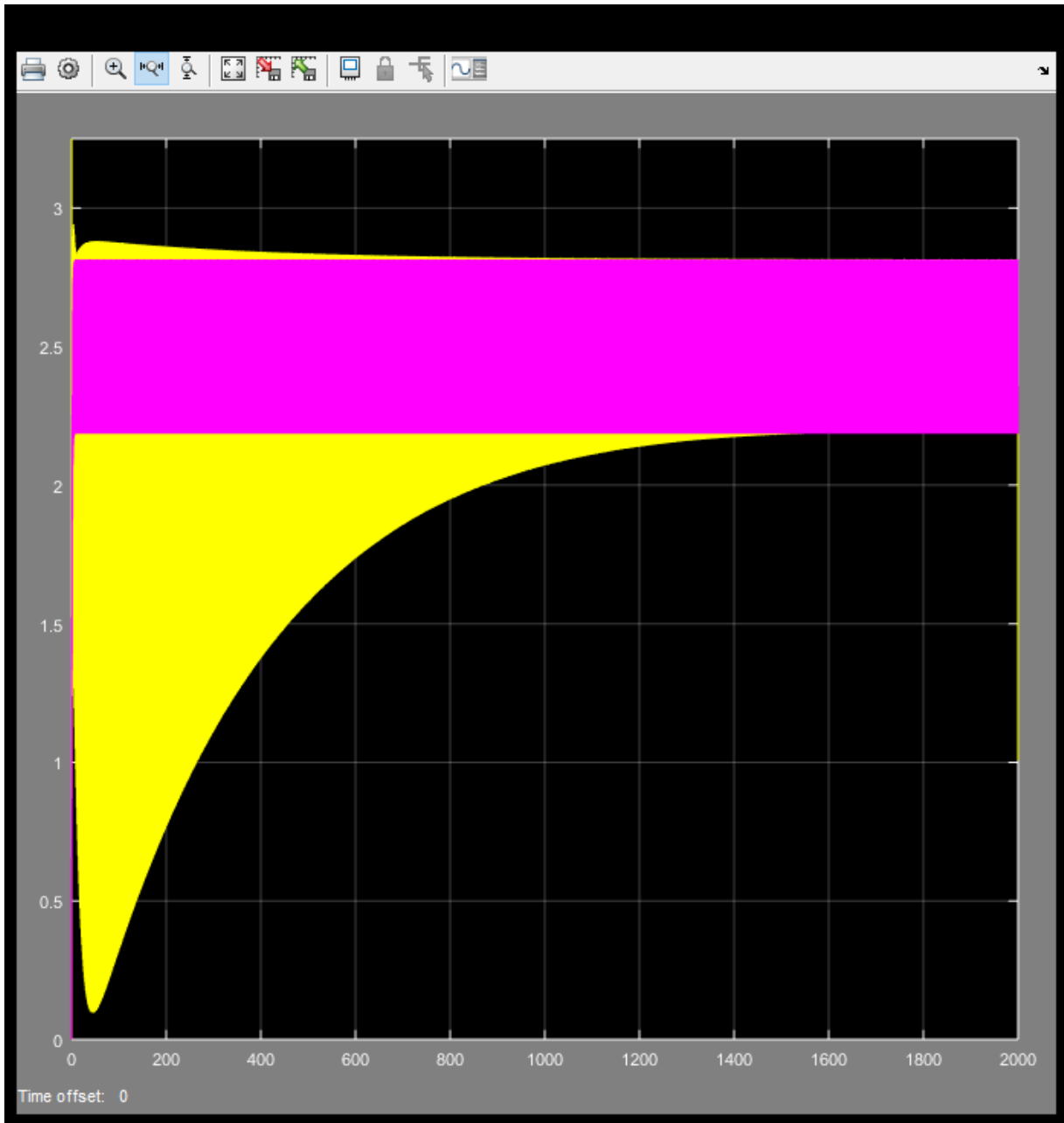


Figura 23 Tiempo de estabilización para un factor de convergencia de 0.015

Fuente: Elaboración propia

Se estabiliza en 1500 segundos $\frac{150}{6}$ minutos

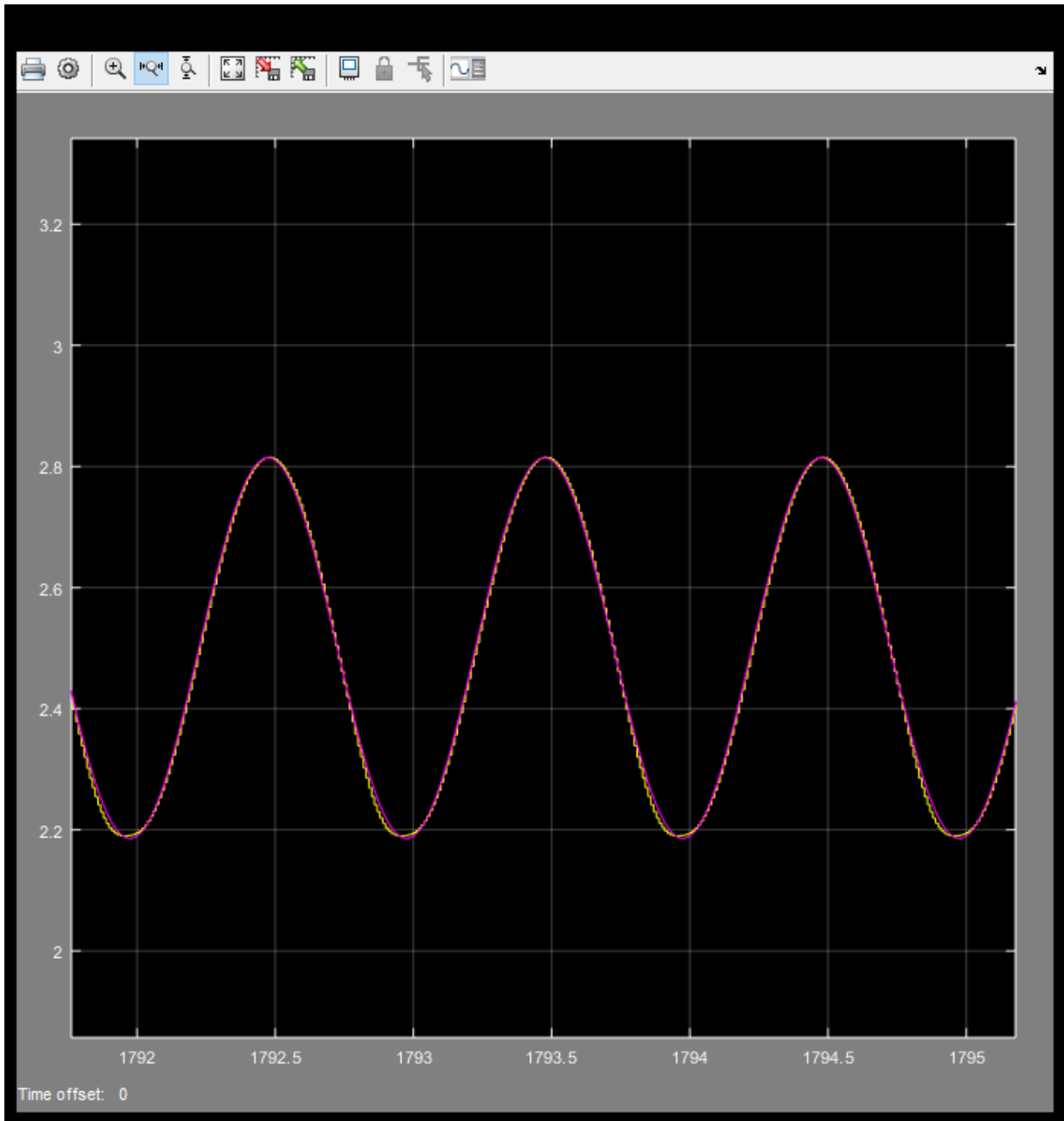


Figura 24 Respuesta del sistema para un factor de convergencia de 0.015

Fuente: Elaboración propia

4.1.7. Cambio de factor de convergencia a 0.02 y número de coeficientes a 10

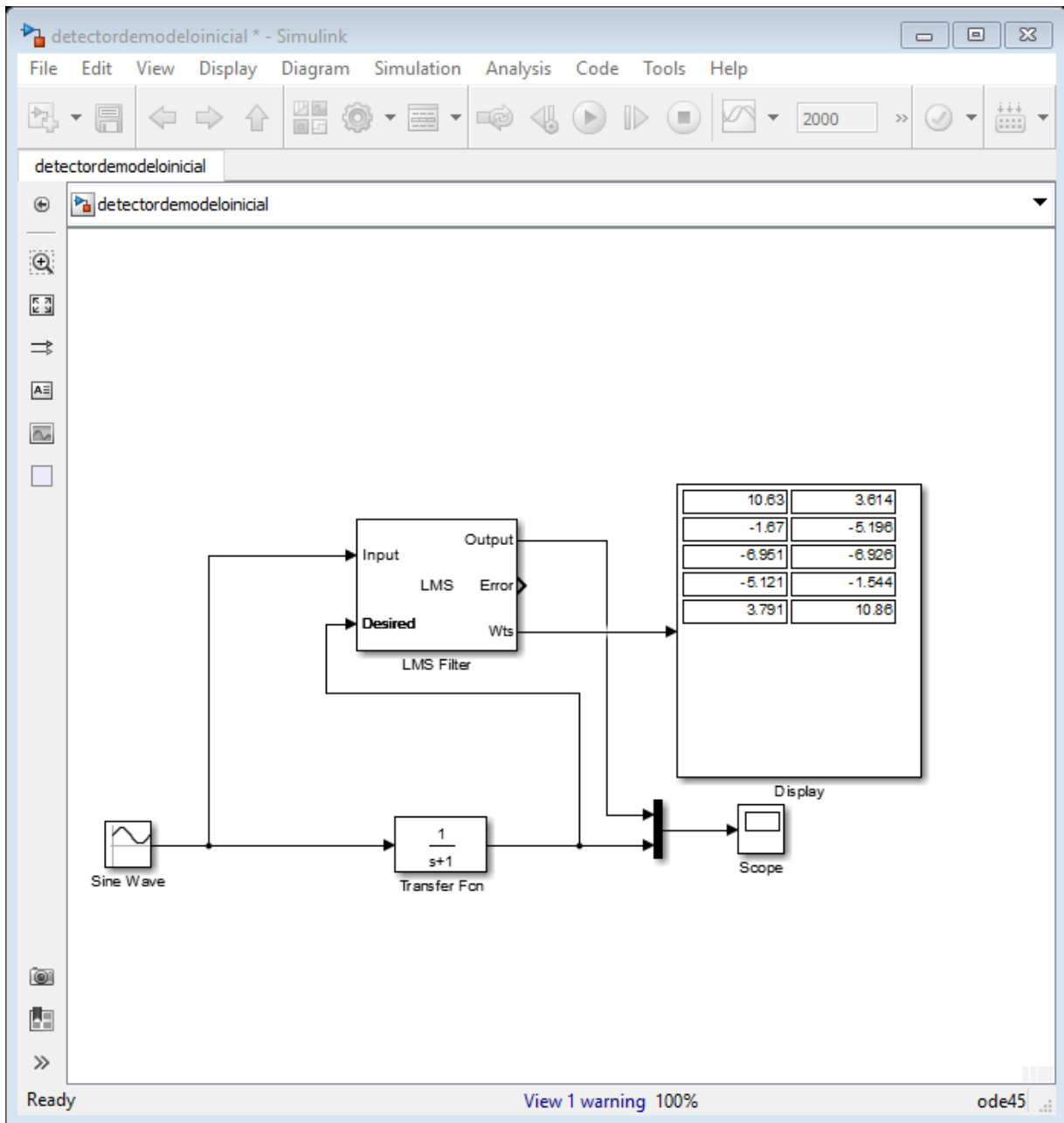


Figura 25 Configuración del sistema en simulink para un factor de convergencia de 0.02

Fuente: Elaboración propia

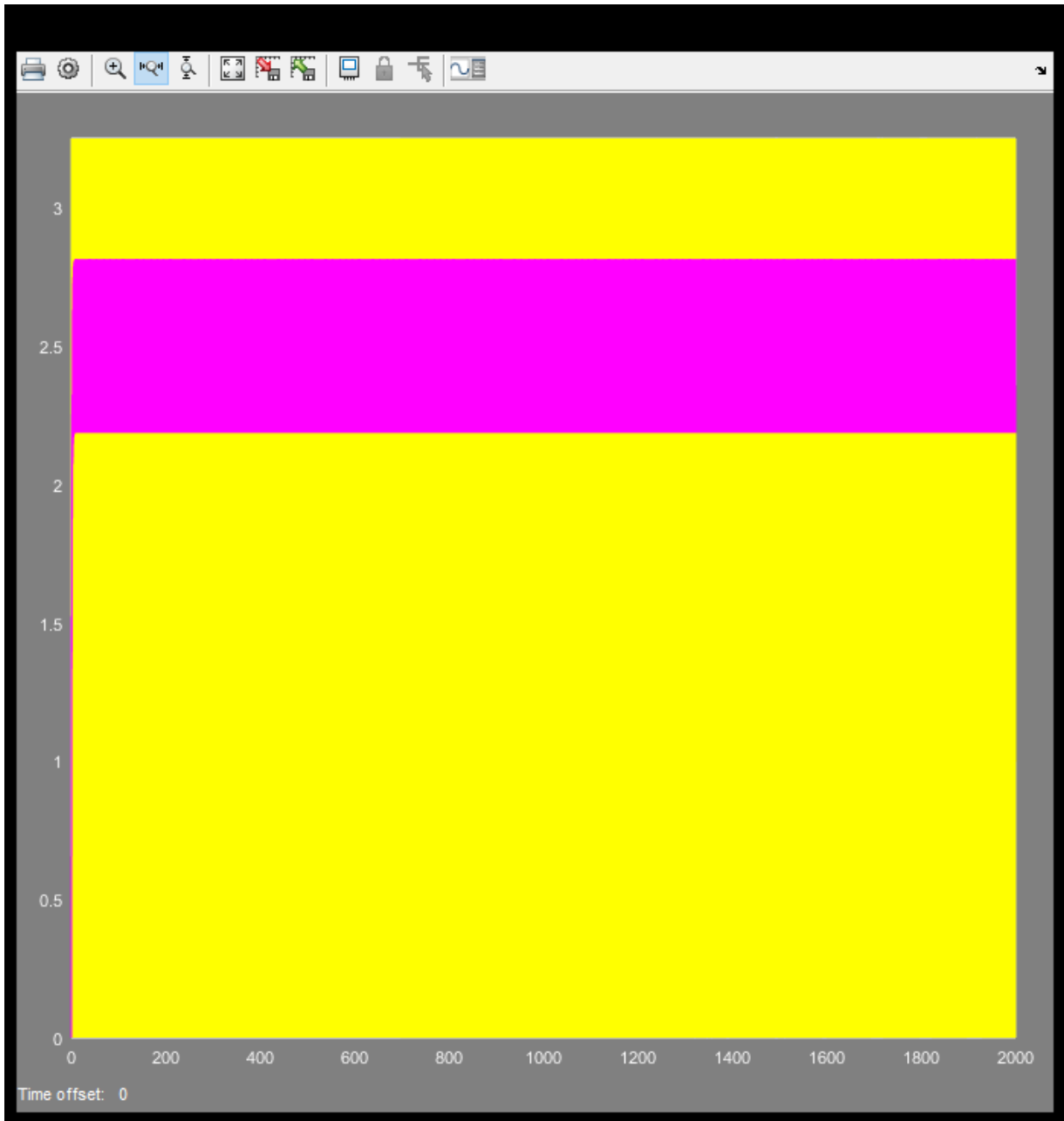


Figura 26 Respuesta del sistema para un factor de convergencia de 0.02

Fuente: Elaboración propia

El sistema no se estabiliza

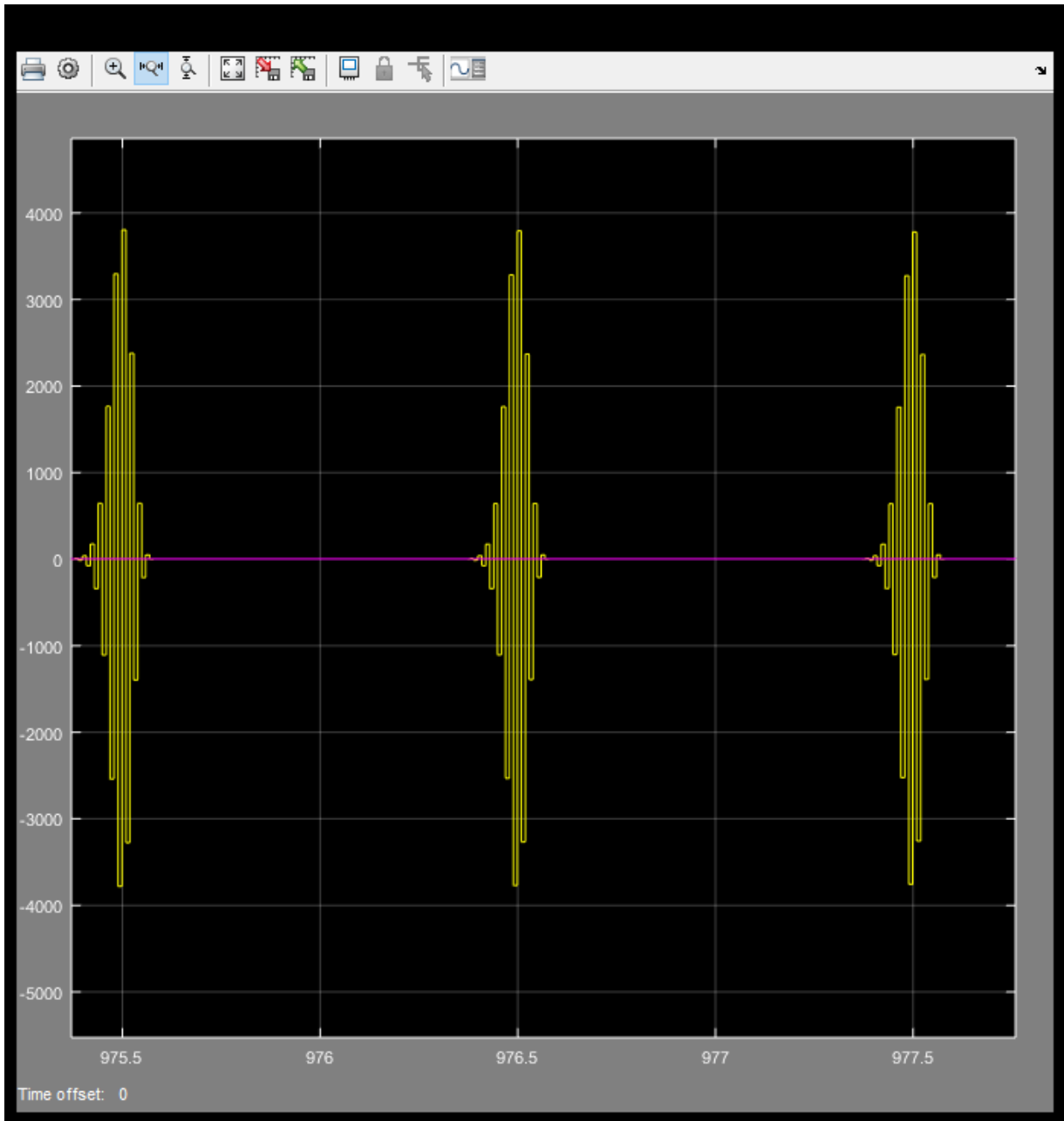


Figura 27 Tiempo de estabilización para un factor de convergencia de 0.02

Fuente: Elaboración propia

4.1.8. Cambio de factor de convergencia a 0.001 y número de coeficientes a 20

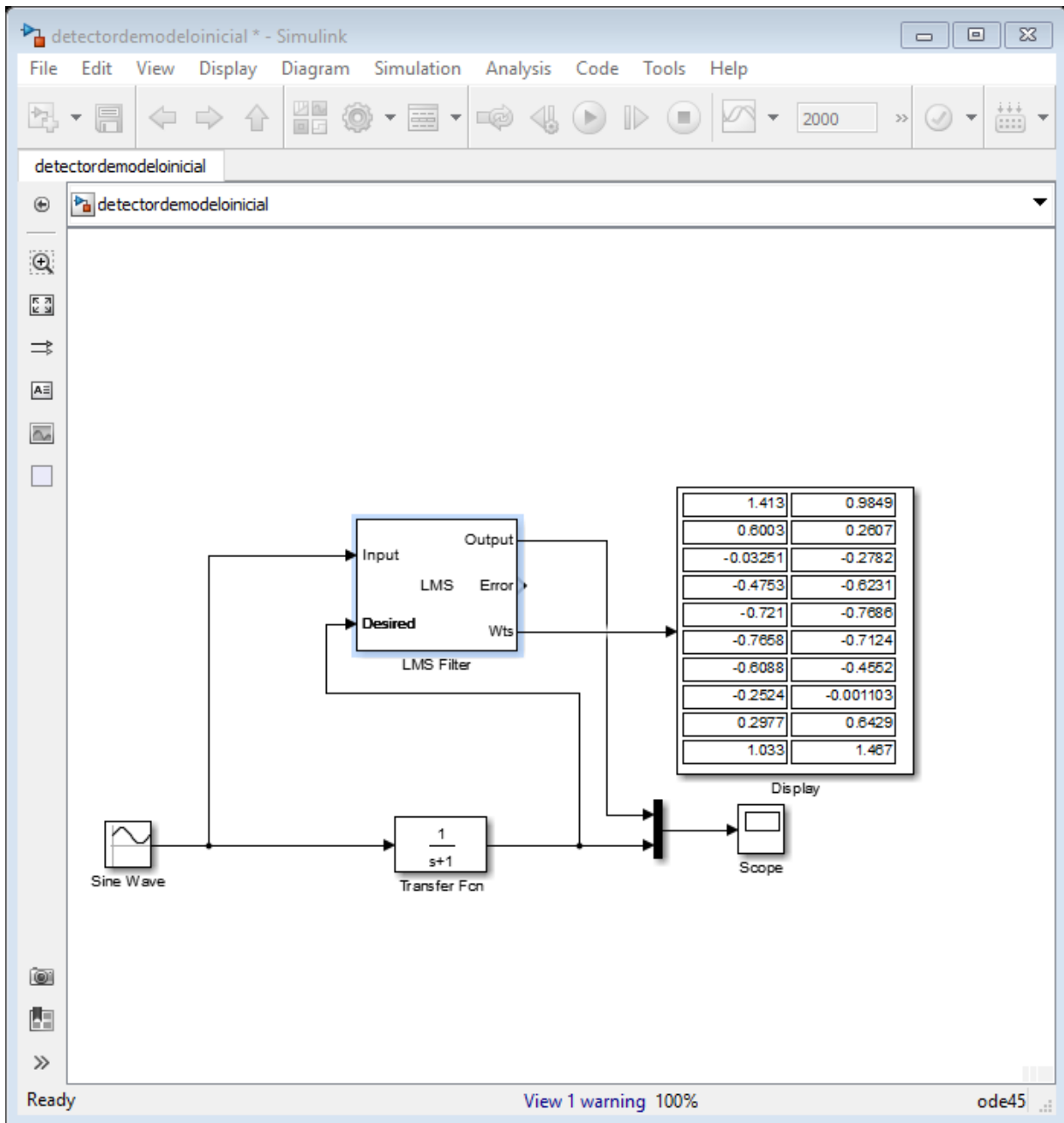


Figura 28 Configuración del sistema en simulink factor de convergencia a 0.001

Fuente: Elaboración propia

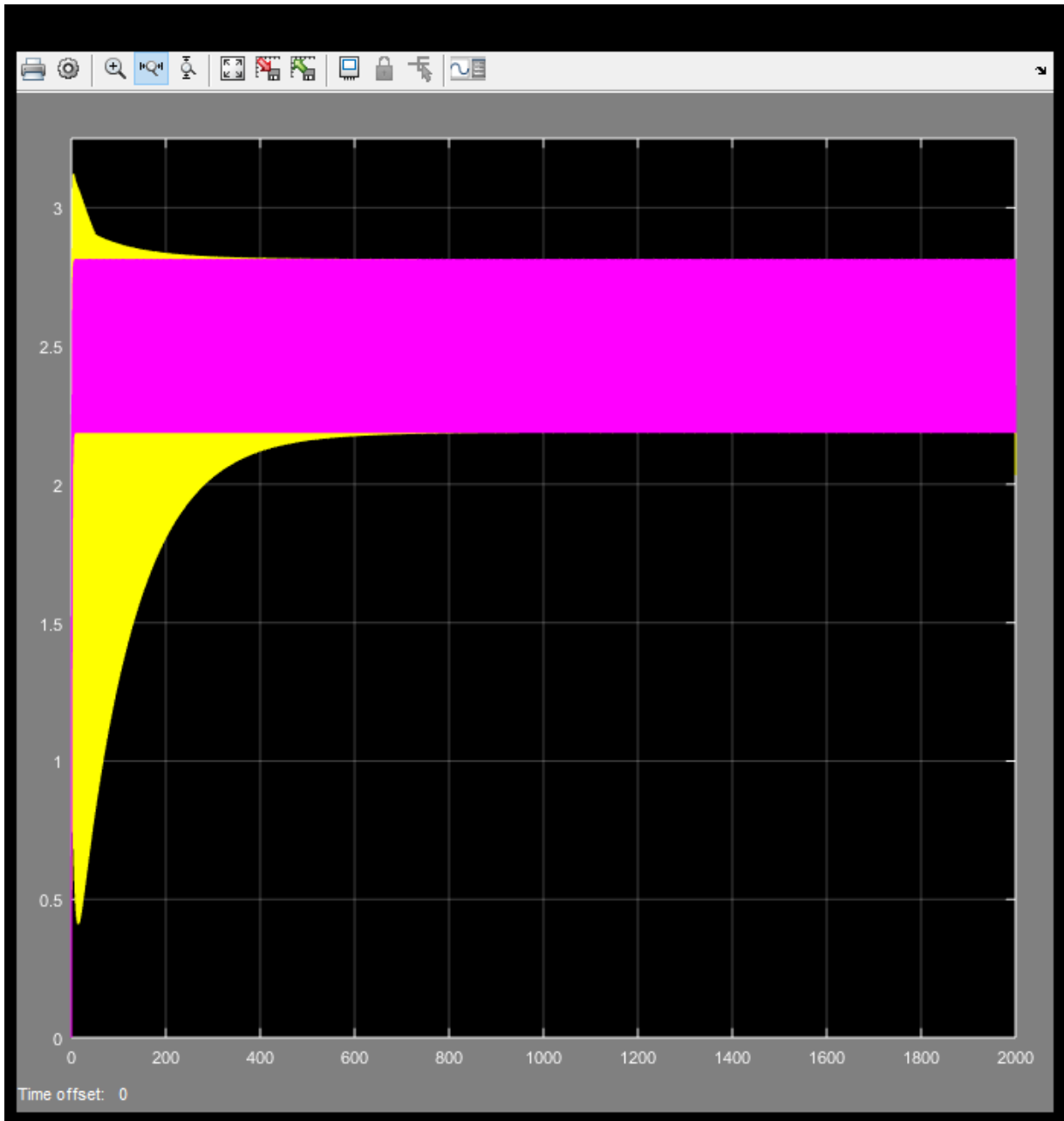


Figura 29 Respuesta del sistema para un factor de convergencia de 0.001

Fuente: Elaboración propia

El sistema se estabiliza en 800 segundos $\frac{80}{6}$ minutos

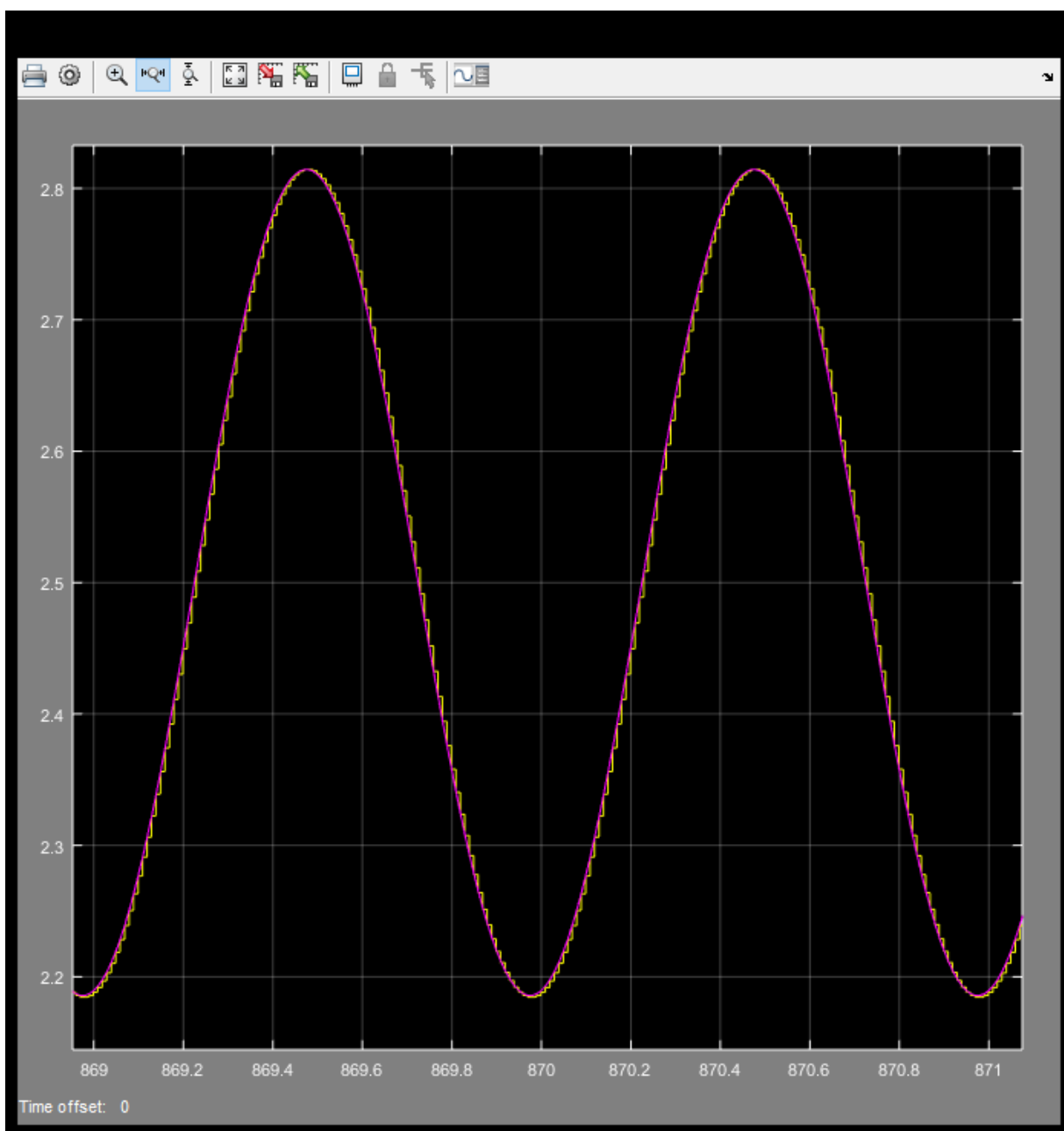


Figura 30 Tiempo de estabilización para un factor de convergencia de 0.001

Fuente: Elaboración propia

4.1.9. Cambio de factor de convergencia a 0.002 y número de coeficientes a 20

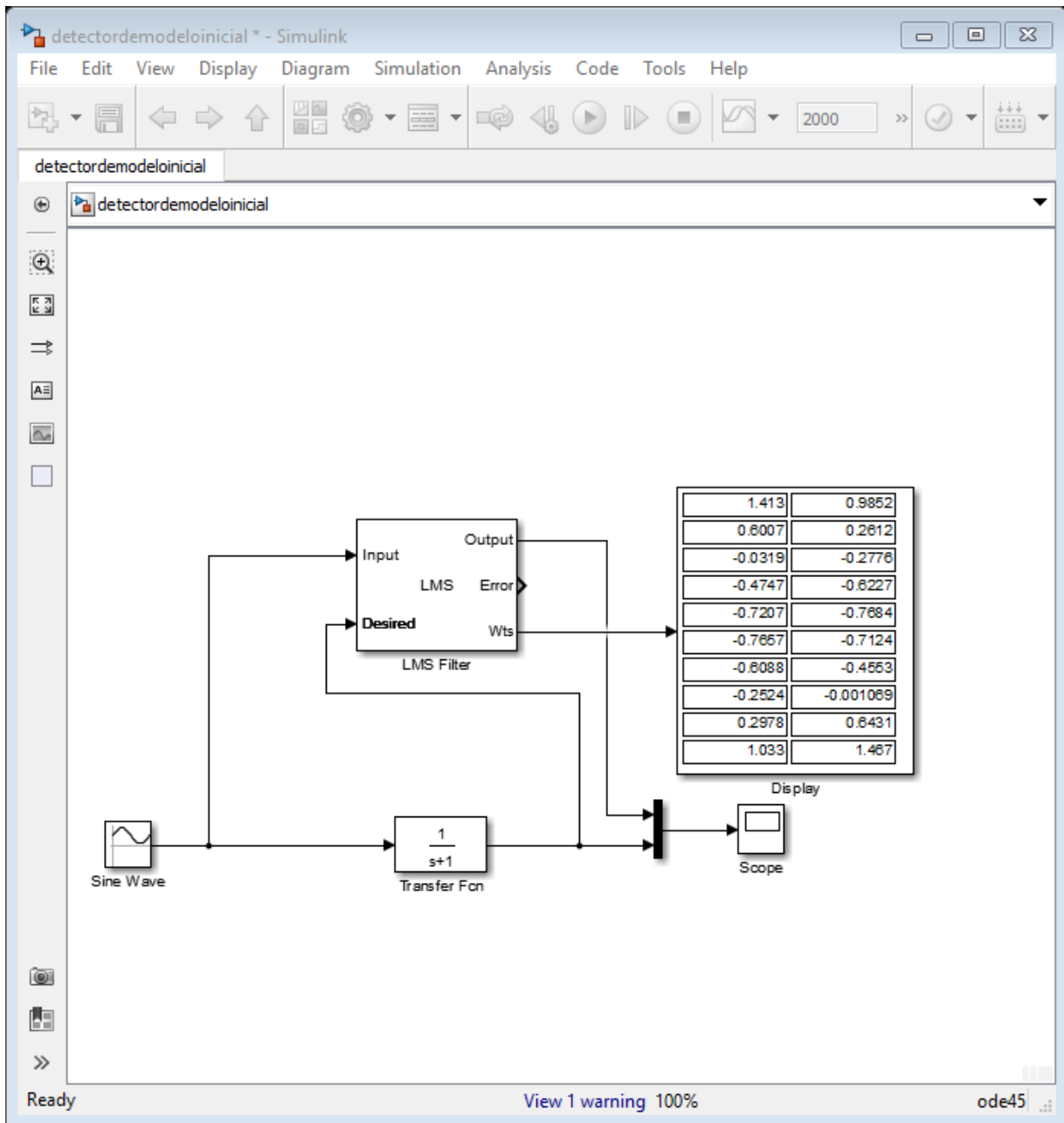


Figura 31 Configuración del sistema en simulink para factor de convergencia a 0.002

Fuente: Elaboración propia

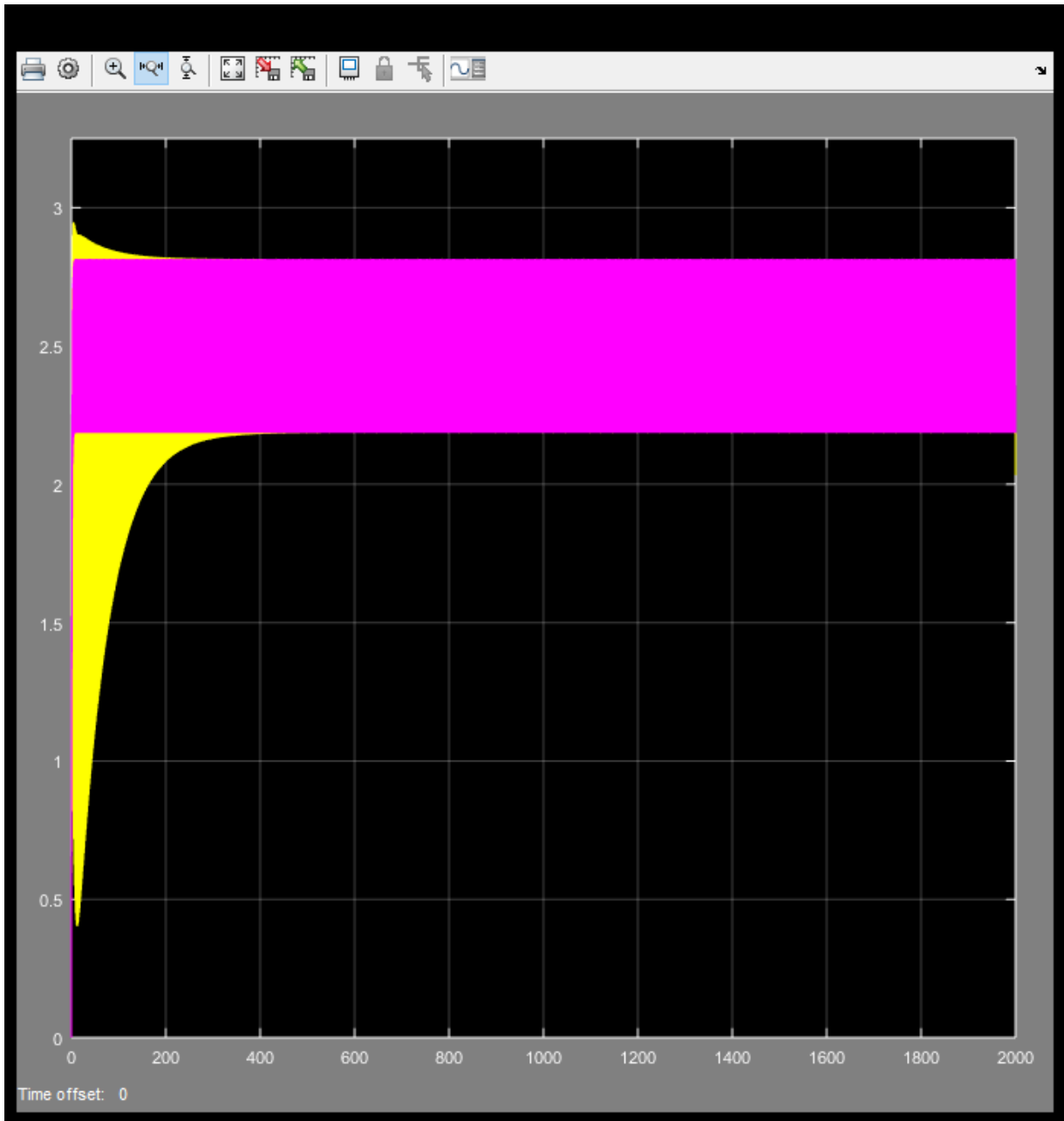


Figura 32 Respuesta del sistema para un factor de convergencia a 0.002

Fuente: Elaboración propia

El sistema se estabiliza en 400 segundos $\frac{40}{6}$ minutos

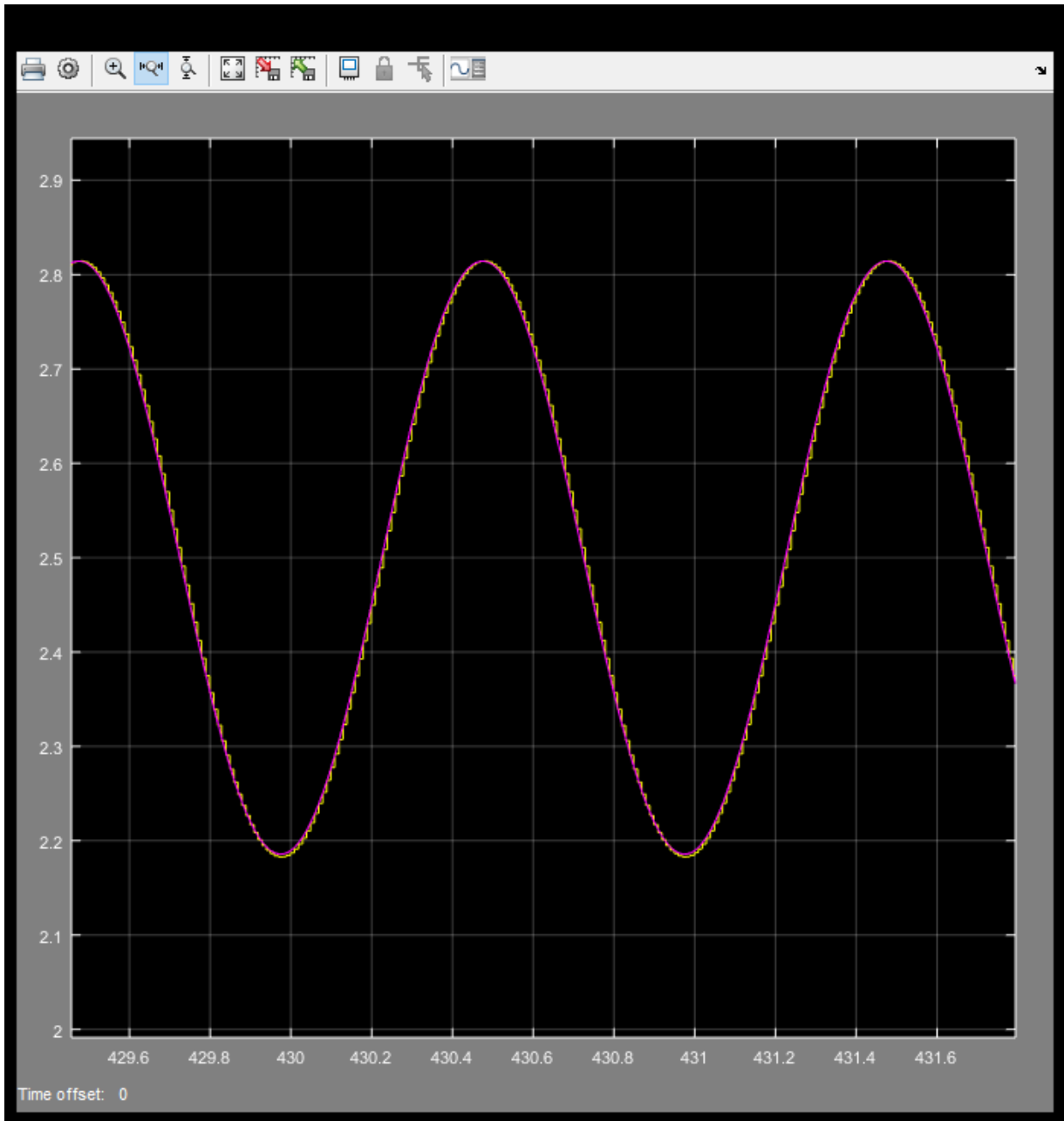


Figura 33 Tiempo de estabilización para un factor de convergencia de 0.002

Fuente: Elaboración propia

4.1.10. Cambio de factor de convergencia a 0.005 y número de coeficientes a 20

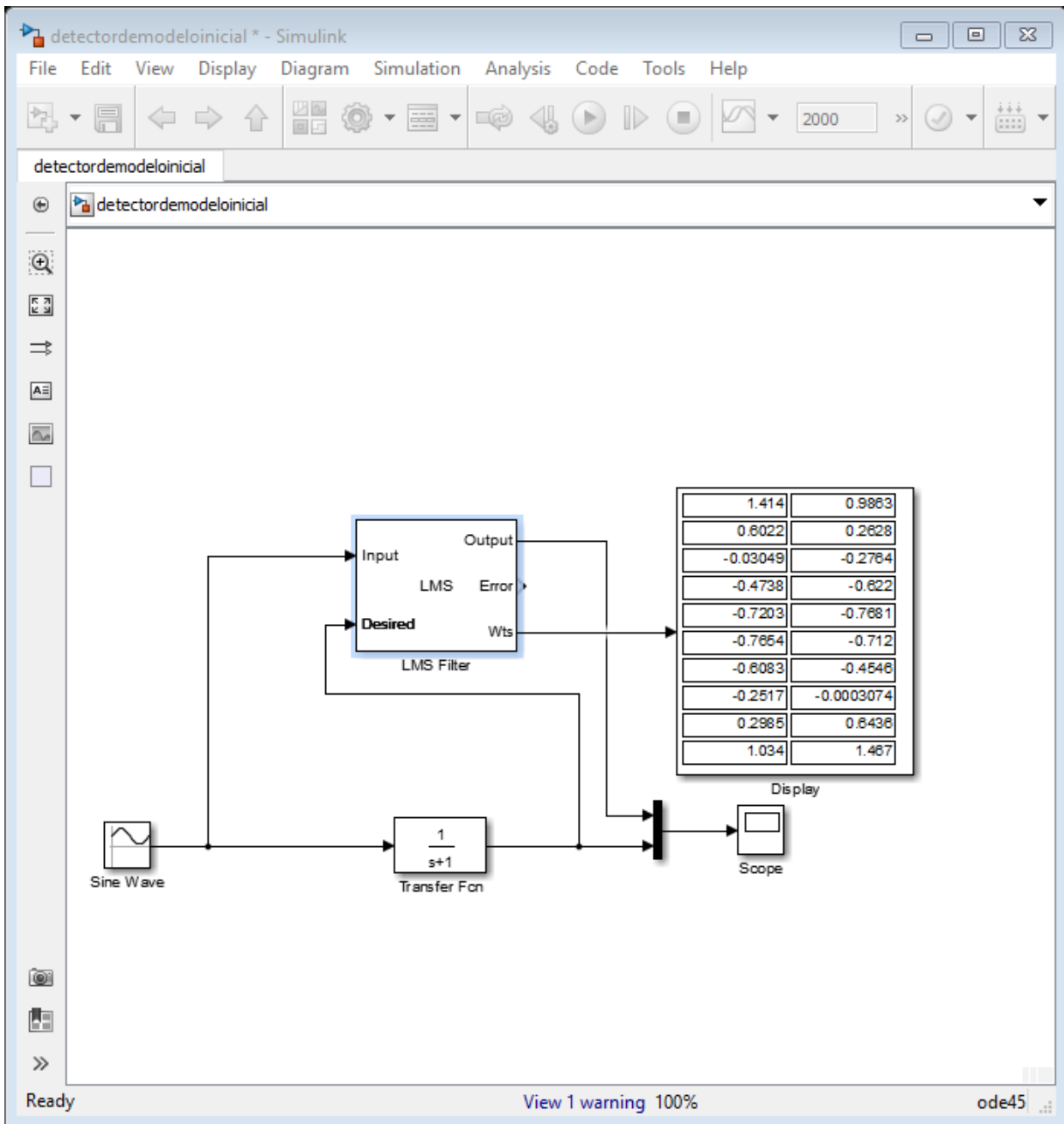


Figura 34 Configuración del sistema en simulink para un factor de convergencia a 0.005

Fuente: Elaboración propia

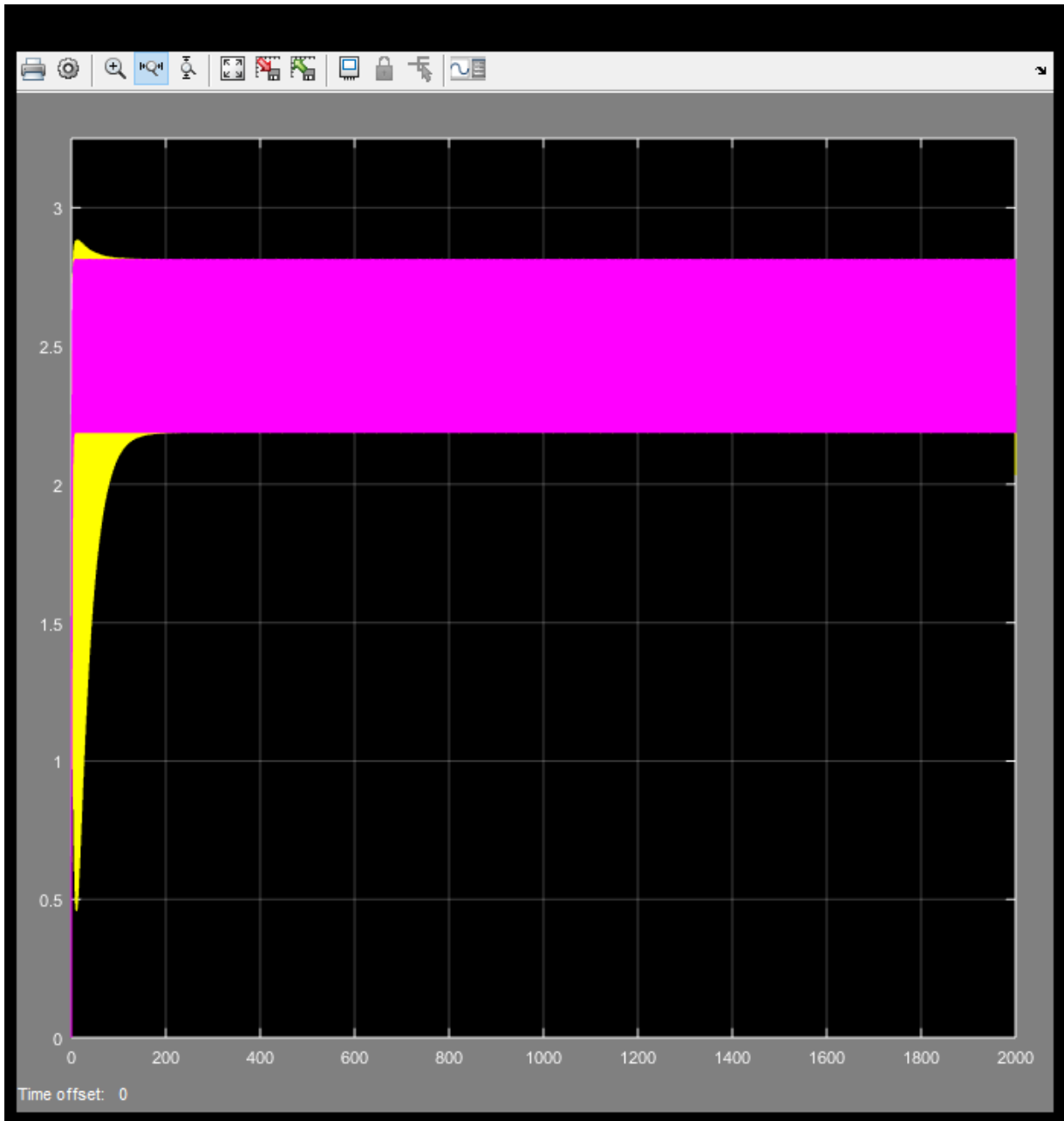


Figura 35: Respuesta del sistema para un factor de convergencia a 0.005

Fuente: Elaboración propia

El sistema se estabiliza en 200 segundos $\frac{20}{6}$ minutos

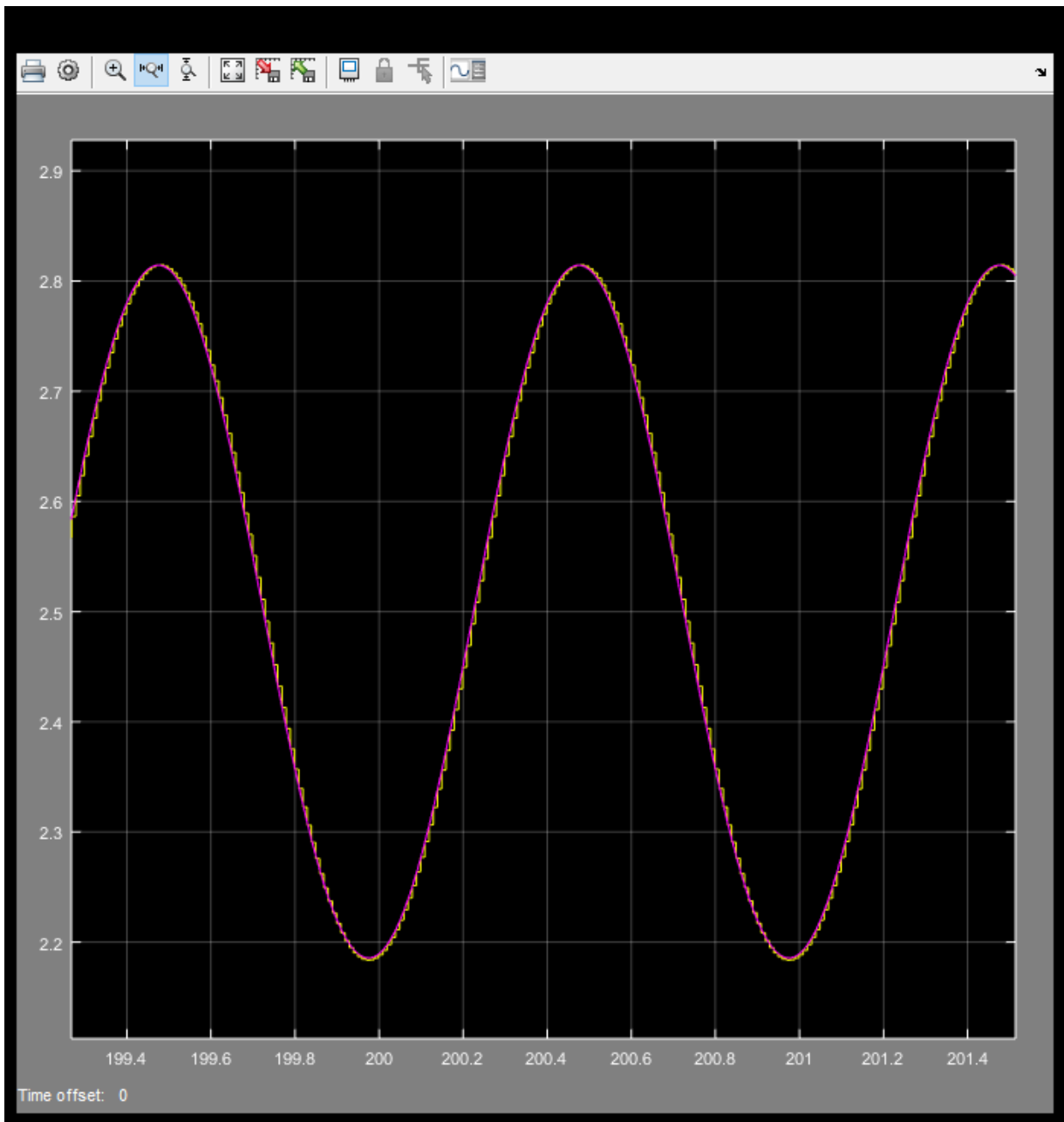


Figura 36 Tiempo de estabilización para un factor de convergencia de 0.005

Fuente: Elaboración propia

4.1.11. Cambio de factor de convergencia a 0.008 y número de coeficientes a 20

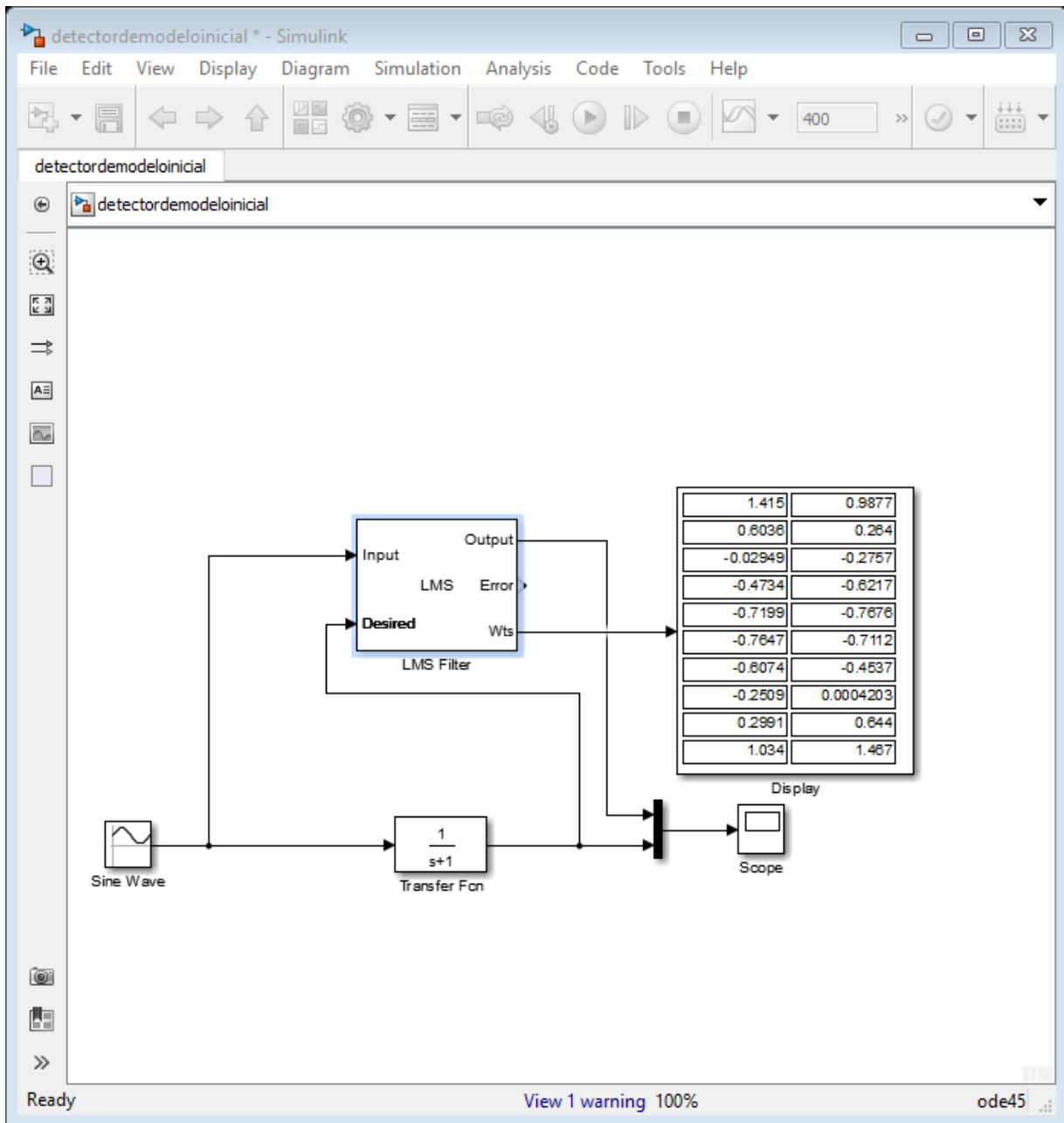


Figura 37 Configuración del sistema en simulink para un factor de convergencia a 0.008

Fuente: Elaboración propia

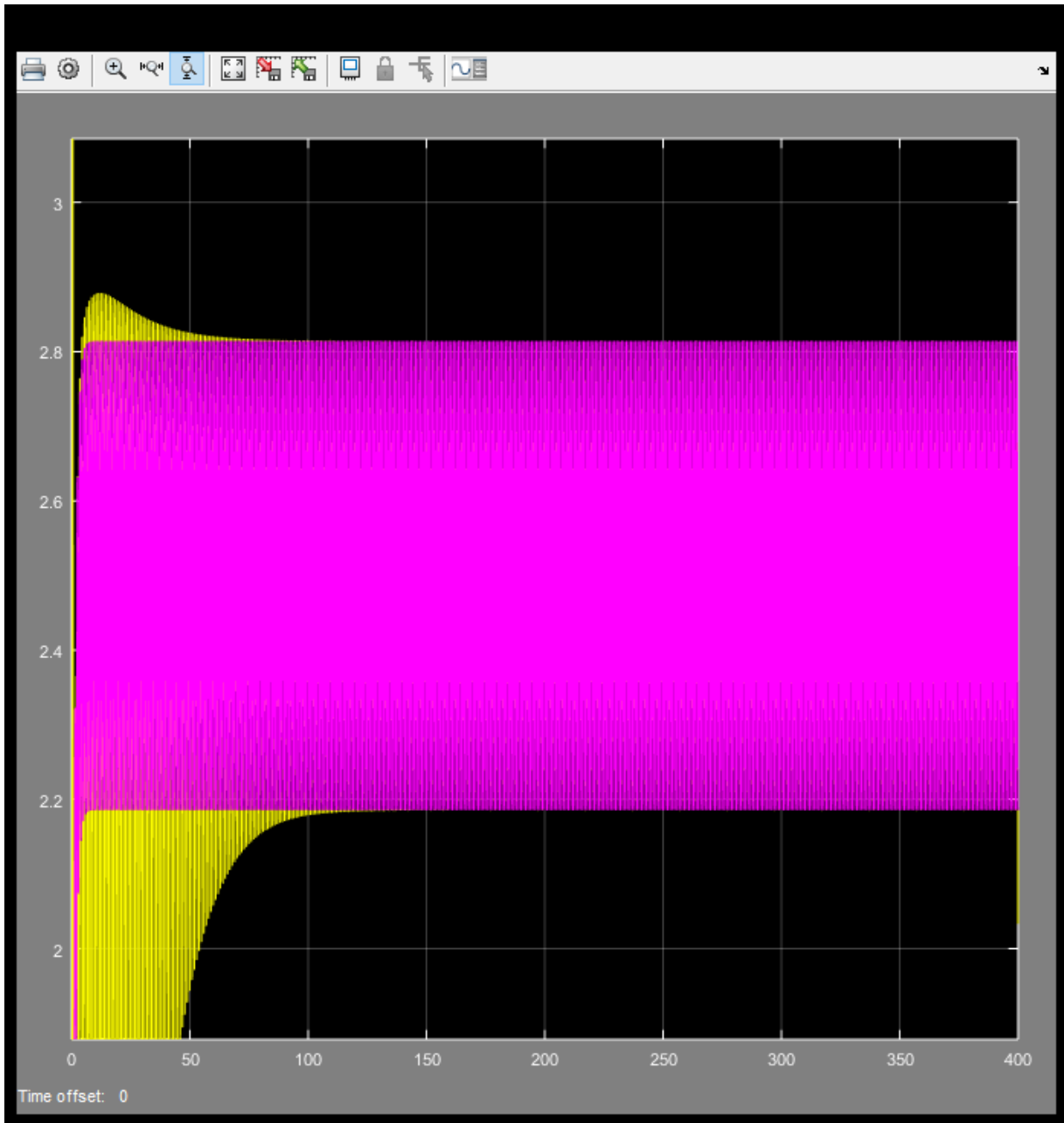


Figura 38 Respuesta del sistema para un factor de convergencia a 0.008

Fuente: Elaboración propia

El sistema se estabiliza en 125 segundos $\frac{12.5}{6}$ minutos

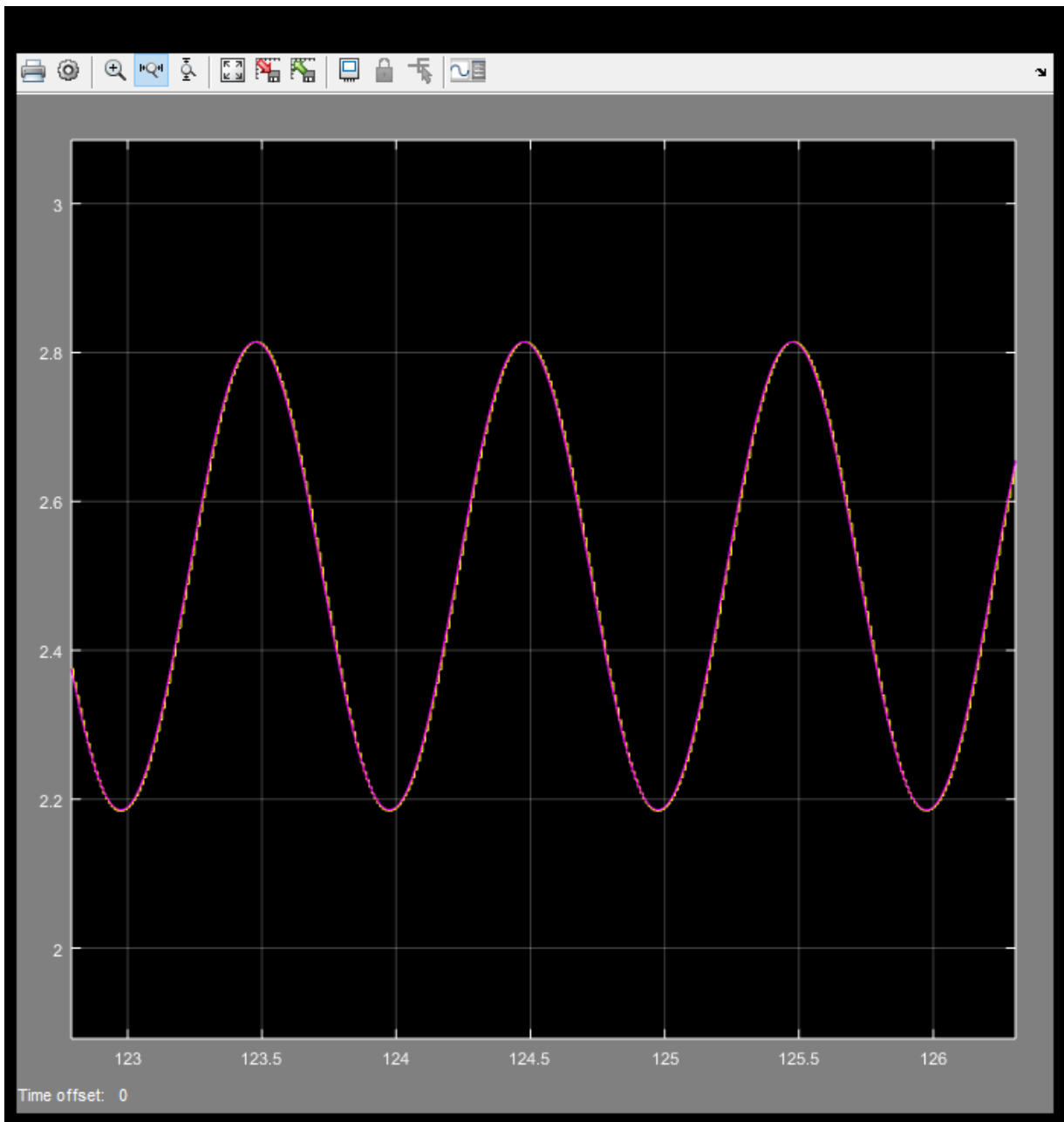


Figura 39 Tiempo de estabilización para un factor de convergencia de 0.008

Fuente: Elaboración propia

4.1.12. Cambio de factor de convergencia a 0.01 y número de coeficientes a 20

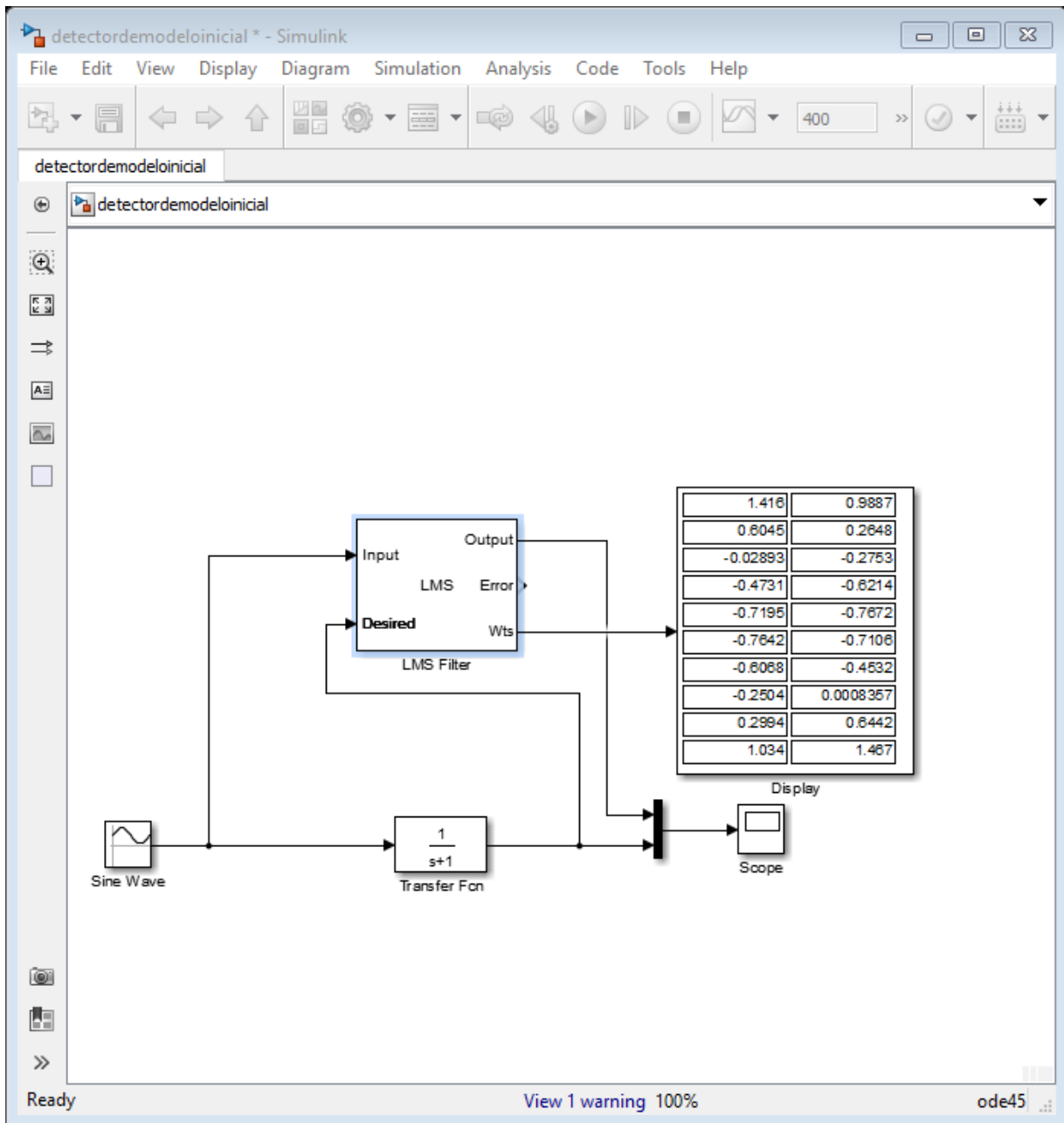


Figura 40 Configuración del sistema en simulink para un factor de convergencia a 0.01

Fuente: Elaboración propia

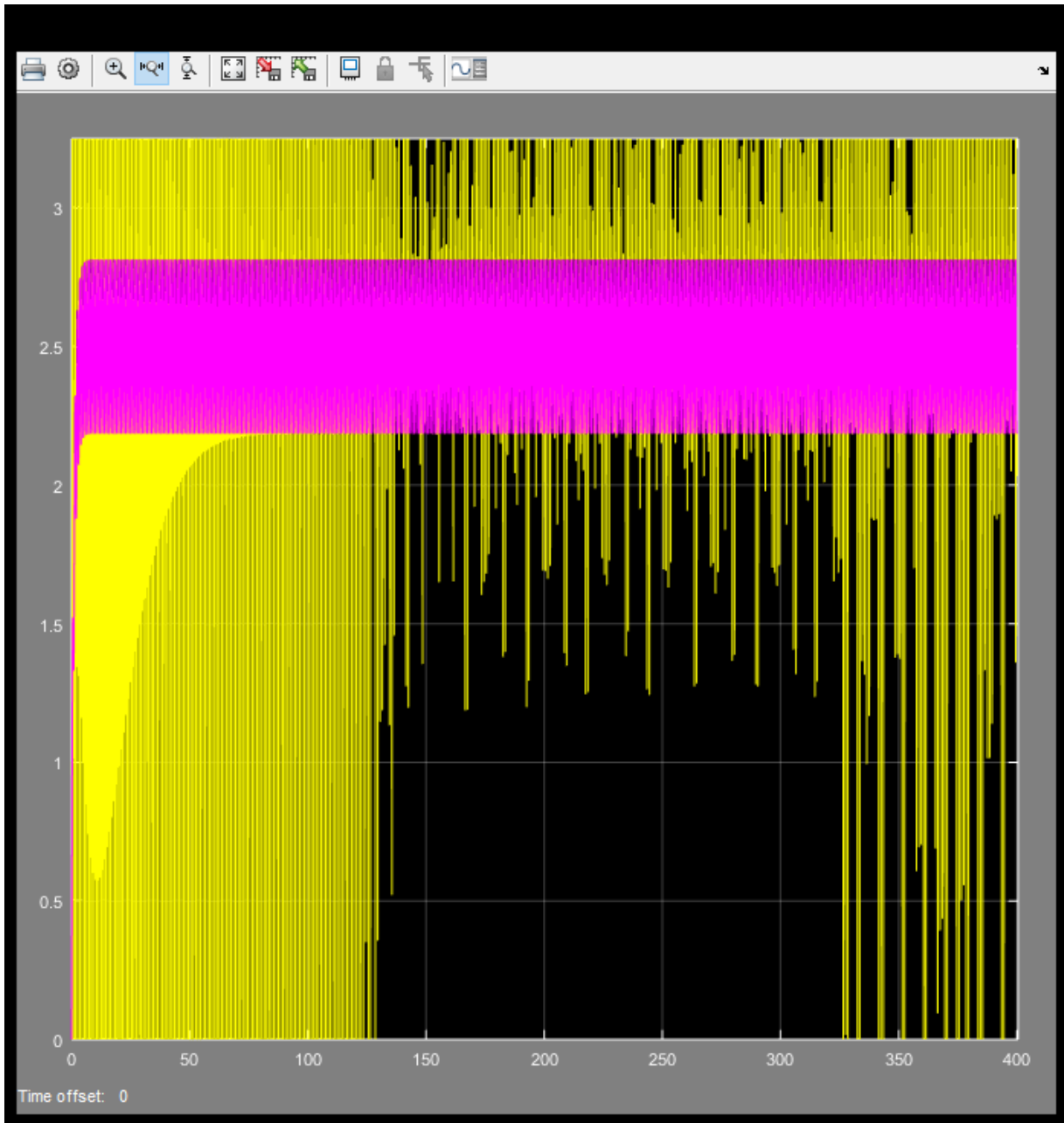


Figura 41 Respuesta del sistema para un factor de convergencia a 0.01

Fuente: Elaboración propia

El sistema no se estabiliza.

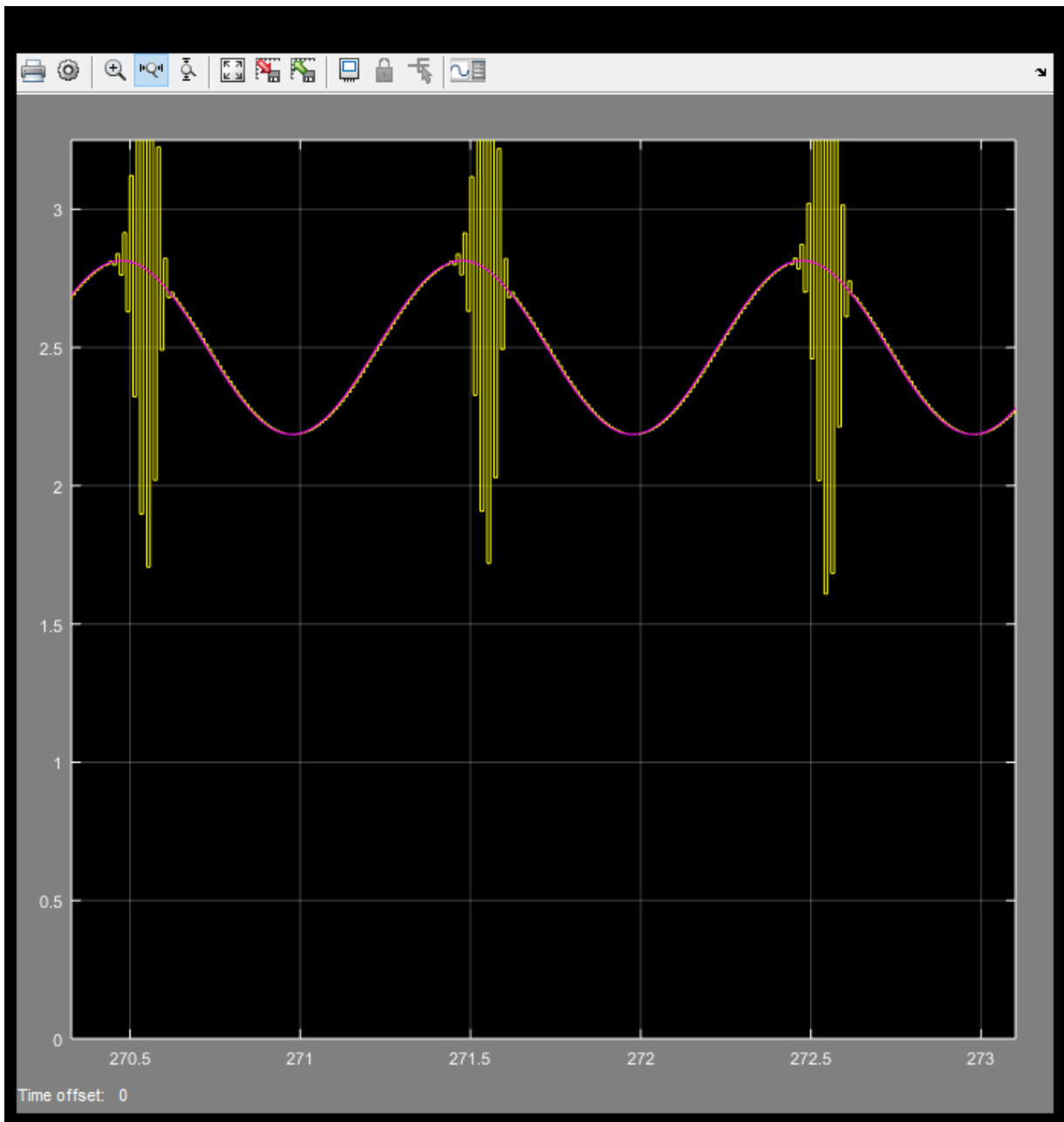


Figura 42 Tiempo de estabilización para un factor de convergencia de 0.01

Fuente: Elaboración propia

4.2. Respuesta transitoria.

Excitación con un escalón unitario a una planta con polo en $s=-1$

$$\frac{1}{s+1}$$

4.2.1. Factor de convergencia 0.001 con 6 coeficientes

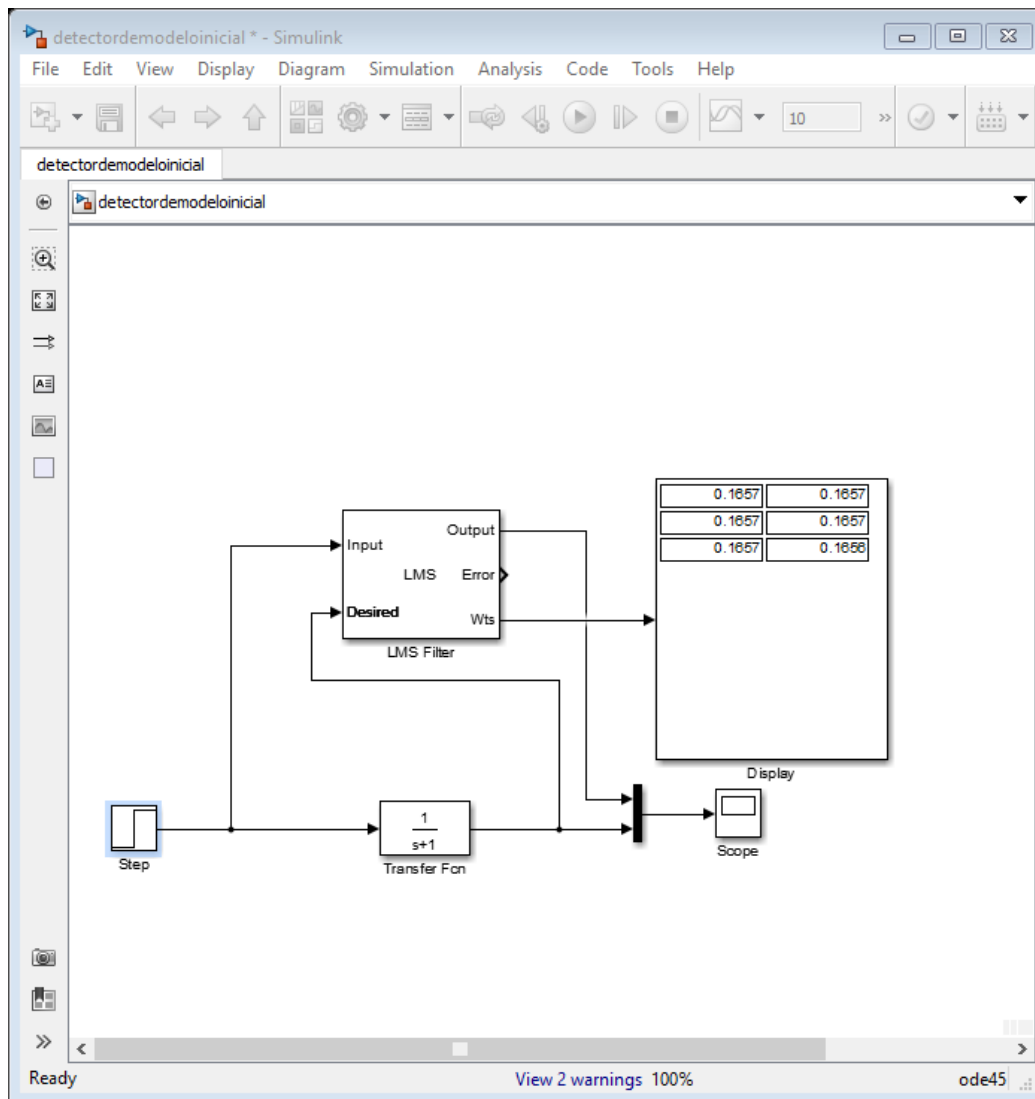


Figura 43 Configuración del sistema en simulink para un factor de convergencia a 0.001 con 6 coeficientes

Fuente: Elaboración propia

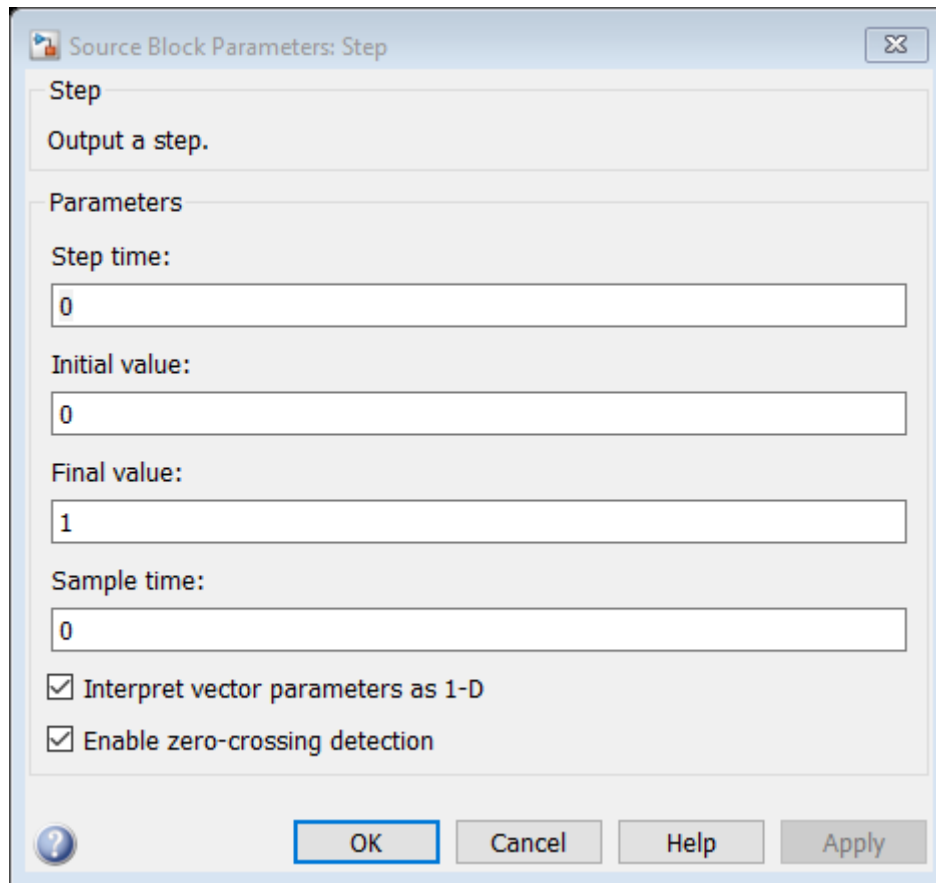


Figura 44 Configuración de parámetros para un factor de convergencia a 0.001 con 6 coeficientes

Fuente: Elaboración propia

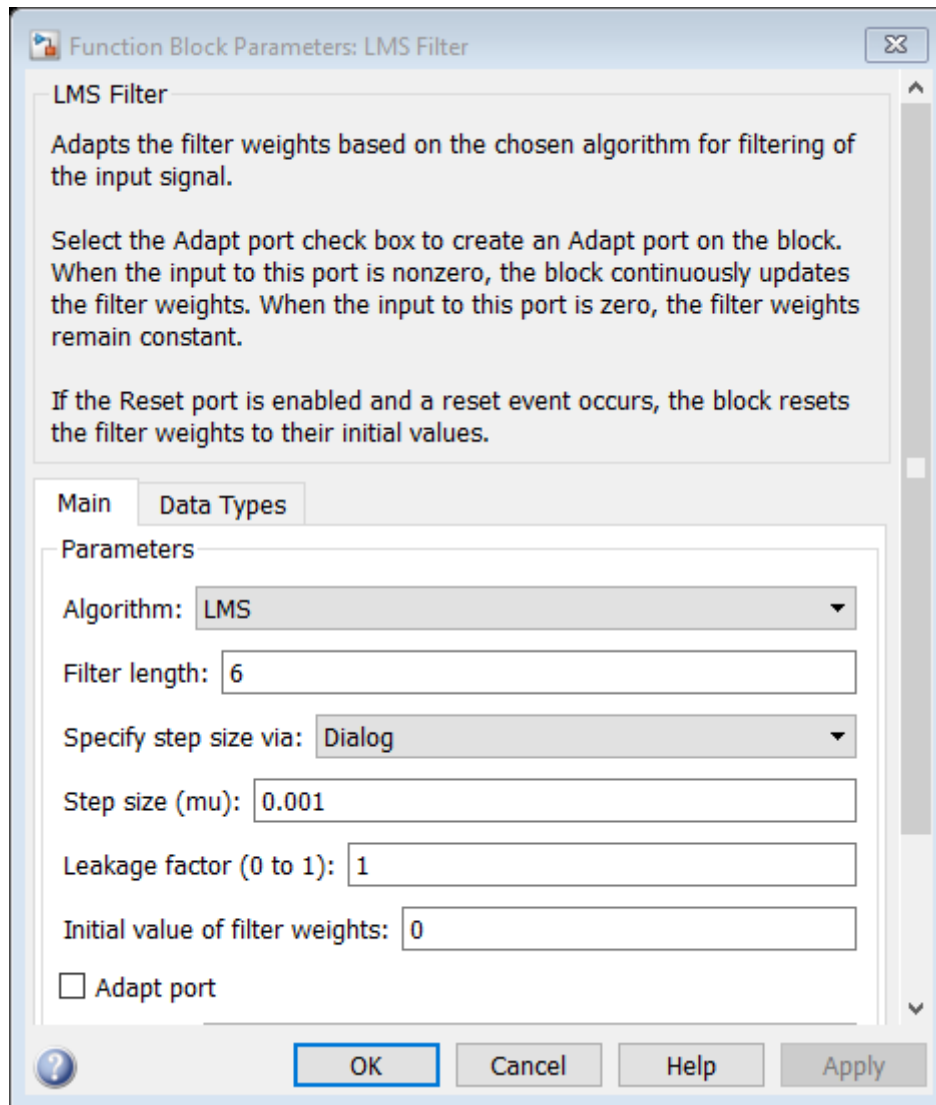


Figura 45 Configuración de parámetros LMS para un factor de convergencia a 0.001 con 6 coeficientes

Fuente: Elaboración propia

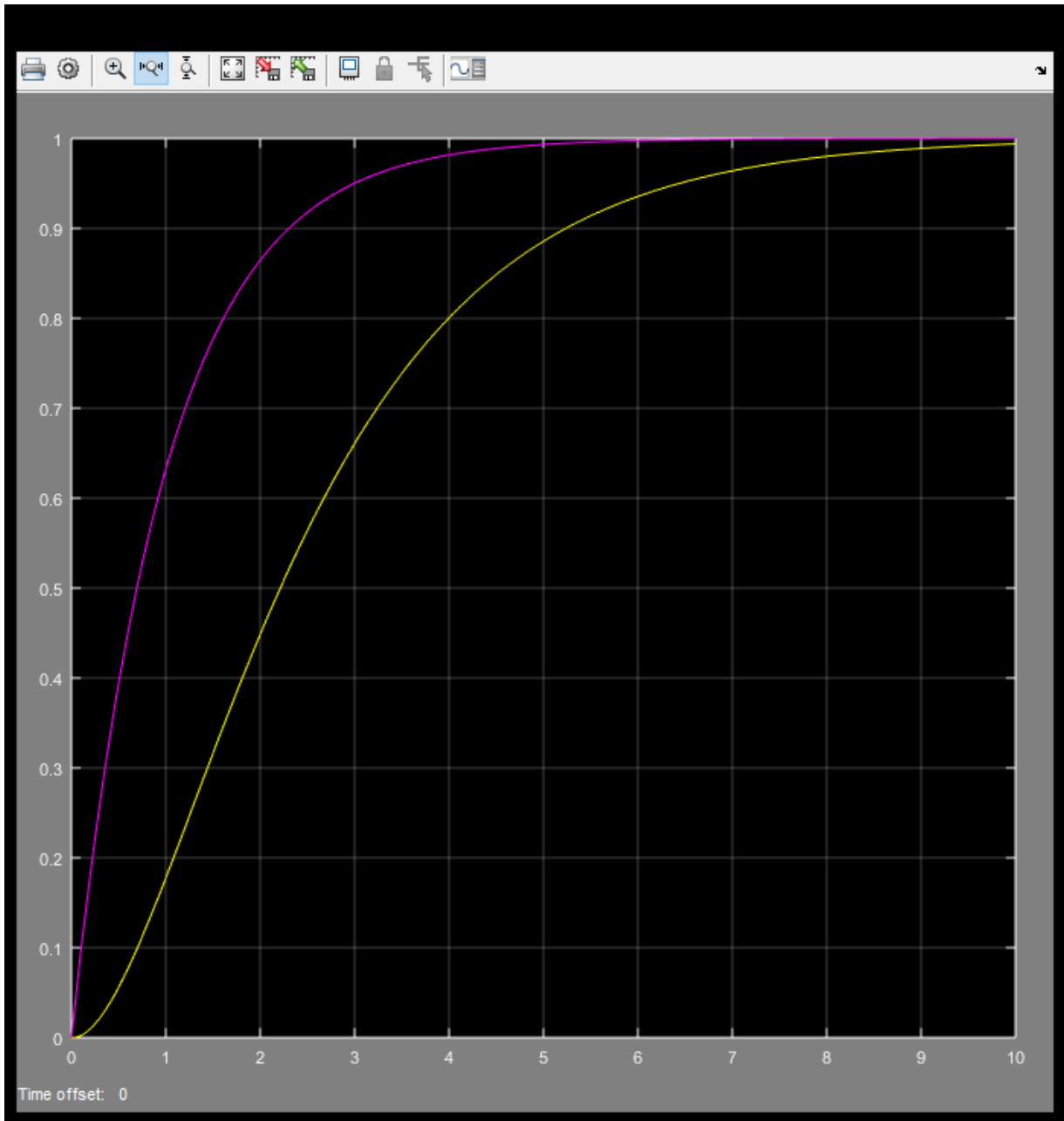


Figura 46 Respuesta transitoria para un factor de convergencia a 0.001 con 6 coeficientes

Fuente: Elaboración propia

Respuesta transitoria desfasada 1.7 segundos.

4.2.2. Factor de convergencia 0.01 con 6 coeficientes

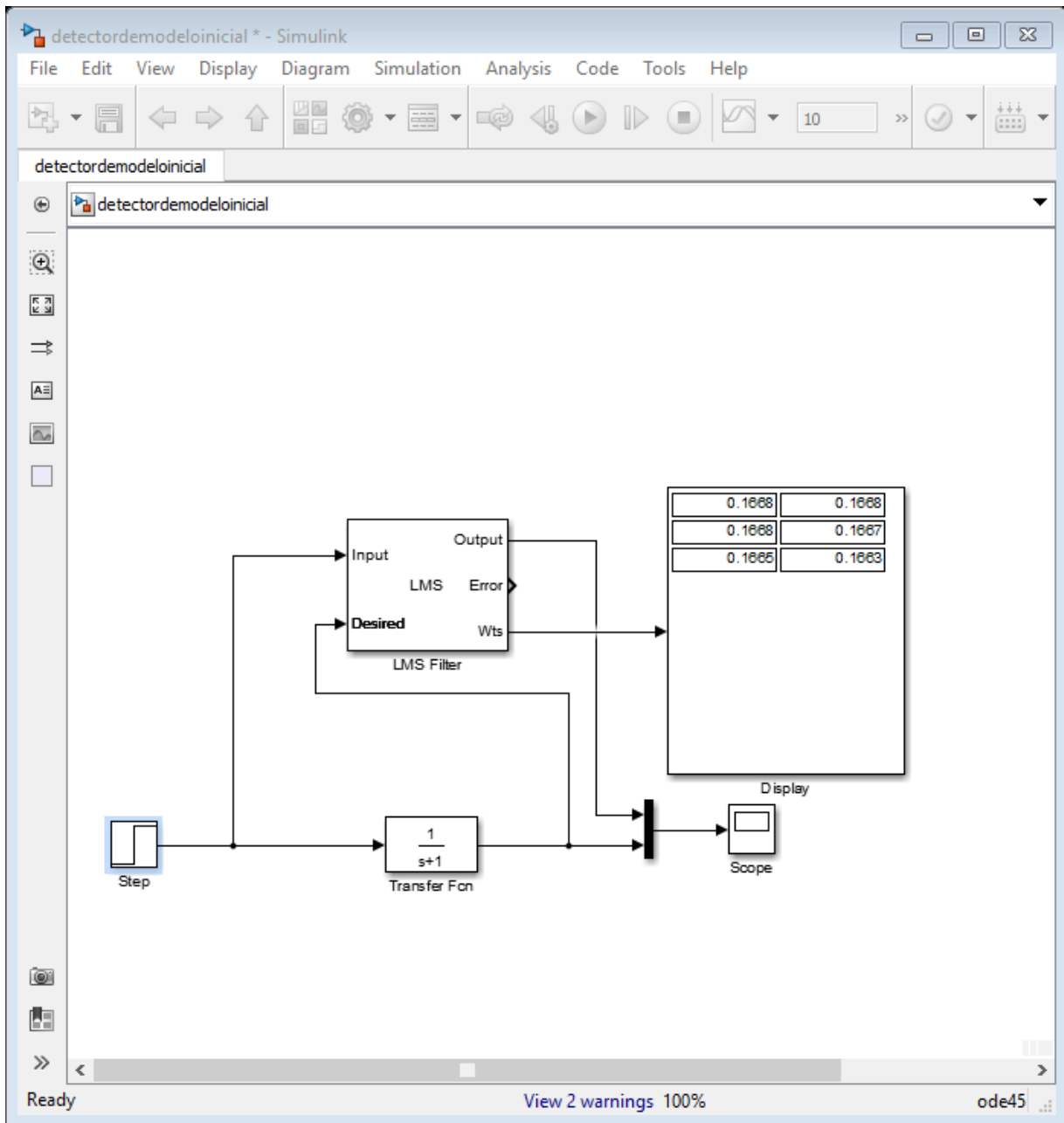


Figura 47 Configuración de parámetros para un factor de convergencia a 0.01 con 6 coeficientes

Fuente: Elaboración propia

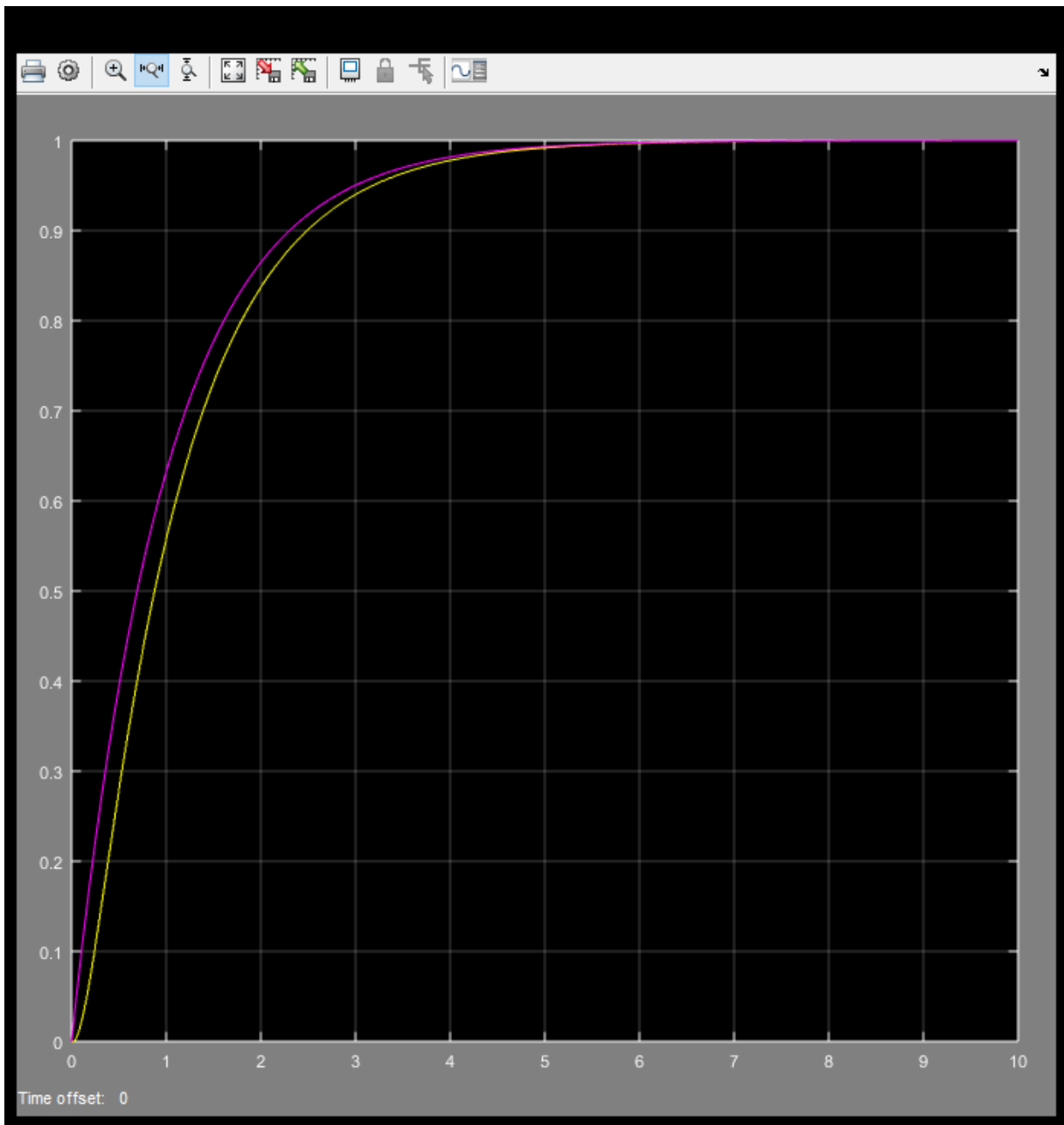


Figura 48 Respuesta del sistema para un factor de convergencia a 0.01 con 6 coeficientes

Fuente: Elaboración propia

Desfase en la respuesta transitoria de 0.2 segundos

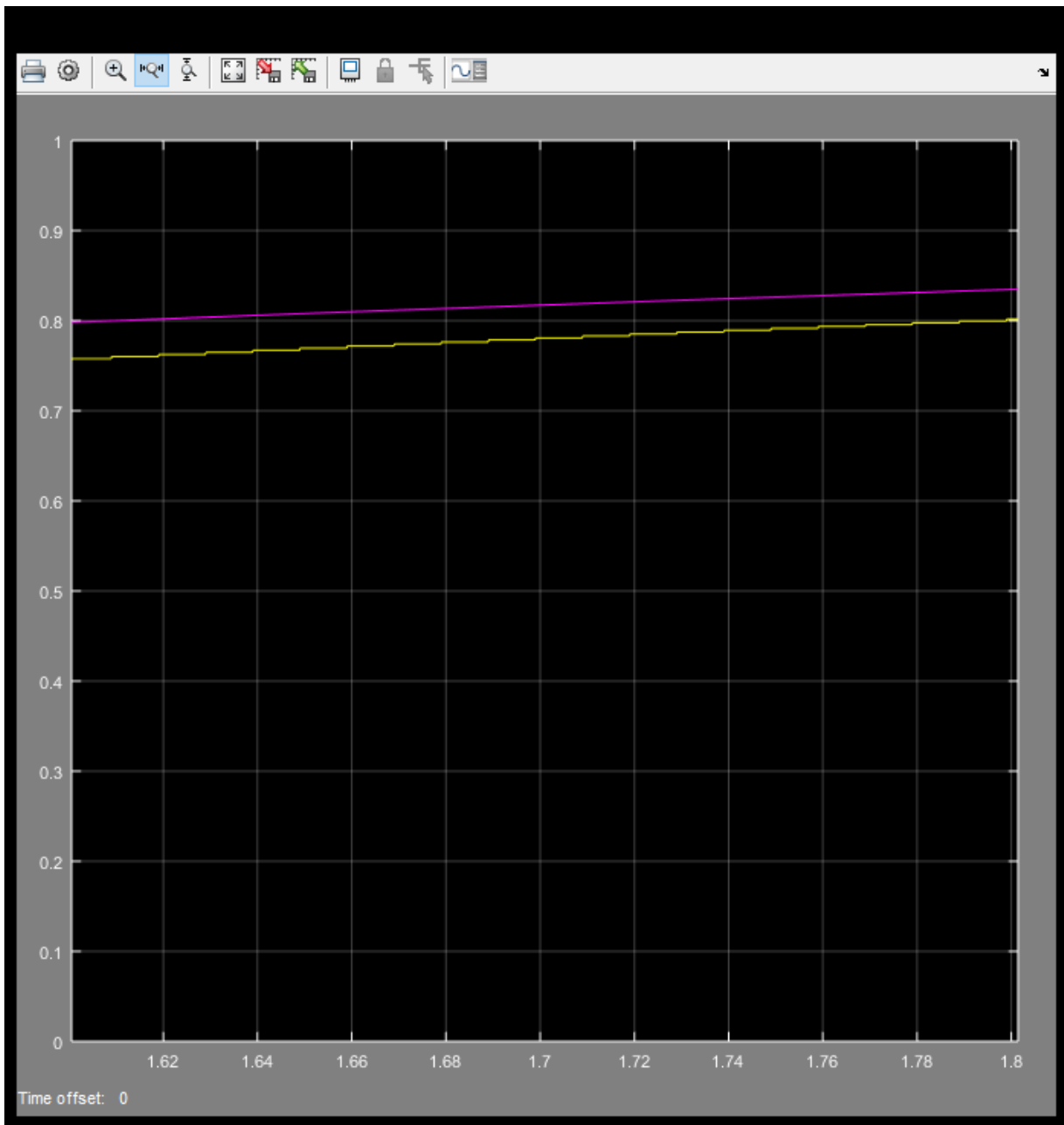


Figura 49 Respuesta transitoria para un factor de convergencia a 0.01 con 6 coeficientes

Fuente: Elaboración propia

4.2.3. Factor de convergencia 0.1 con 6 coeficientes

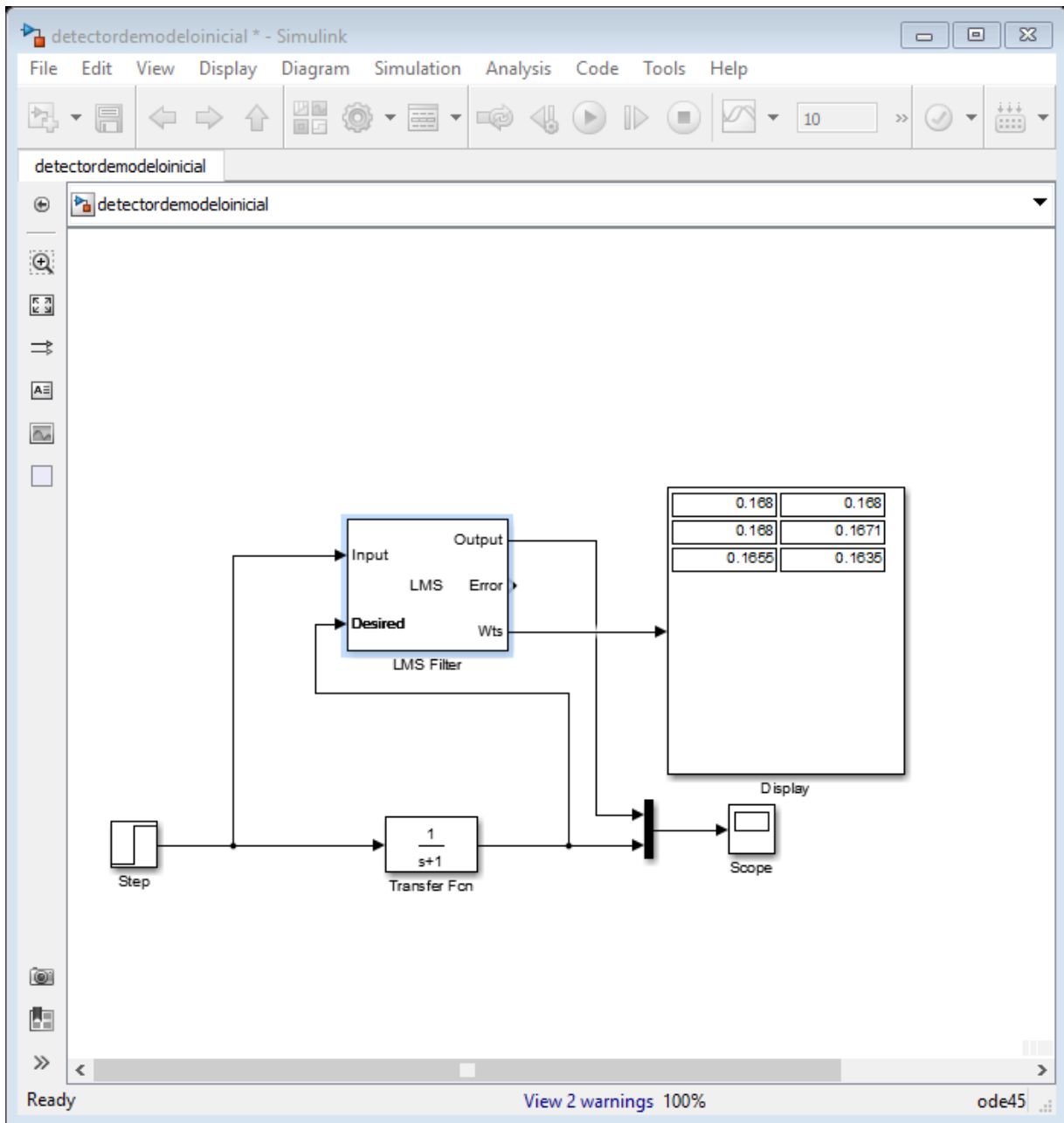


Figura 50 Configuración de parámetros para un factor de convergencia a 0.1 con 6 coeficientes

Fuente: Elaboración propia

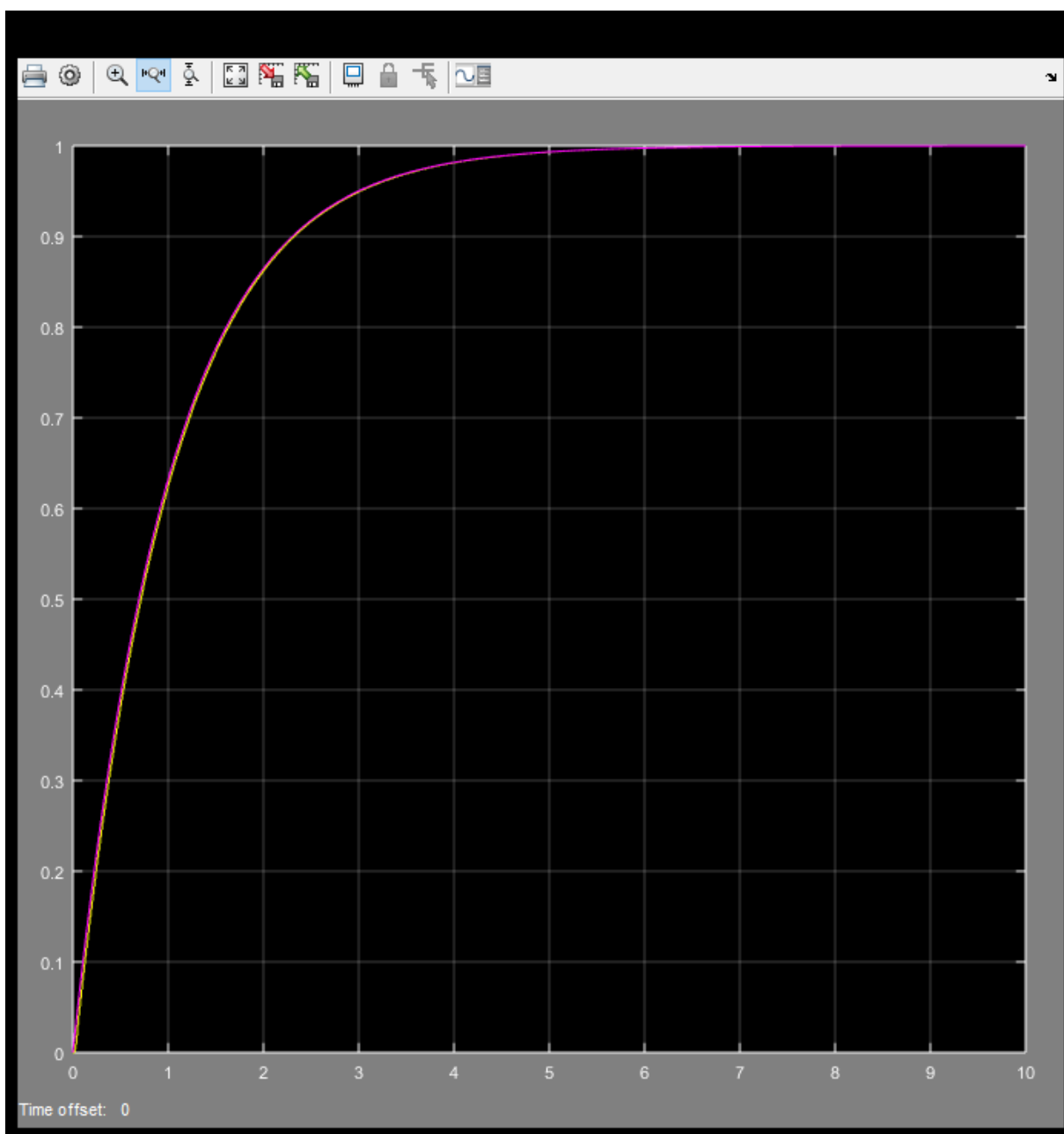


Figura 51 Respuesta del sistema para un factor de convergencia a 0.1 con 6 coeficientes

Fuente: Elaboración propia

Ligero desfase 40 milisegundos

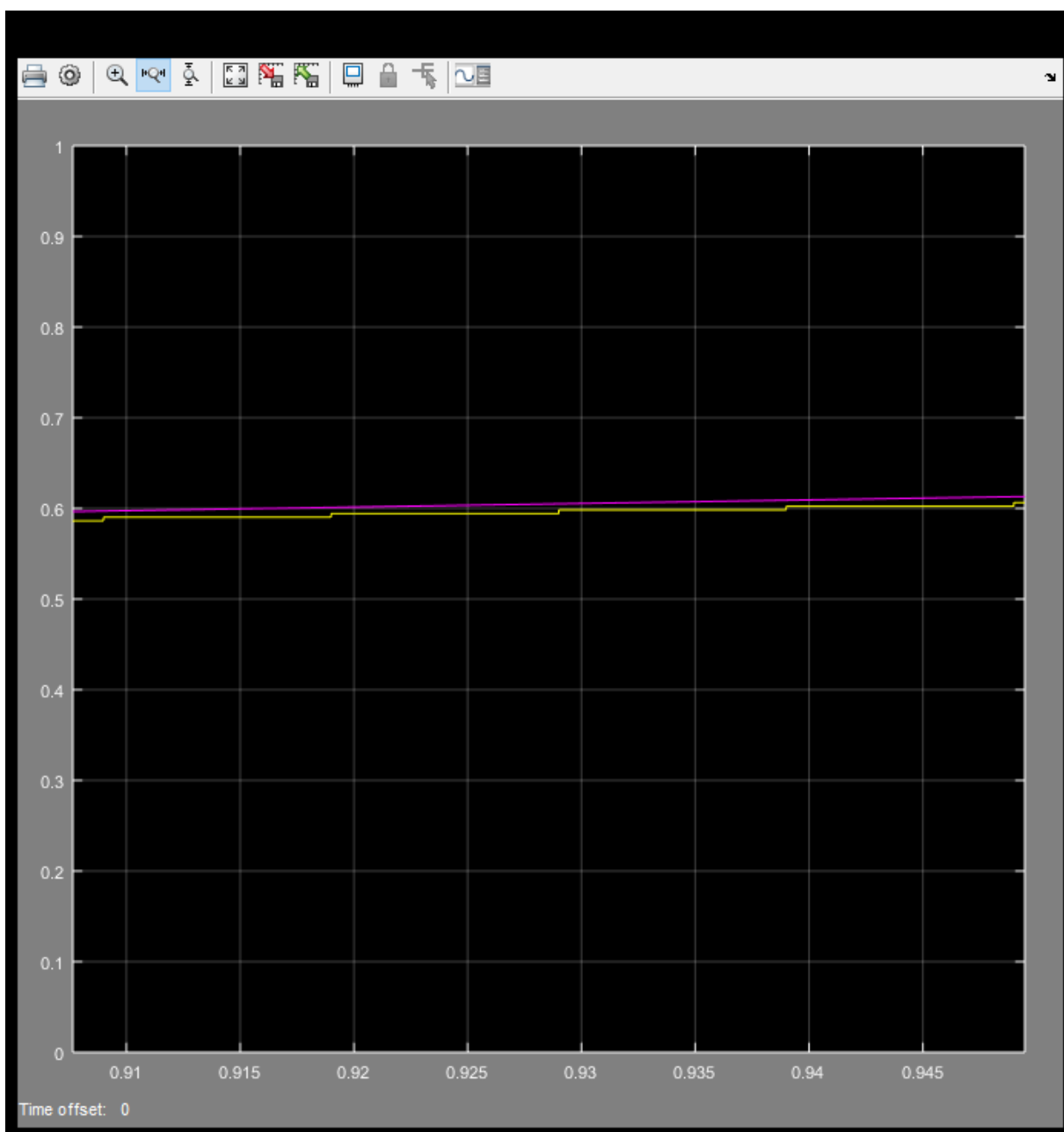


Figura 52 Respuesta transitoria para un factor de convergencia a 0.1 con 6 coeficientes

Fuente: Elaboración propia

4.2.4. Factor de convergencia 0.001 con 10 coeficientes

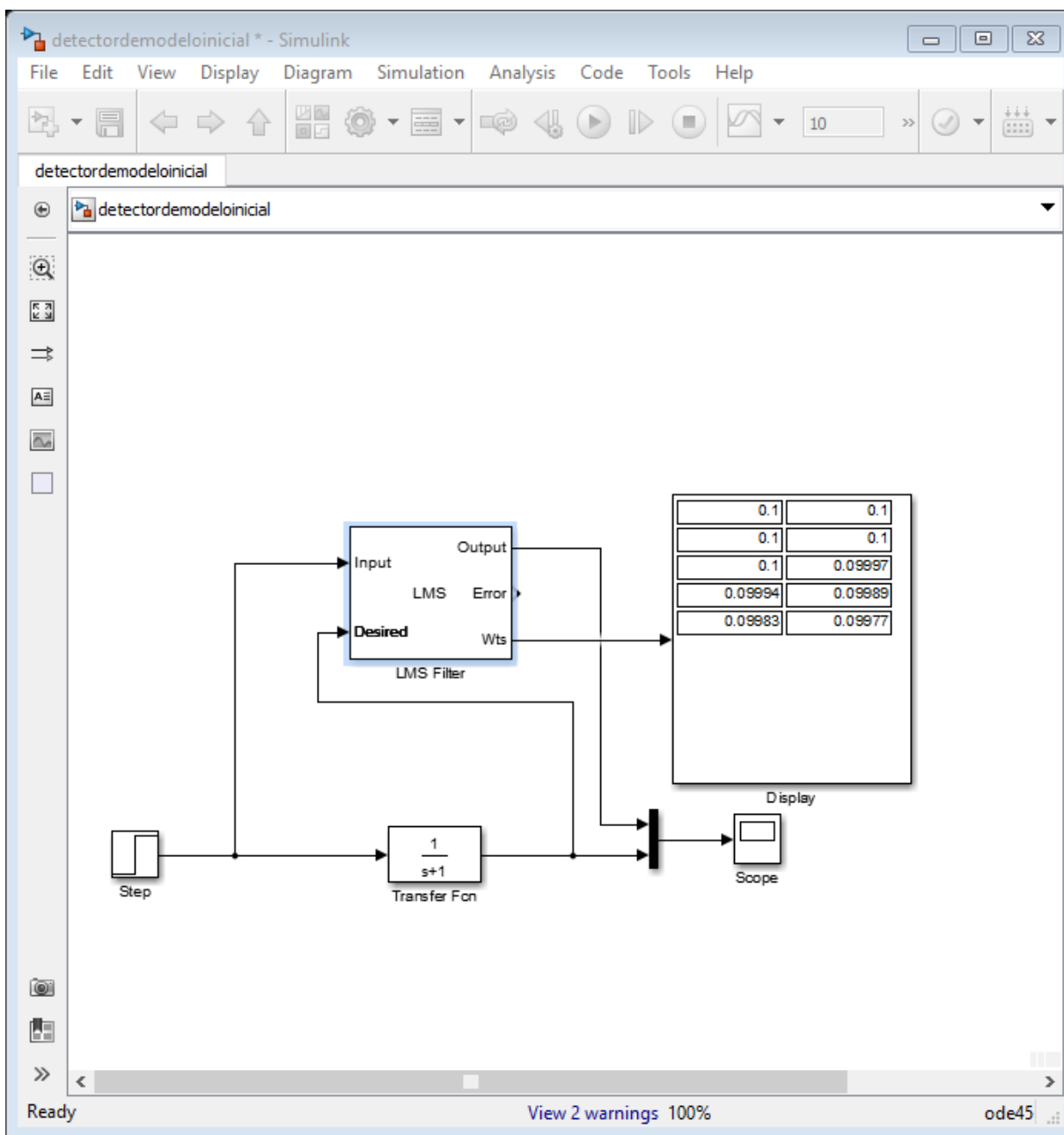


Figura 53 Configuración de parámetros para un factor de convergencia a 0.001 con 10 coeficientes

Fuente: Elaboración propia

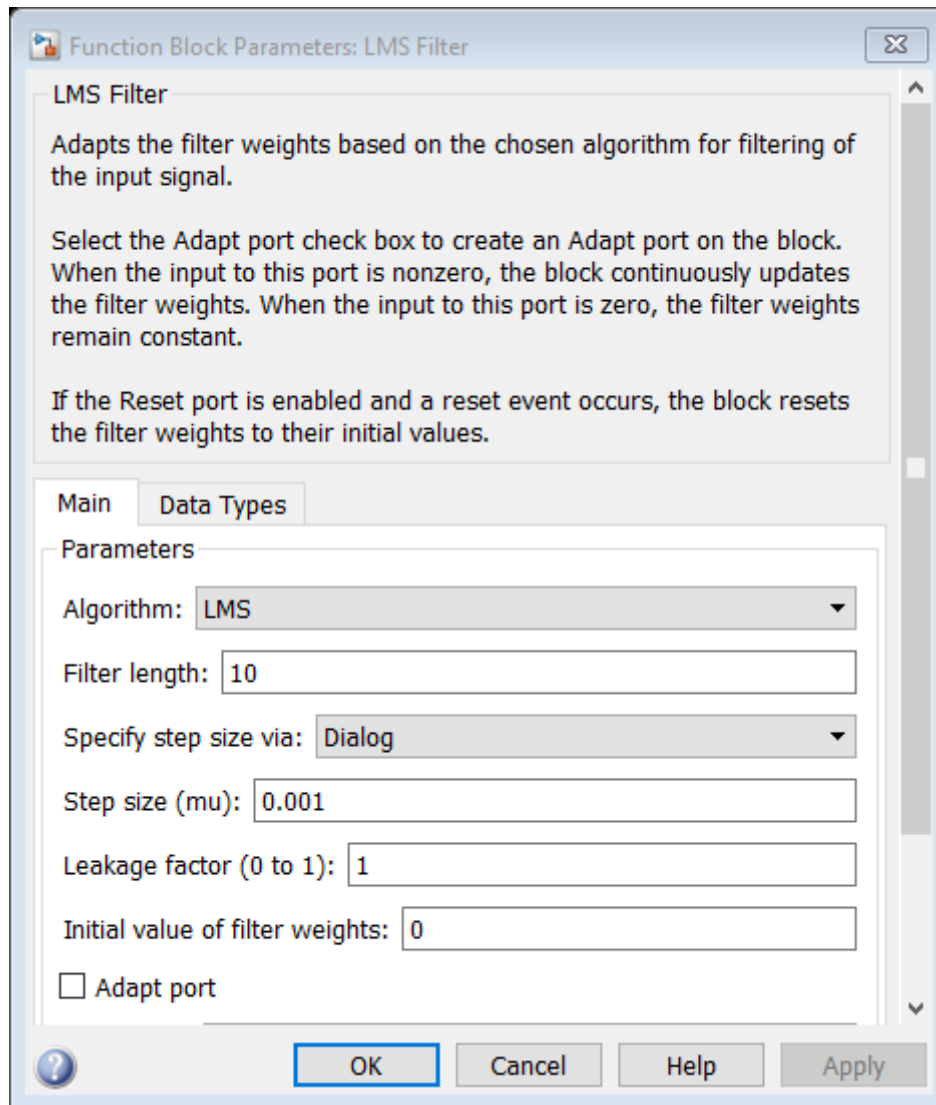


Figura 54 Configuración de parámetros LMS para un factor de convergencia a 0.001 con 10 coeficientes

Fuente: Elaboración propia

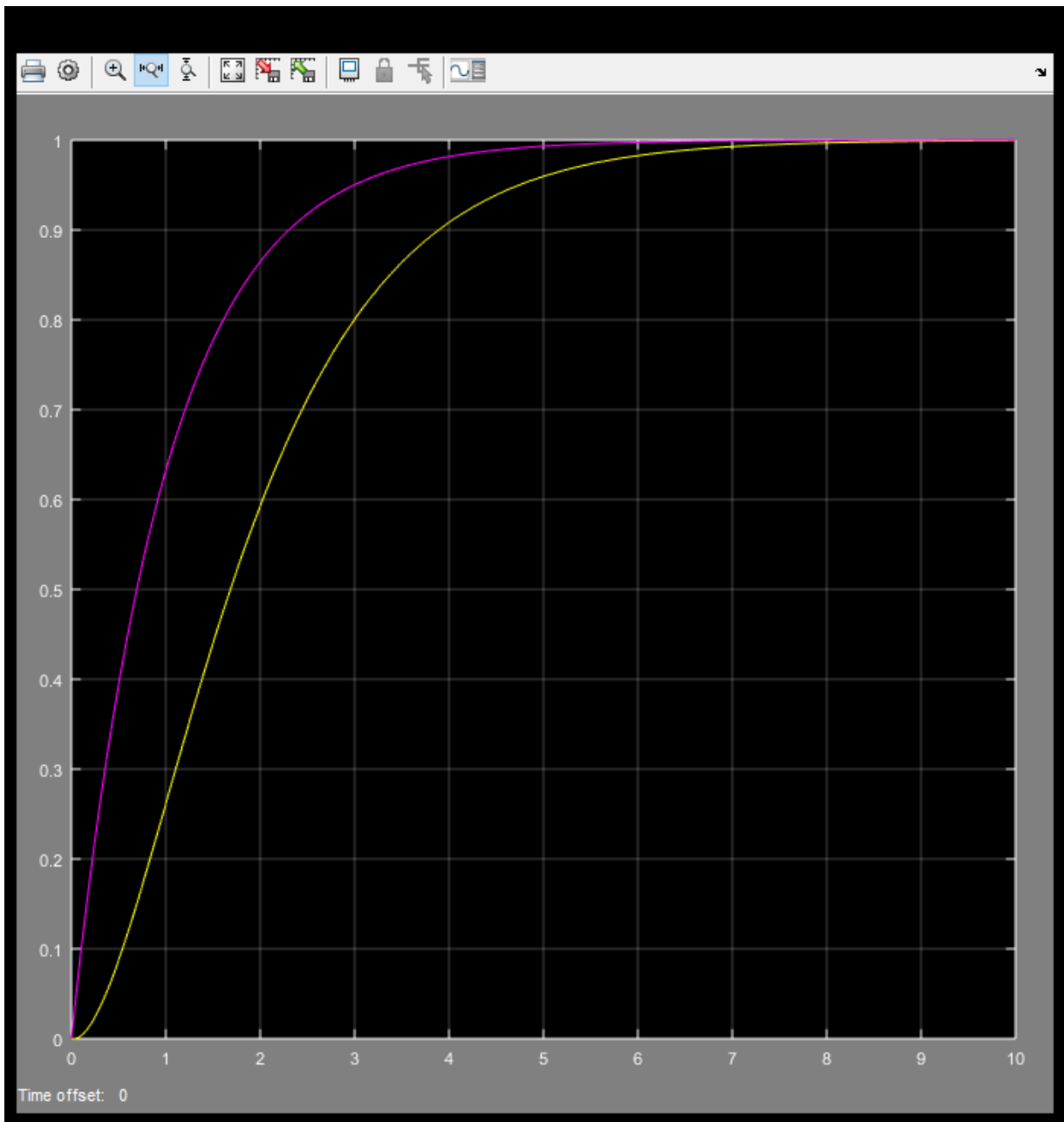


Figura 55 Respuesta transitoria para un factor de convergencia a 0.001 con 10 coeficientes

Fuente: Elaboración propia

Desfasaje de 1.2 segundos

4.2.5. Factor de convergencia 0.01 con 10 coeficientes

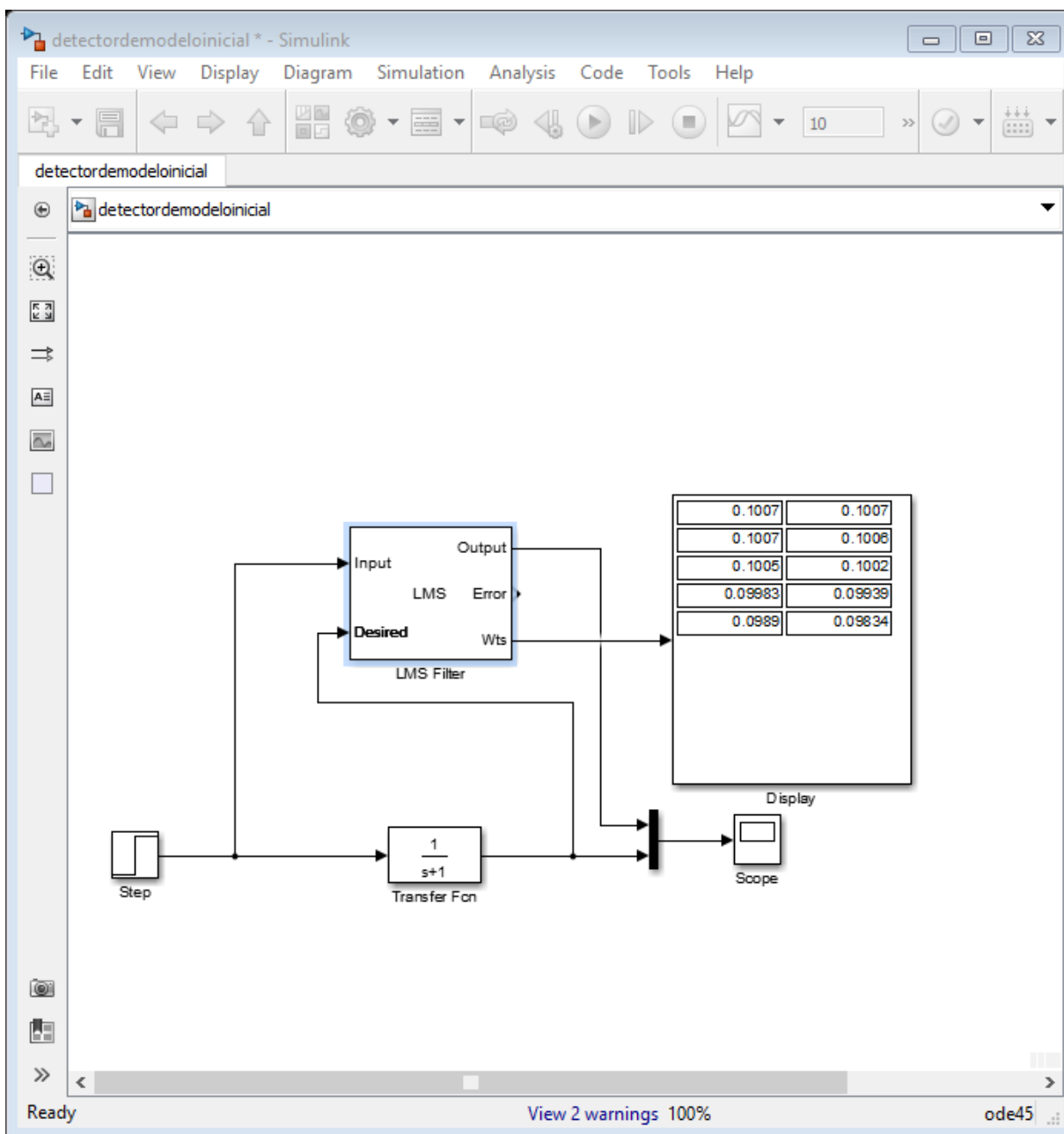


Figura 56 Configuración del sistema en simulink para un factor de convergencia a 0.01 con 10 coeficientes

Fuente: Elaboración propia

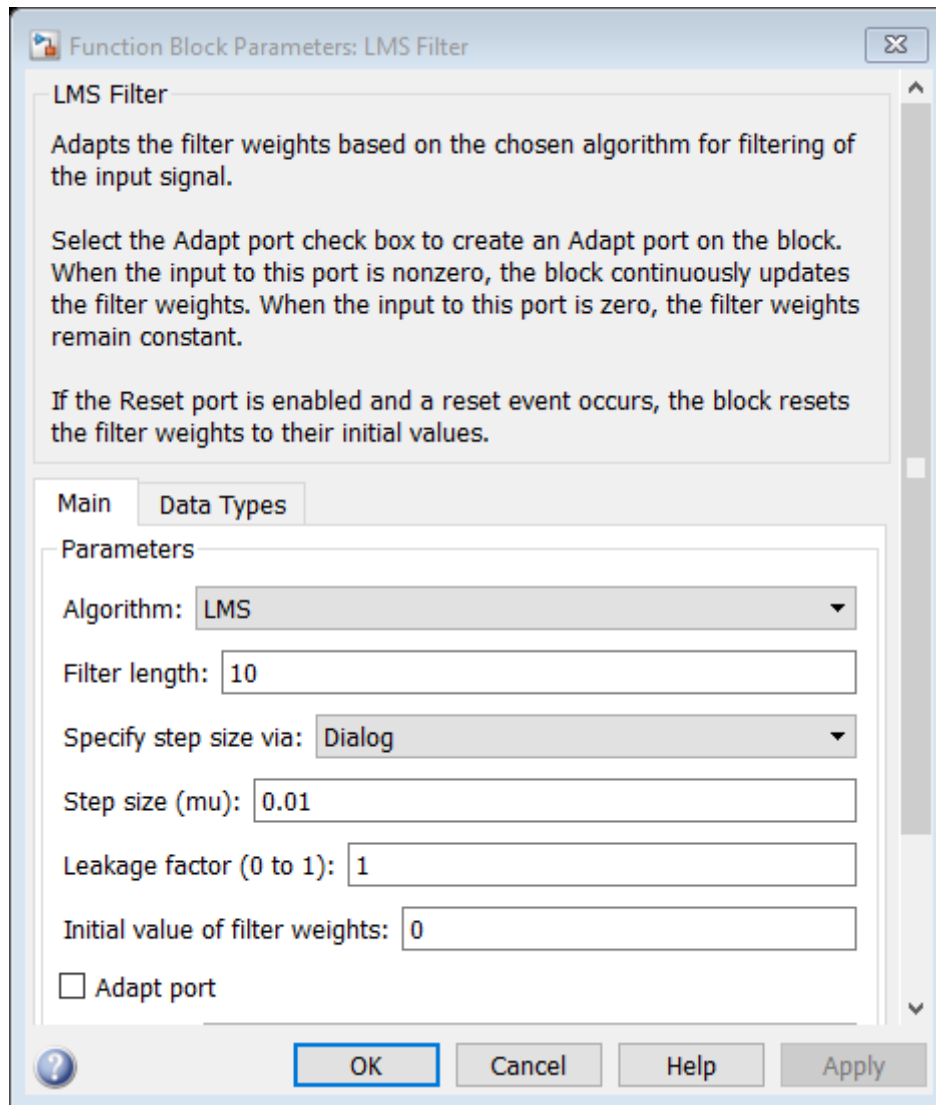


Figura 57 Configuración de parámetros LMS para un factor de convergencia a 0.01 con 10 coeficientes

Fuente: Elaboración propia

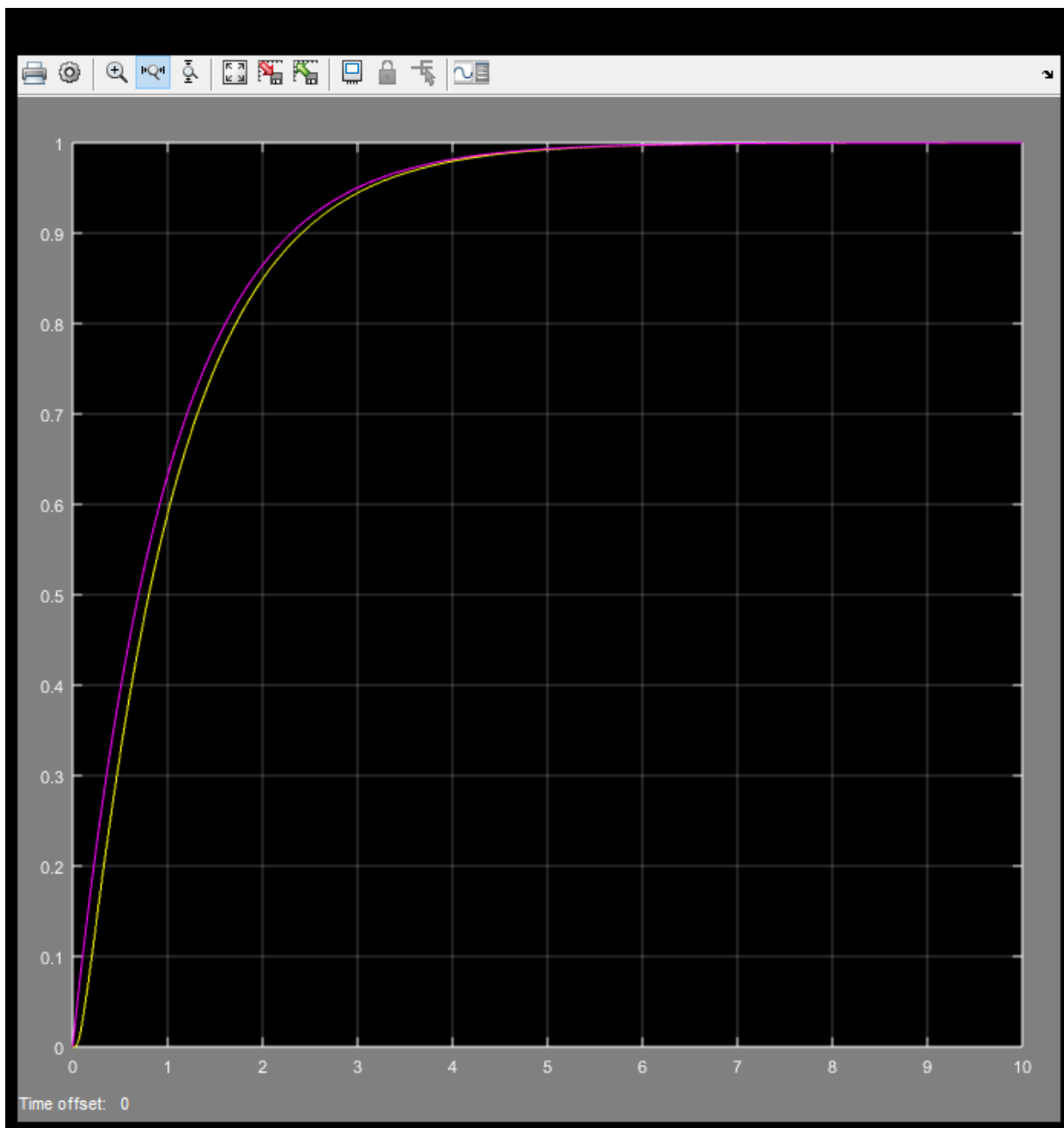


Figura 58 Respuesta del sistema para un factor de convergencia de 0.01 con 10 coeficientes

Fuente: Elaboración propia

Desfasaje de 100 milisegundos

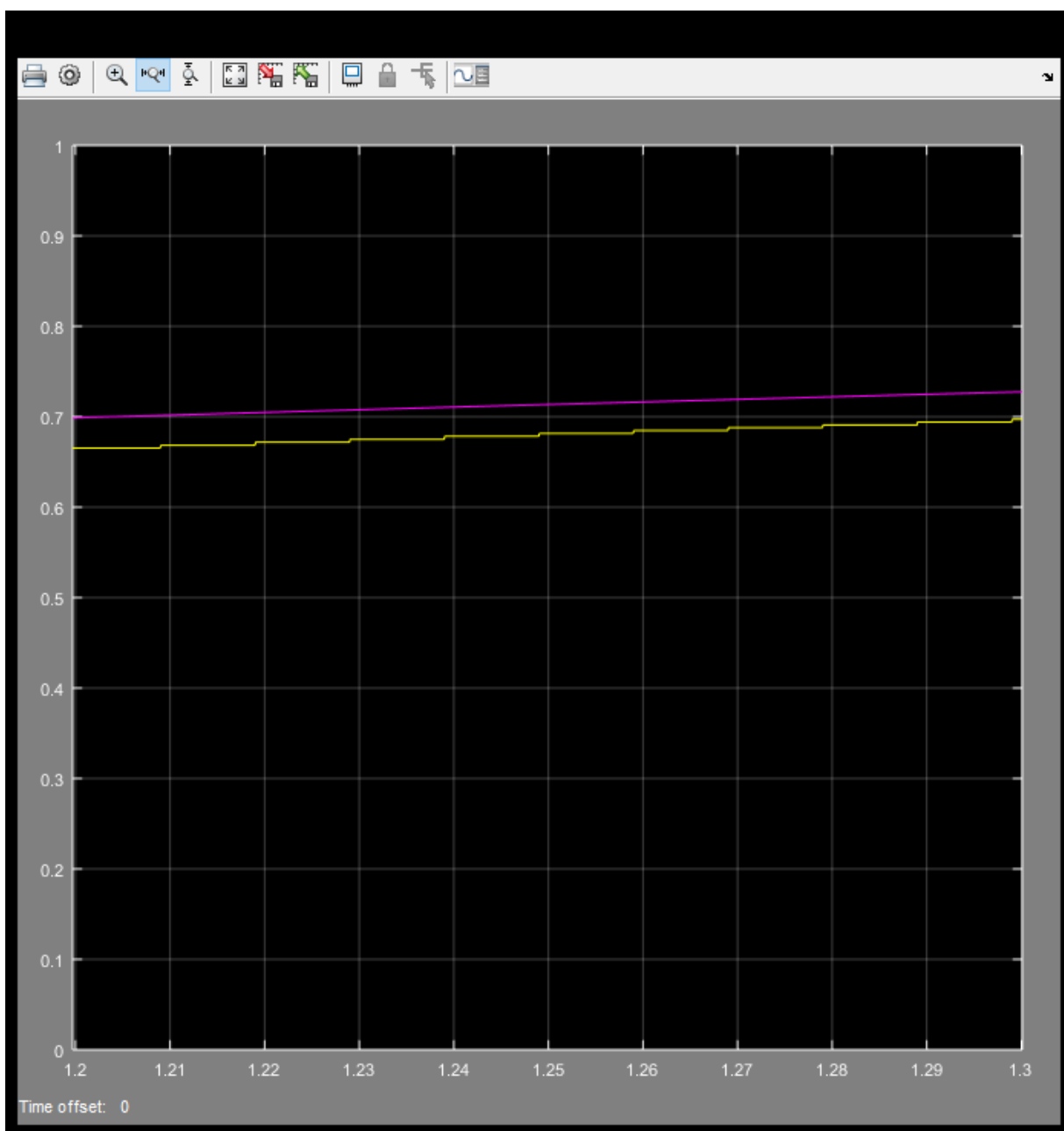


Figura 59 Respuesta transitoria para un factor de convergencia a 0.01 con 10 coeficientes

Fuente: Elaboración propia

4.2.6. Factor de convergencia 0.1 con 10 coeficientes

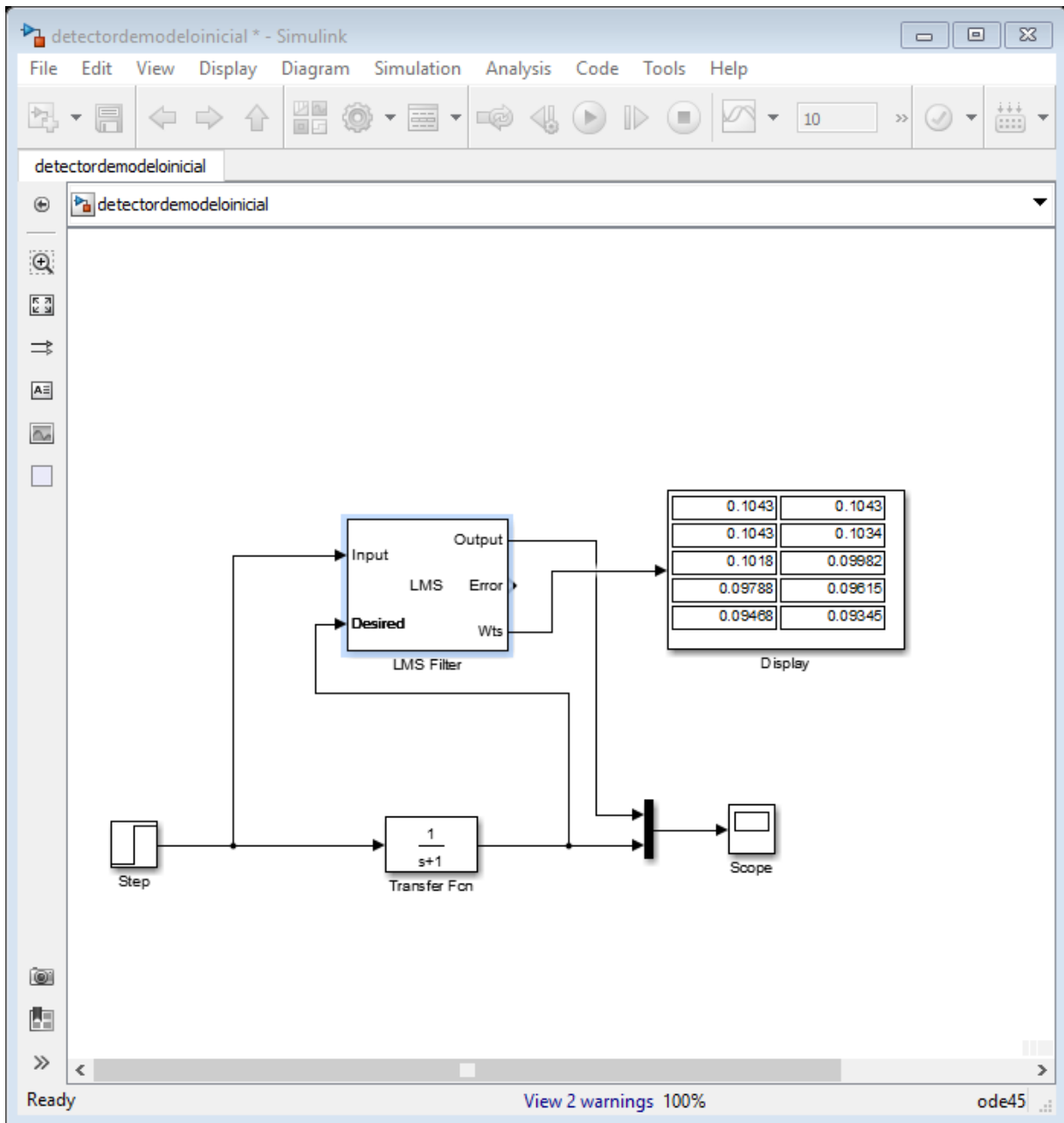


Figura 60 Configuración del sistema en simulink para un factor de convergencia a 0.1 con 10 coeficientes

Fuente: Elaboración propia

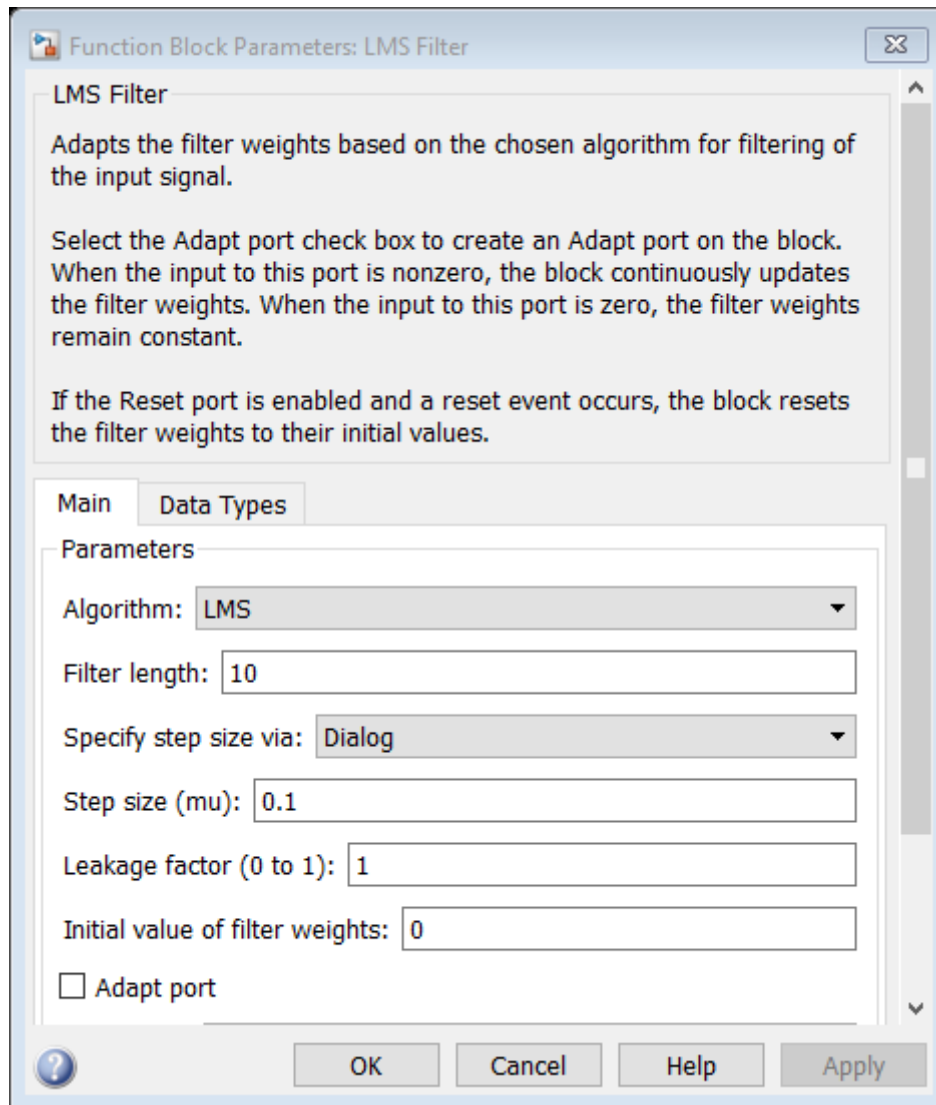


Figura 61 Configuración de parámetros LMS para un factor de convergencia a 0.1 con 10 coeficientes

Fuente: Elaboración propia

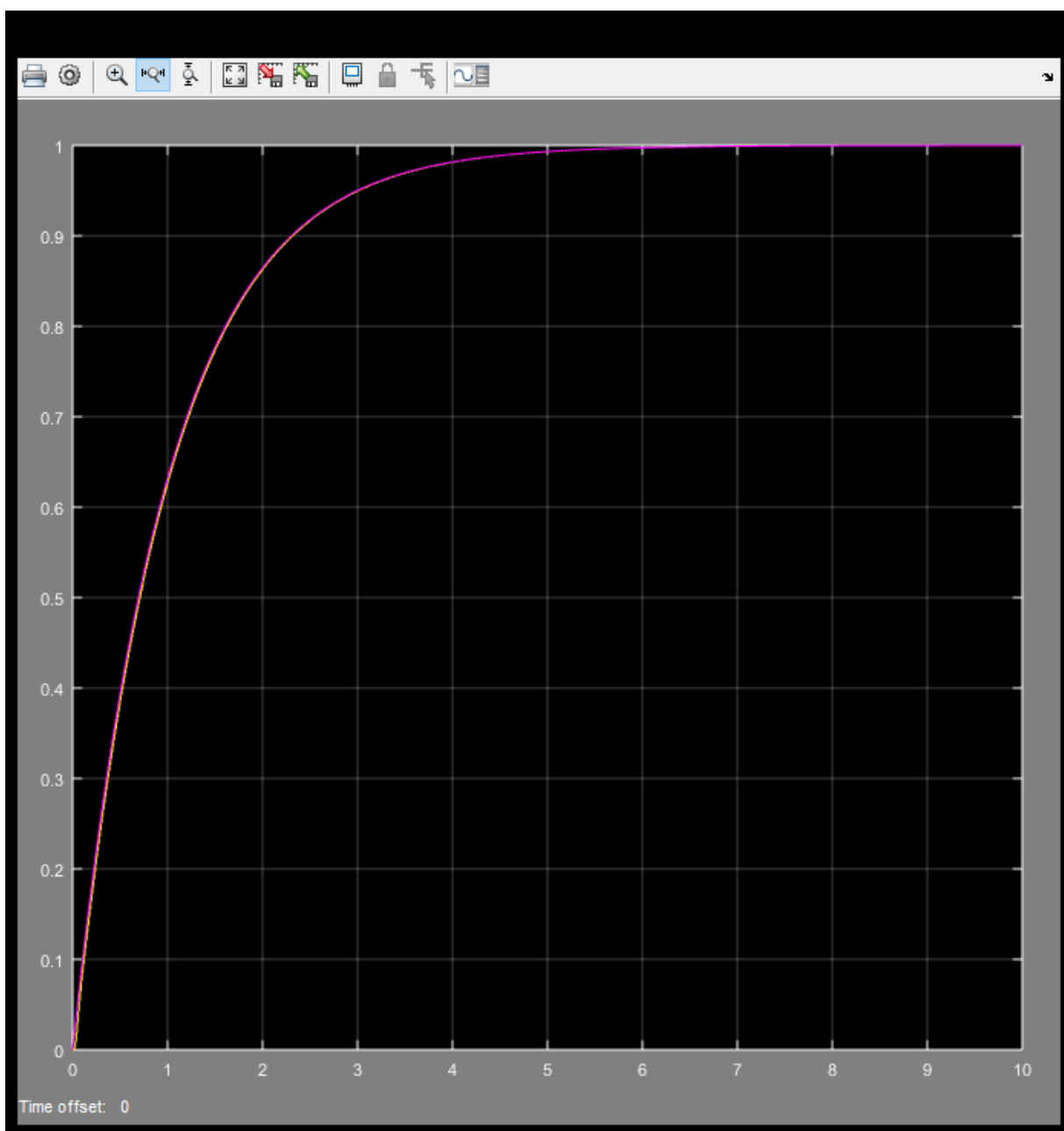


Figura 62 Respuesta del sistema para un factor de convergencia a 0.1 con 10 coeficientes

Fuente: Elaboración propia

Desfasaje de 10 milisegundos

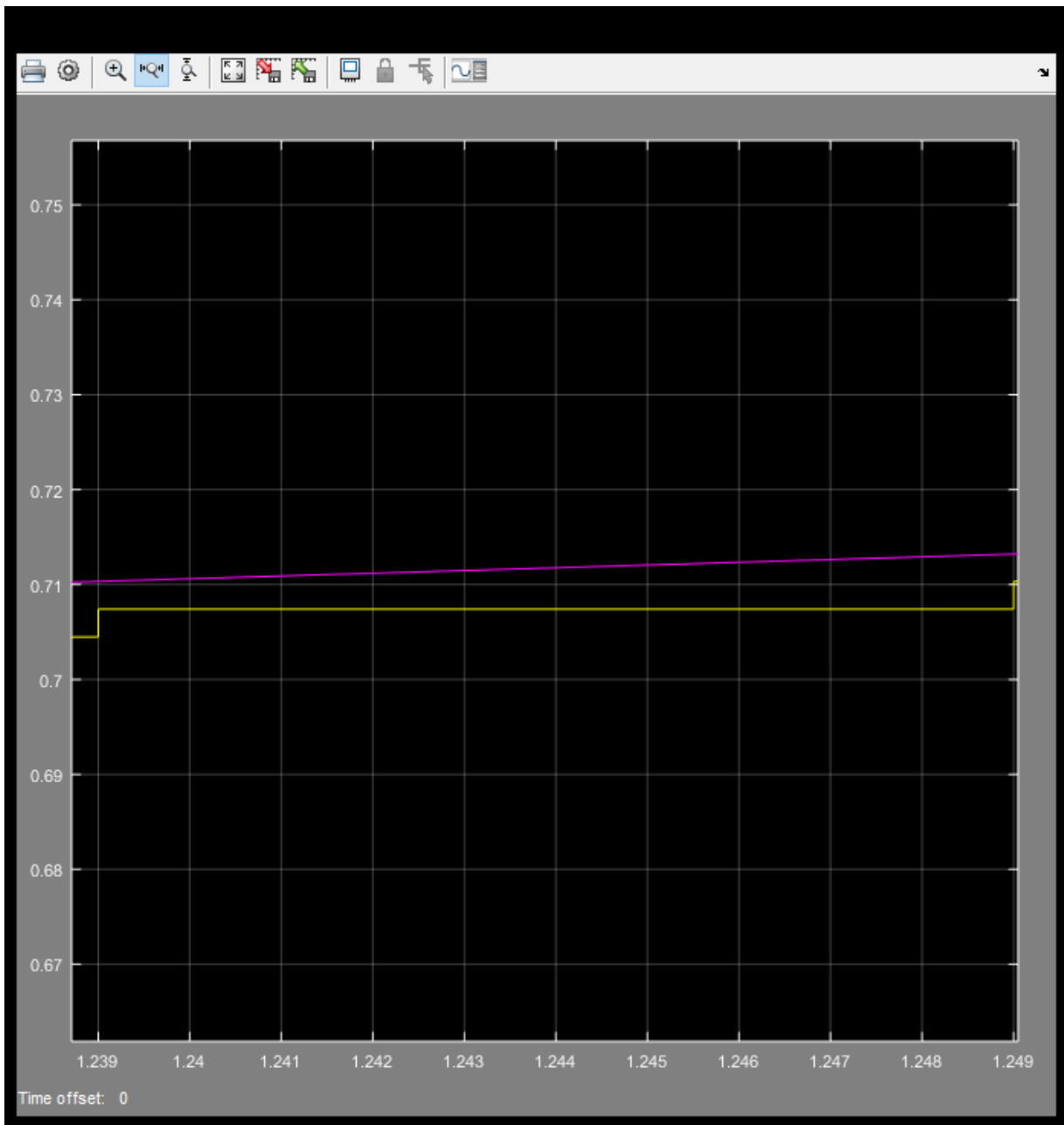


Figura 63 Respuesta transitoria para un factor de convergencia a 0.1 con 10 coeficientes

Fuente: Elaboración propia

Circuito basado en plataforma de 8 bits.

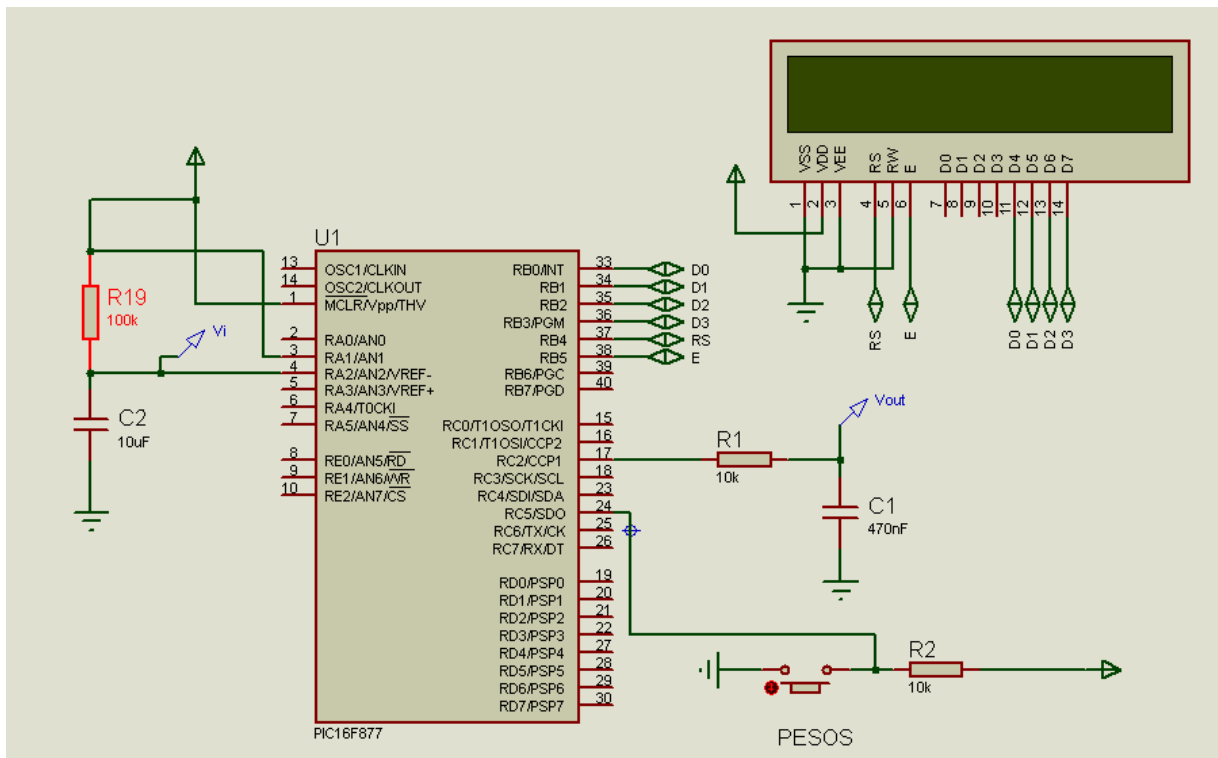


Figura 64 Circuito basado en plataforma de 8 bits

Fuente: Elaboración propia

Modelo de la planta

$$\frac{1}{R_{19}C_2s + 1} = \frac{1}{s + 1}$$

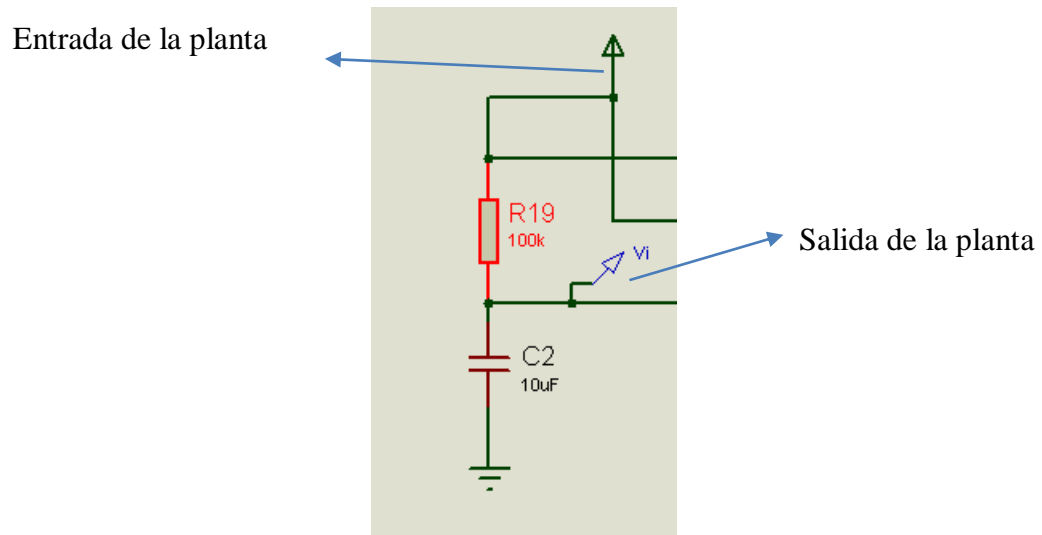


Figura 65 Entrada y salida de la planta

Fuente: Elaboración propia

Programa para la identificación de modelo con 10 coeficientes.

```

Device=16F877
EData 10
Xtal 20
Declare Adin_Res = 10
Declare Adin_Tad = FRC
Declare Adin_Stime = 50
Declare CCP1_Pin PORTC.2
Declare LCD_DTPin PORTB.0
Declare LCD_ENPin PORTB.5
Declare LCD_RSPin PORTB.4
Declare LCD_Interface 4
Declare LCD_Lines 2
On_Hardware_Interrupt GoTo salta
INTCON=$A0
OPTION_REG=7
ADCON1 = $80
TRISA=7
TRISC.5=1
TRISC.0=0
Dim D As Word
Dim R As Word
Dim W02 As Float
Dim W12 As Float
Dim W22 As Float
Dim W32 As Float
Dim W42 As Float
Dim W52 As Float
Dim W62 As Float
Dim W72 As Float
Dim W82 As Float
Dim W92 As Float
Dim Y As Float
Dim I As Byte
Dim AUX As Float
Dim R0 As Float
Dim R1 As Float
Dim R2 As Float
Dim R3 As Float
Dim R4 As Float
Dim R5 As Float
Dim R6 As Float
Dim R7 As Float
Dim R8 As Float
Dim R9 As Float

```

```

Dim U As Float
Dim EROR As Float
U=0.001
R0=0:R1=0:R2=0:R3=0:R4=0:R5=0:R6=0:R7=0:R8=0:R9=0
W02=0:W12=0:W22=0:W32=0:W42=0:W52=0:W62=0:W72=0:W82=0:W92=0
INICIO:
  If PORTC.5=0 Then
    Print At 1,1,Dec W02," ",Dec W12," ",Dec W22
    Print At 2,1,Dec W32," ",Dec W42," ",Dec W52
  EndIf
GoTo INICIO

salta:
Context Save
  INTCON=$A0
  TMR0=60 ' (256-x)256/5=tiempo de muestreo en Us 60=10.0352ms
  PORTC.0=1
  R9=R8:R8=R7:R7=R6:R6=R5:R5=R4:R4=R3:R3=R2:R2=R1:R1=R0
  D=ADIn 2
  R=ADIn 1
  R0=R*5/1023
  AUX=D*5/1023
  Y=R0*W02+R1*W12+R2*W22+R3*W32+R4*W42+R5*W52+R6*W62+R7*W72+R
  8*W82+R9*W92
  EROR=AUX-Y
  W02=W02+R0*EROR*U
  W12=W12+R1*EROR*U
  W22=W22+R2*EROR*U
  W32=W32+R3*EROR*U
  W42=W42+R4*EROR*U
  W52=W52+R5*EROR*U
  W62=W62+R6*EROR*U
  W72=W72+R7*EROR*U
  W82=W82+R8*EROR*U
  W92=W92+R9*EROR*U
  AUX=Y*51
  I=AUX
  HPWM 1,I,20000
PORTC.0=0
Context Restore

```


Factor de convergencia a 0.01 y número de coeficientes a 10

$W0=10.62:W1=3.591:W2=-1.7:W3=-5.23:W4=-6.986:W5=-6.96:W6=-5.152:W7=-1.569:W8=3.774:W9=10.86$

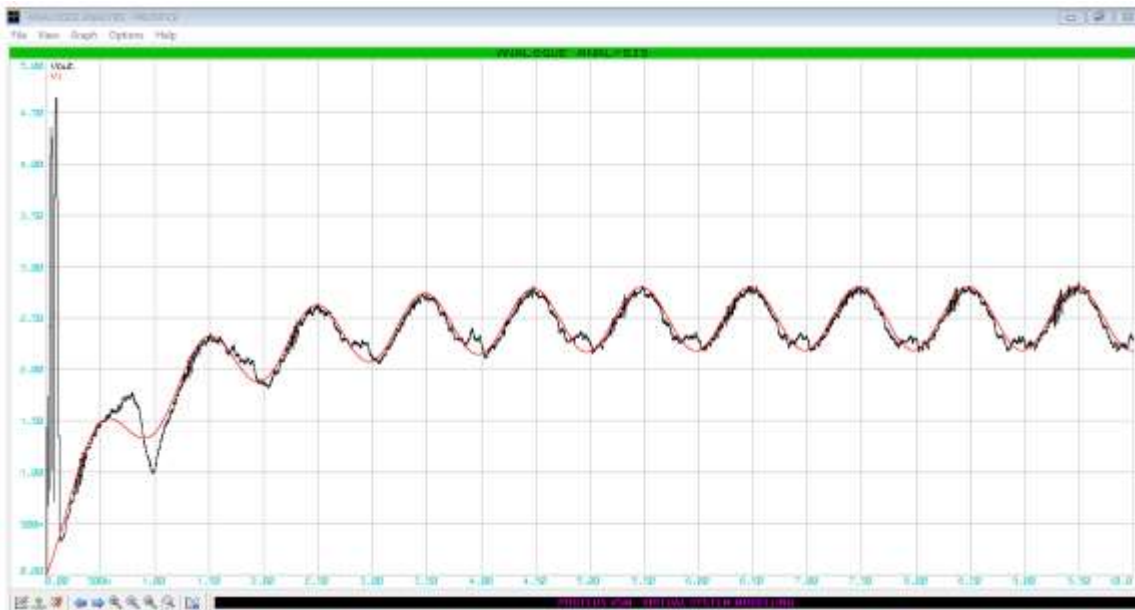


Figura 68 Respuesta para un factor de convergencia a 0.01 y número de coeficientes a 10

Fuente: Elaboración propia

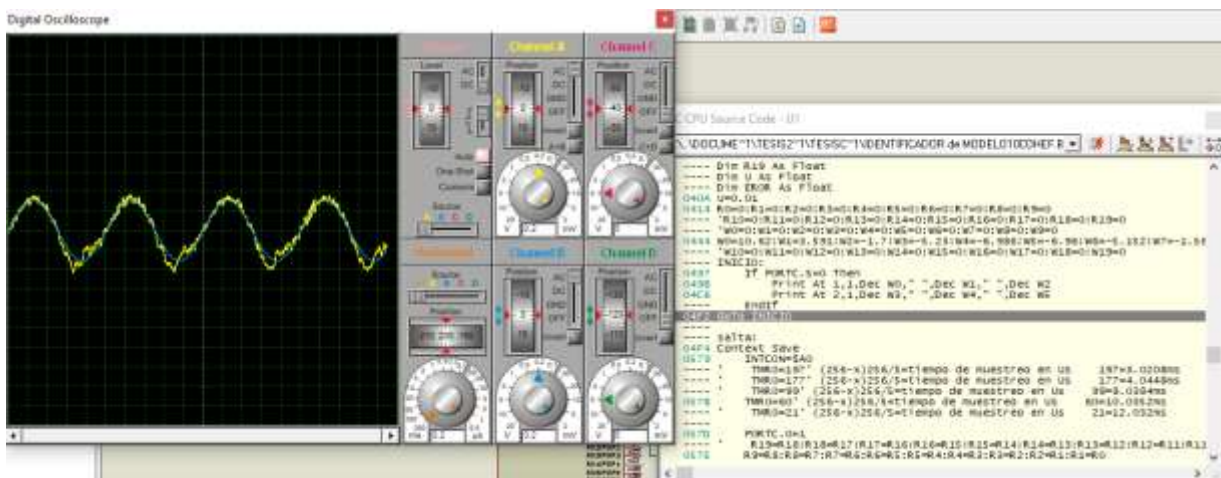


Figura 69 Respuesta en Proteus para un factor de convergencia a 0.01 y número de coeficientes a 10

Fuente: Elaboración propia

Factor de convergencia a 0.015 y número de coeficientes a 10

$W0=10.56:W1=3.579:W2=-1.68:W3=-5.188:W4=-6.932:W5=-6.905:W6=-5.106:W7=-1.543:W8=3.772:W9=10.82$

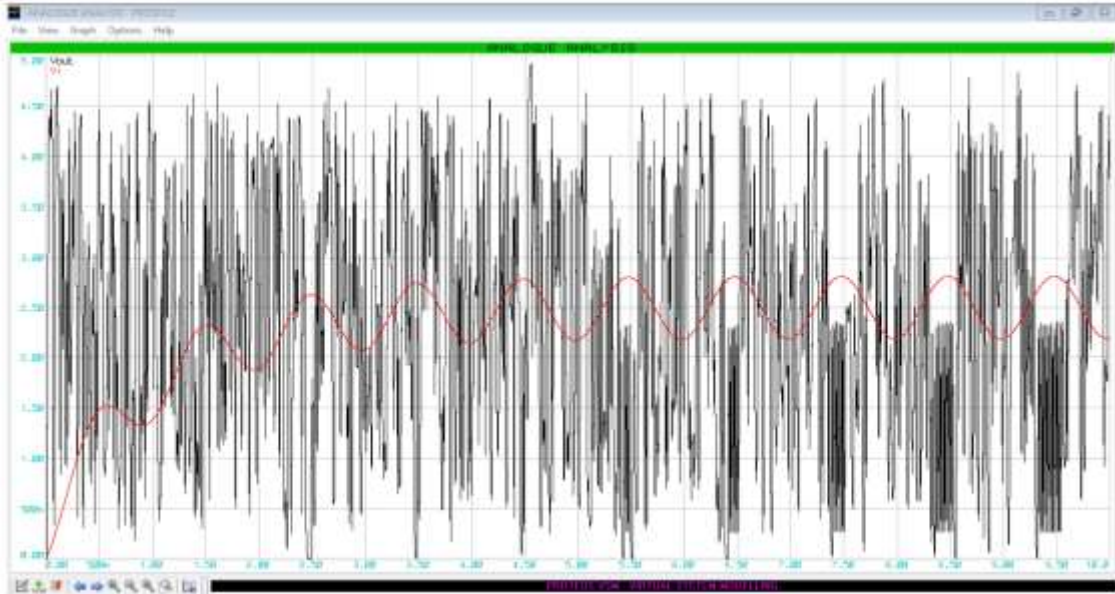


Figura 70 Respuesta para un factor de convergencia a 0.015 y número de coeficientes a 10

Fuente: Elaboración propia

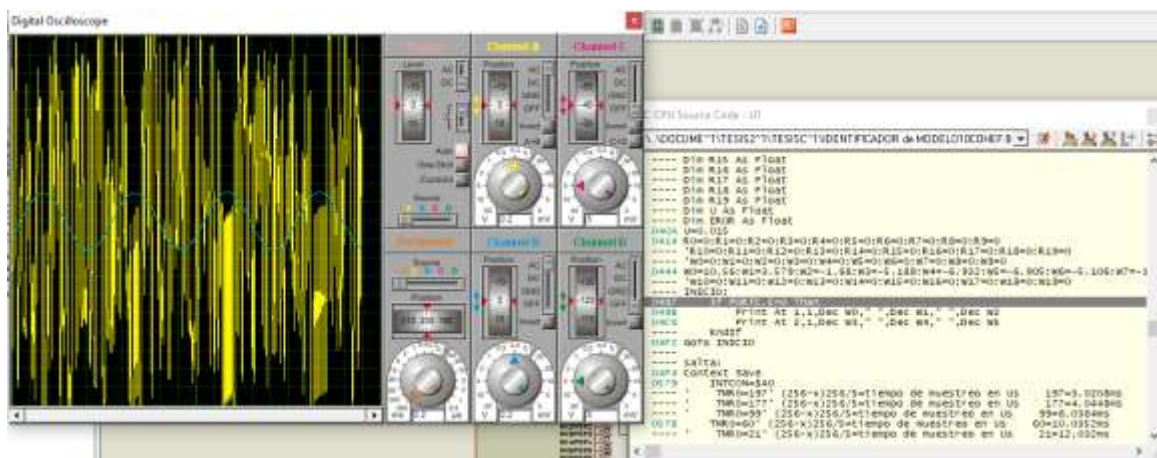


Figura 71 Respuesta en Proteus para un factor de convergencia a 0.015 y número de coeficientes a 10

Fuente: Elaboración propia

Factor de convergencia a 0.02 y número de coeficientes a 10

$W0=10.63:W1=3.614:W2=-1.67:W3=-5.196:W4=-6.951:W5=-6.926:W6=-5.121:W7=-1.544:W8=3.791:W9=10.86$

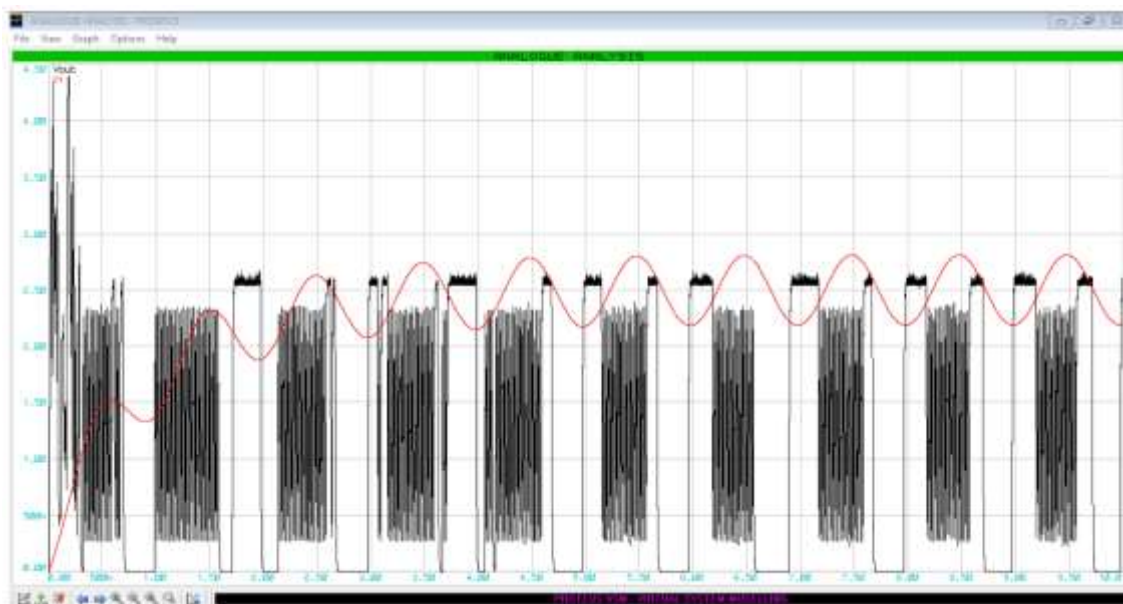


Figura 72 Respuesta para un factor de convergencia a 0.02 y número de coeficientes a 10

Fuente: Elaboración propia

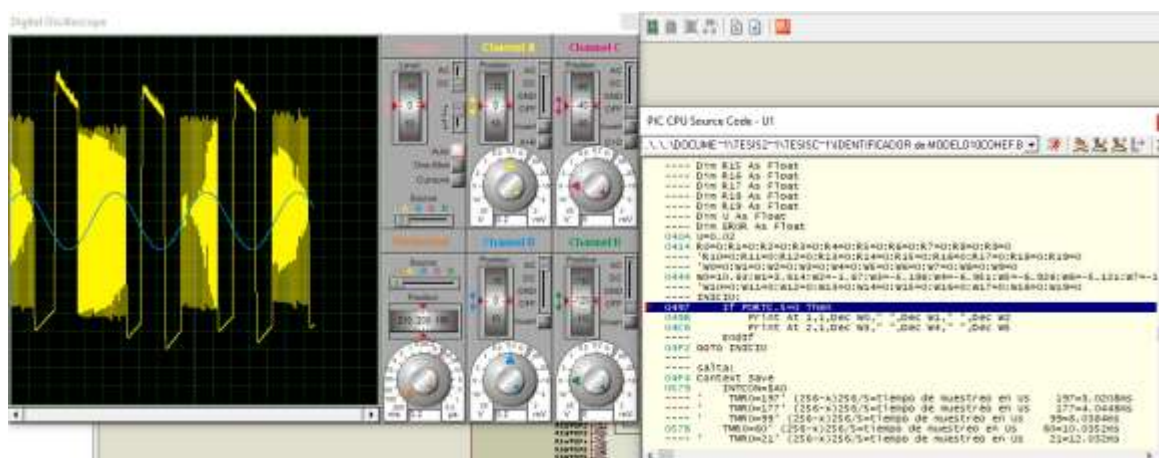


Figura 73 Respuesta en Proteus para un factor de convergencia a 0.02 y número de coeficientes a 10

Fuente: Elaboración propia

Factor de convergencia 0.001 con 10 coeficientes

W0=1.413:W1=0.9849:W2=0.6003:W3=0.2607:W4=-0.03251:W5=-
0.2782:W6=-0.4753:W7=-0.6231:W8=-0.721:W9=-0.7686
W10=-0.7658:W11=-0.7124:W12=-0.6088:W13=-0.4562:W14=-
0.2524:W15=-0.001103:W16=0.2977:W17=0.6429:W18=1.033:W19=1.467

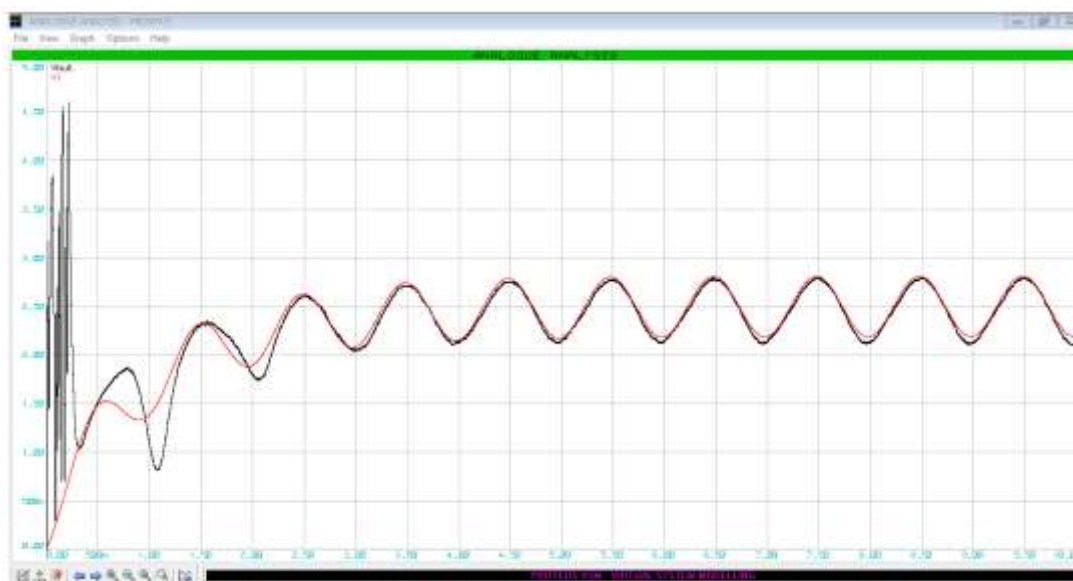


Figura 74 Respuesta para un factor de convergencia a 0.001 y número de coeficientes a 10

Fuente: Elaboración propia

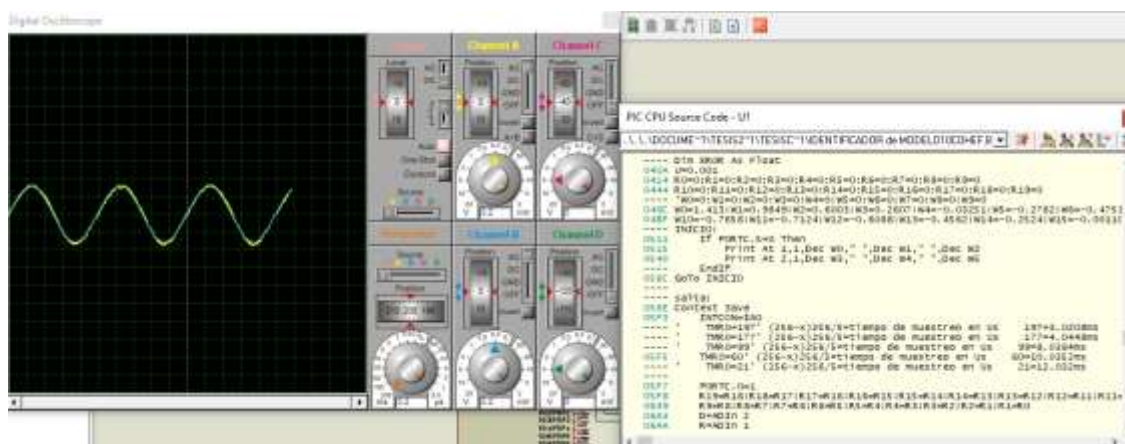


Figura 75 Respuesta en Proteus para un factor de convergencia a 0.001 y número de coeficientes a 10

Fuente: Elaboración propia

Factor de convergencia 0.001 con 20 coeficientes

W0=1.413:W1=0.9852:W2=0.6007:W3=0.2612:W4=-0.0319:W5=-
0.2776:W6=-0.4747:W7=-0.6227:W8=-0.7207:W9=-0.7684
W10=-0.7667:W11=-0.7124:W12=-0.6088:W13=-0.4553:W14=-
0.2524:W15=-0.001069:W16=0.2978:W17=0.6431:W18=1.033:W19=1.467

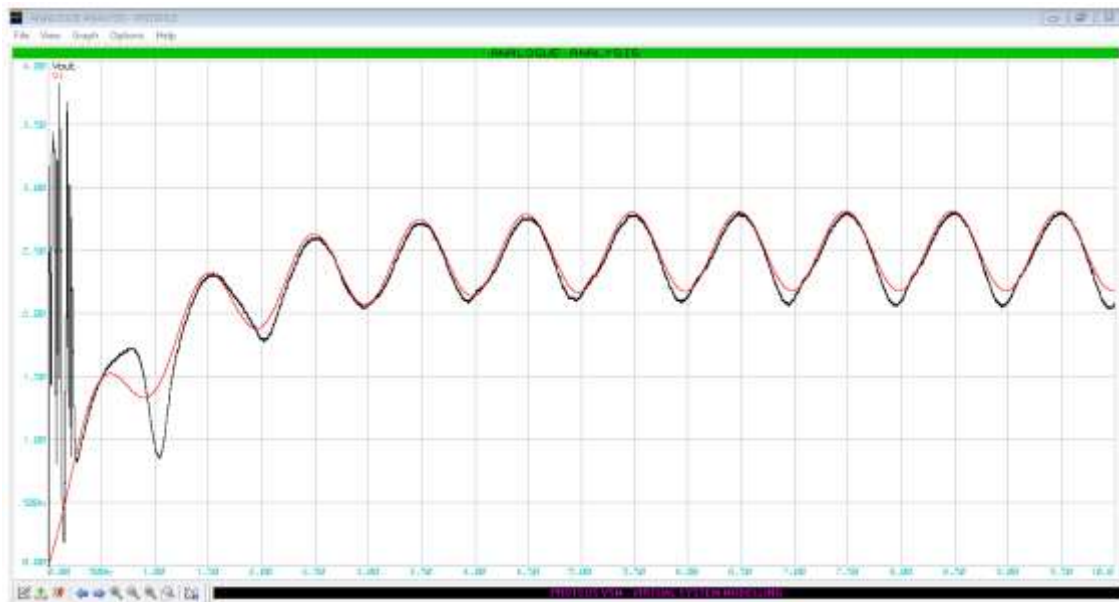


Figura 76 Respuesta para un factor de convergencia a 0.001 y número de coeficientes a 20

Fuente: Elaboración propia

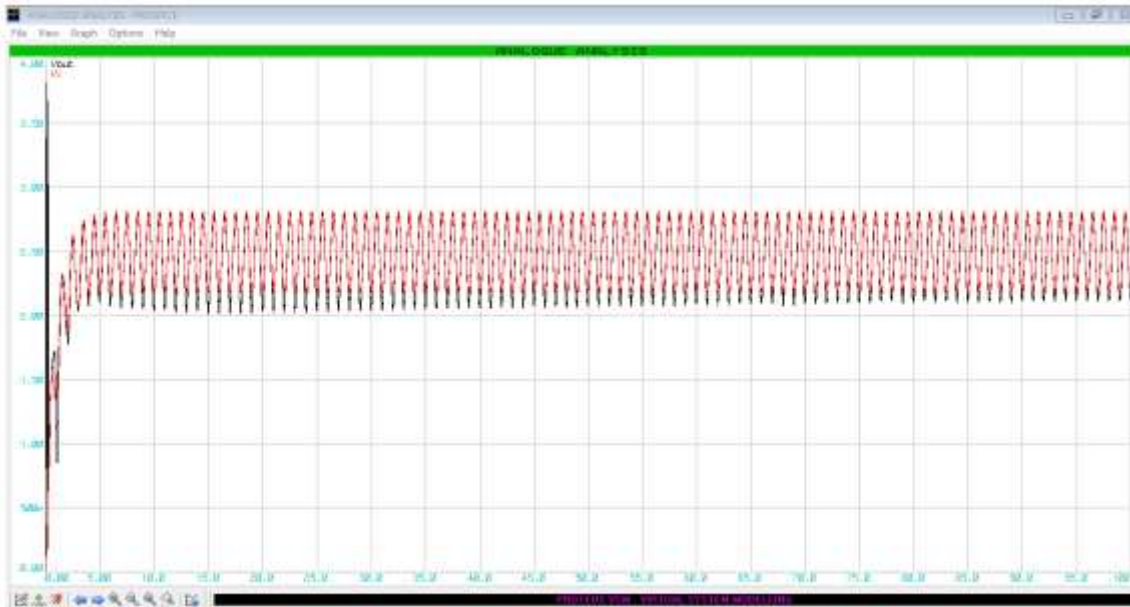


Figura 77 Respuesta en PROSPICE para un factor de convergencia a 0.001 y número de coeficientes a 20

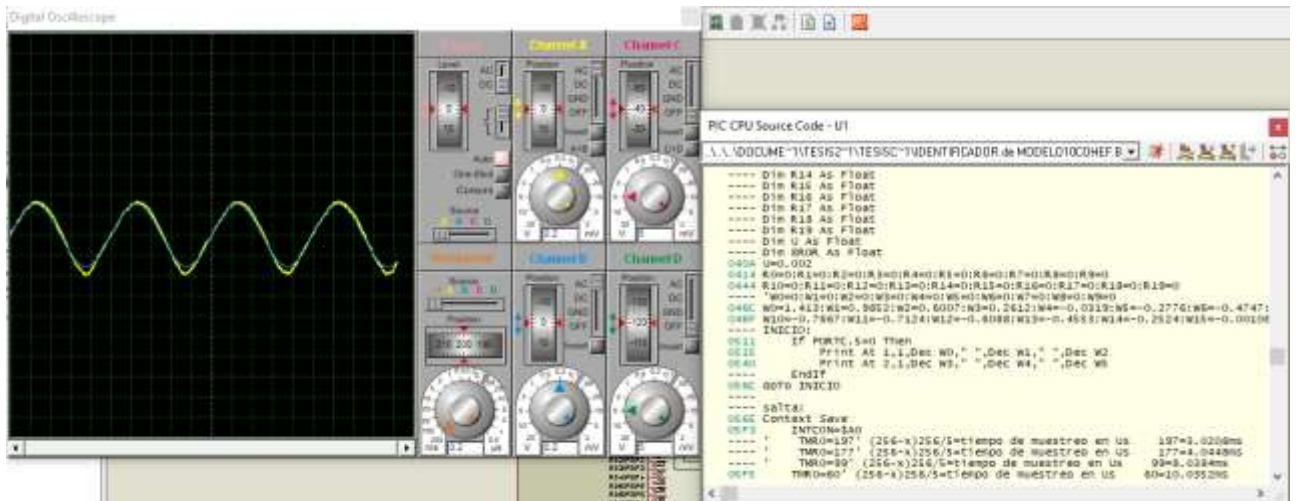


Figura 78 Respuesta en Proteus para un factor de convergencia a 0.001 y número de coeficientes a 20

Factor de convergencia 0.008 con 20 coeficientes

W0=1.415:W1=0.9877:W2=0.6036:W3=0.264:W4=-0.02949:W5=-
0.2757:W6=-0.4734:W7=-0.6217:W8=-0.7199:W9=-0.7676
W10=-0.7647:W11=-0.7112:W12=-0.6074:W13=-0.4537:W14=-
0.2509:W15=-0.0004203:W16=0.2991:W17=0.644:W18=1.034:W19=1.467

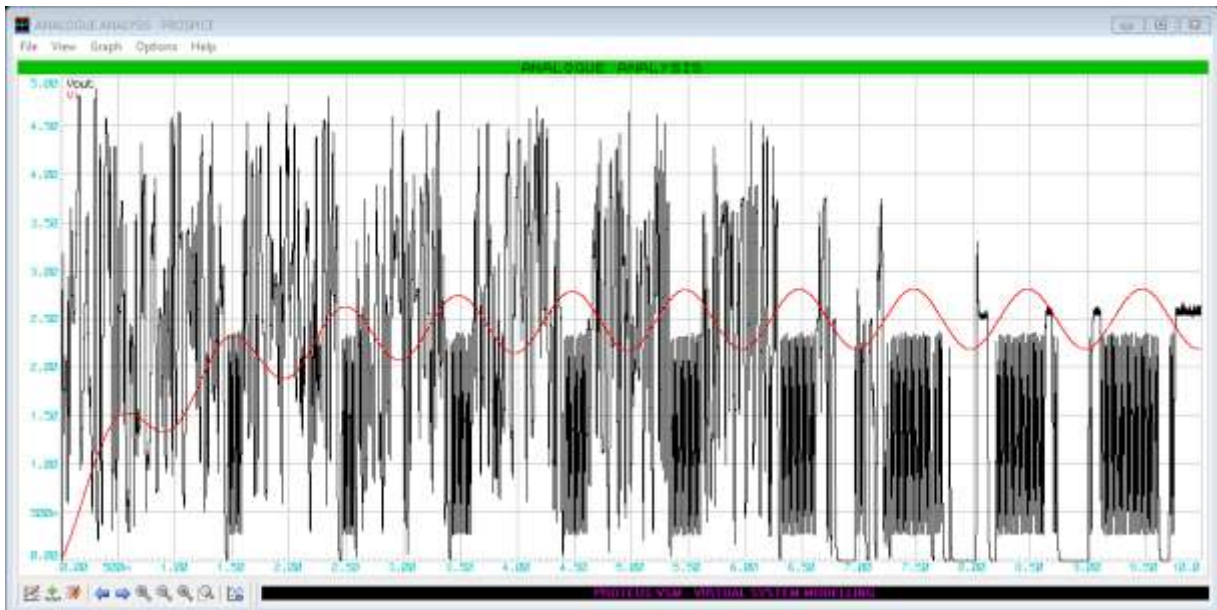


Figura 79 Respuesta en PROSPICE para un factor de convergencia a 0.008 y número de coeficientes a 20

Fuente: Elaboración propia

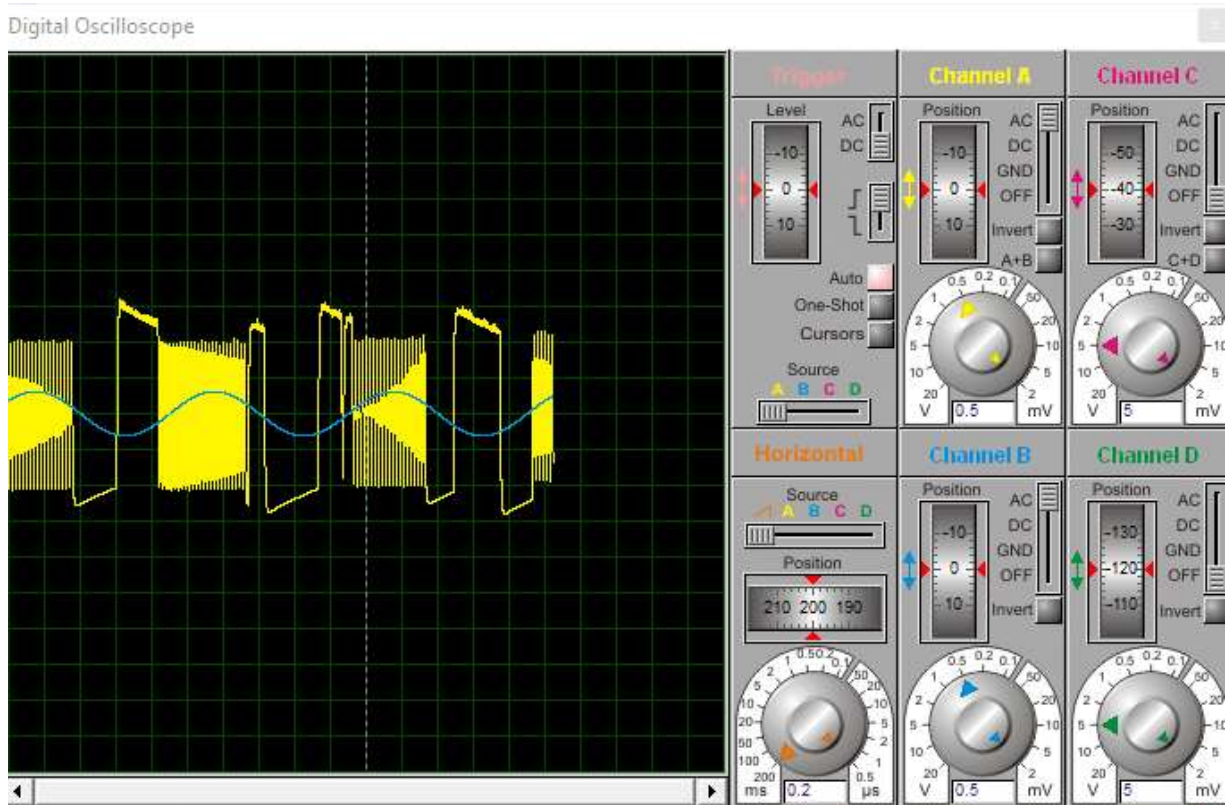


Figura 80 Respuesta en Proteus para un factor de convergencia a 0.008 y número de coeficientes a 20

Fuente: Elaboración propia

Factor de convergencia 0.001 con 6 coeficientes



Figura 81 Respuesta para un factor de convergencia a 0.001 y número de coeficientes a 6

Fuente: Elaboración propia

Factor de convergencia 0.01 con 6 coeficientes



Figura 82 Respuesta para un factor de convergencia a 0.01 y número de coeficientes a 6

Fuente: Elaboración propia

Factor de convergencia 0.1 con 6 coeficientes

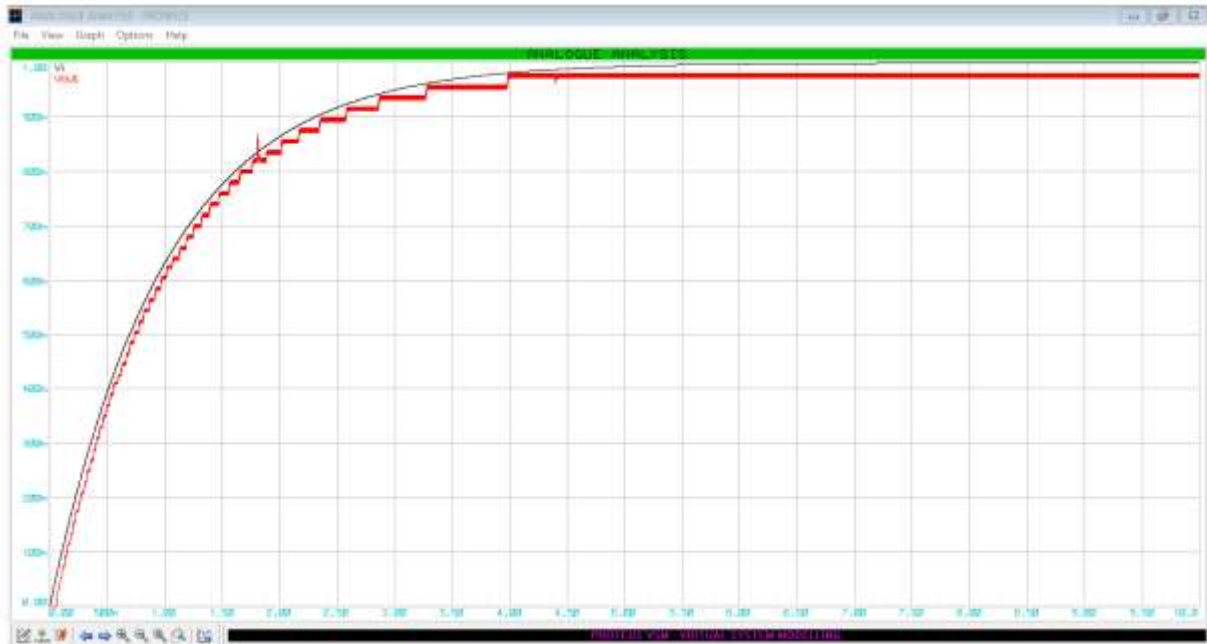


Figura 83 Respuesta para un factor de convergencia a 0.1 y número de coeficientes a 6

Fuente: Elaboración propia

Tiempo de duración del algoritmo es de 3.21ms y se realiza cada 10ms

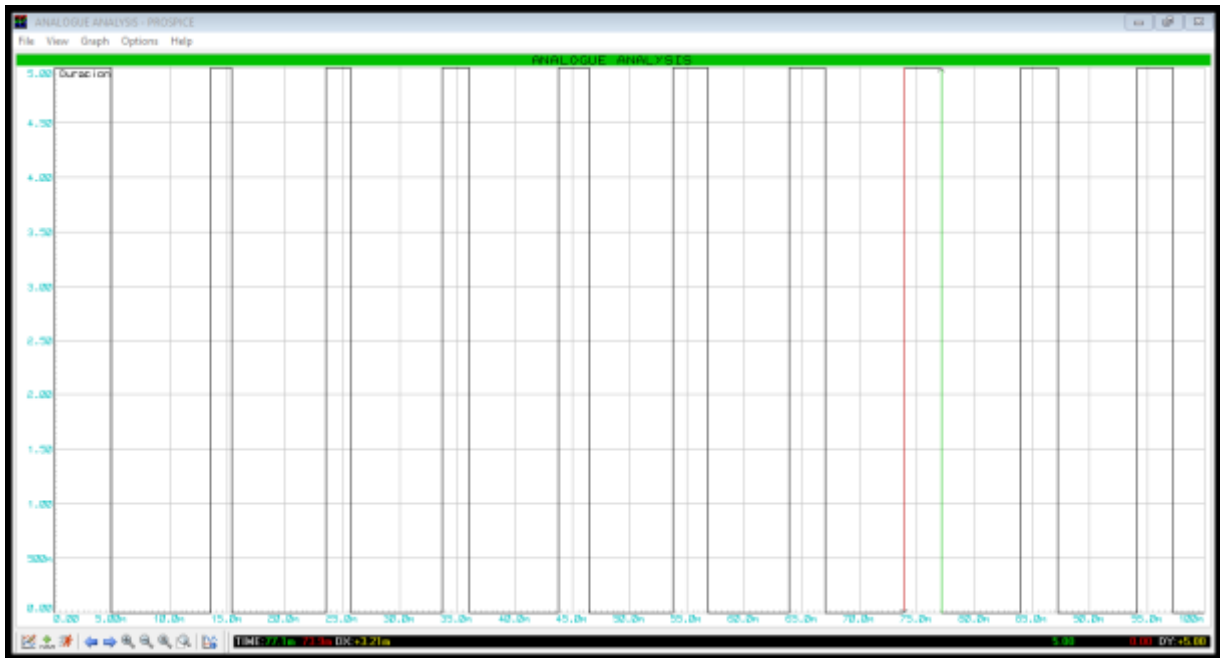


Figura 84 Tiempo de duración del algoritmo para un factor de convergencia a 0.1 y número de coeficientes a 6

Fuente: Elaboración propia

Factor de convergencia 0.01 con 10 coeficientes



Figura 86 Respuesta en PROSPICE para un factor de convergencia a 0.01 y número de coeficientes a 10

Fuente: Elaboración propia

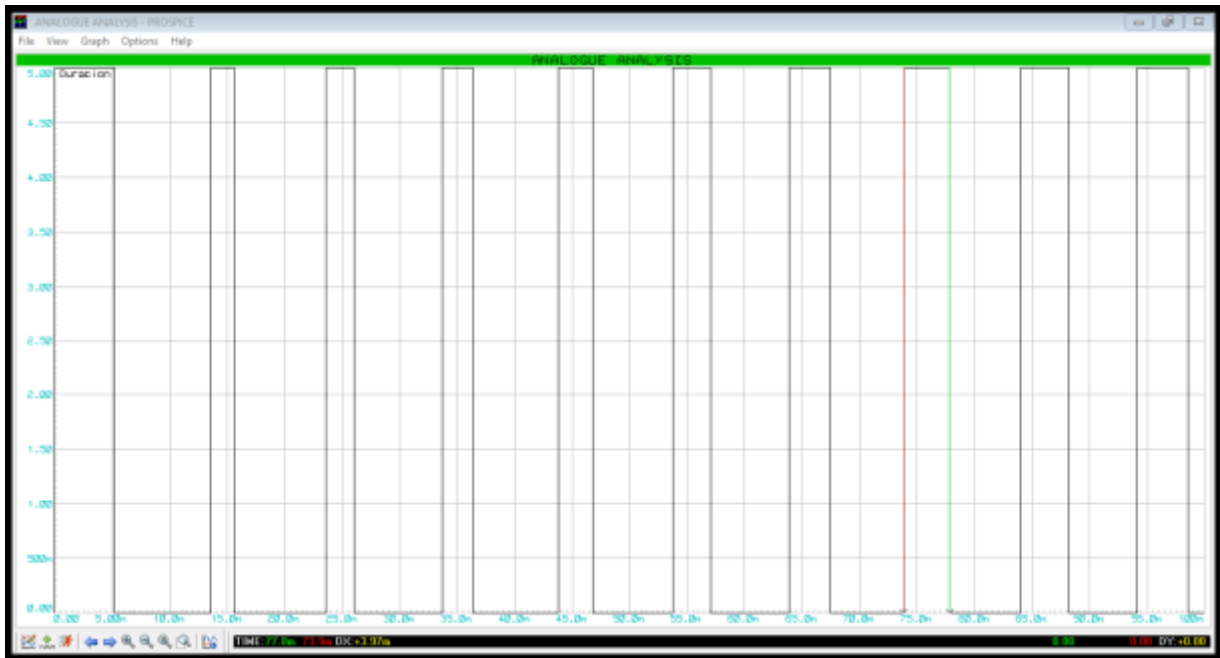


Figura 88 Tiempo de duración del algoritmo para un factor de convergencia a 0.1 y número de coeficientes a 10

Fuente: Elaboración propia

Sistema de segundo orden

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{s^2 + 3s + 1}$$

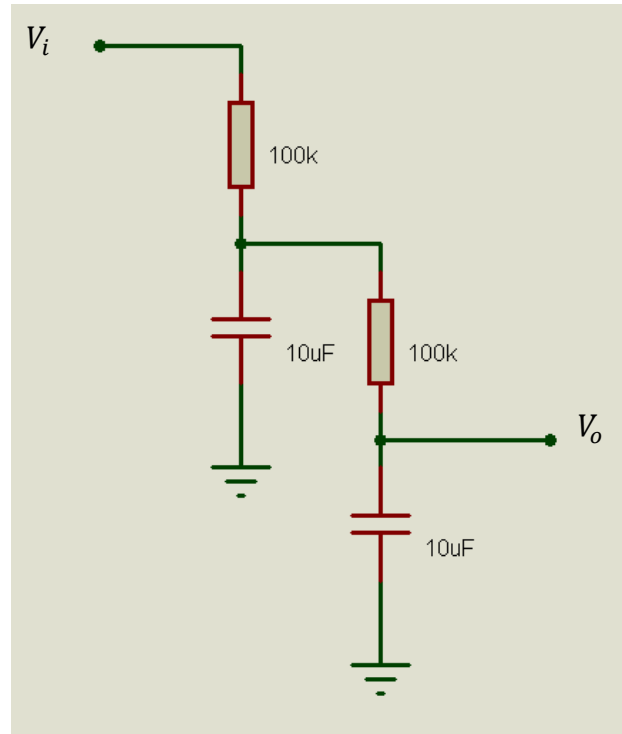


Figura 89 Circuito de segundo orden

Fuente: Elaboración propia

Factor de convergencia 0.001 con 10 coeficientes

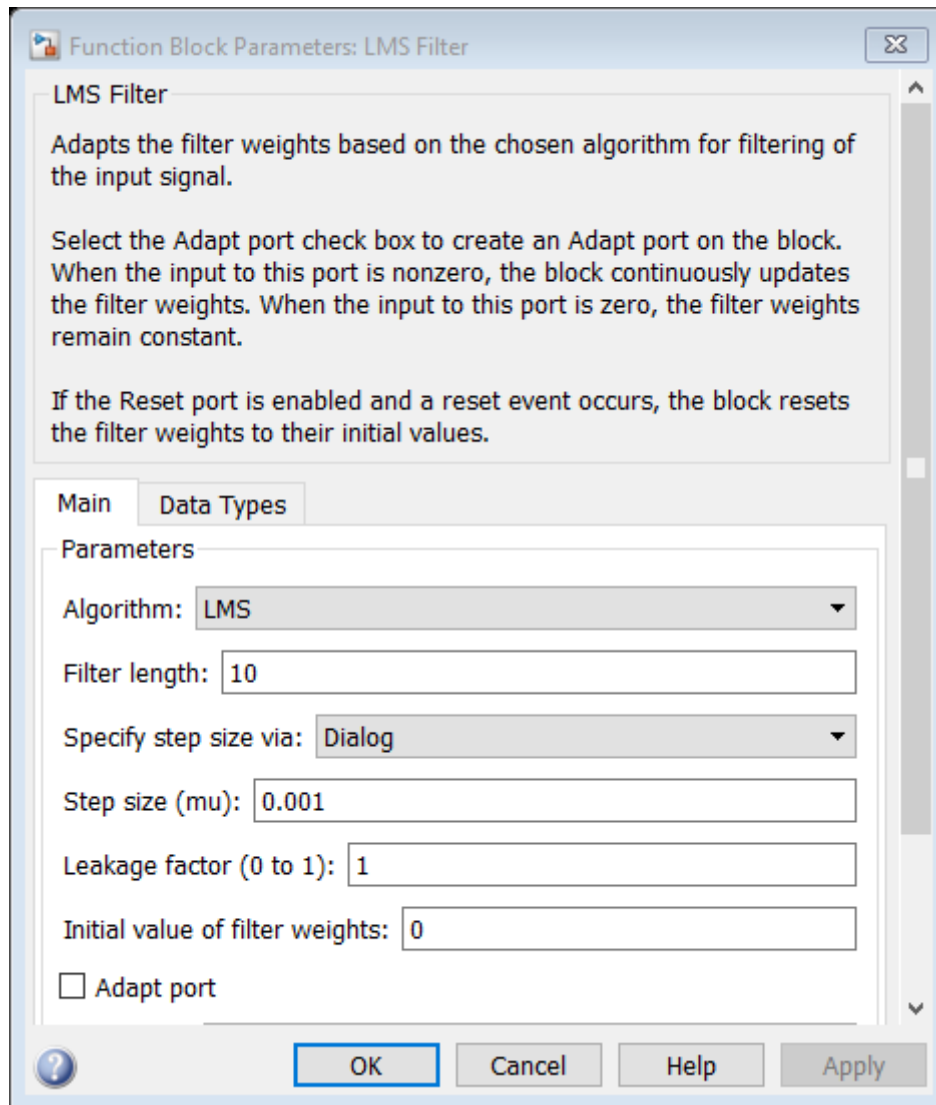


Figura 90 Configuración de los parámetros LMS para un factor de convergencia a 0.001 y número de coeficientes a 10

Fuente: Elaboración propia

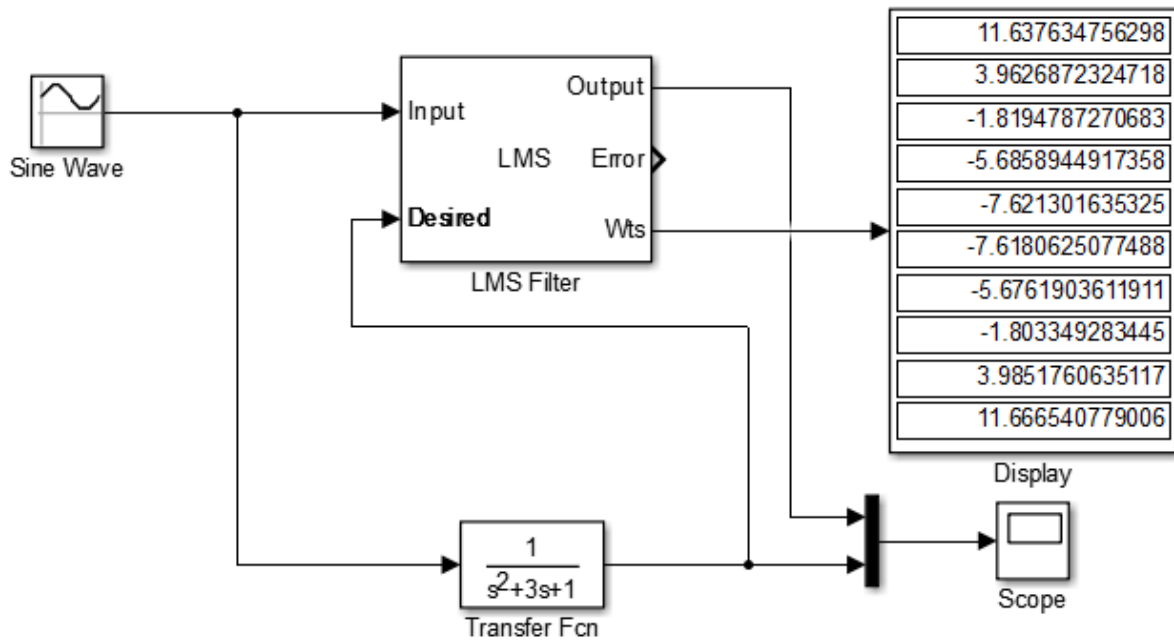


Figura 91 Configuración del bloque LMS en simulink para un factor de convergencia a 0.001 y número de coeficientes a 10

Fuente: Elaboración propia

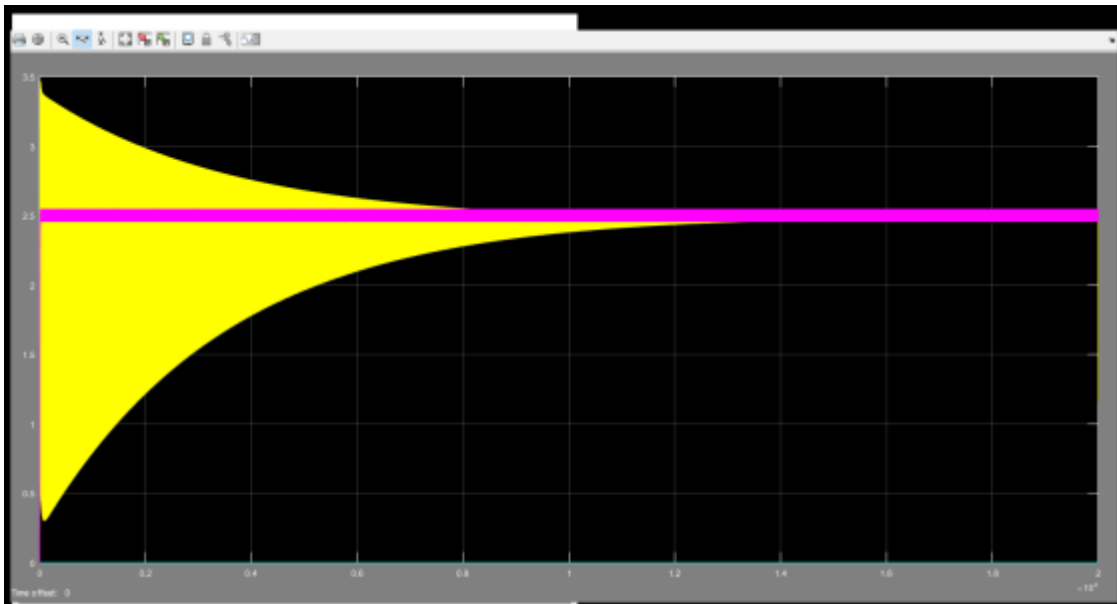


Figura 92 Respuesta en simulink para un factor de convergencia a 0.001 y número de coeficientes a 10

Fuente: Elaboración propia

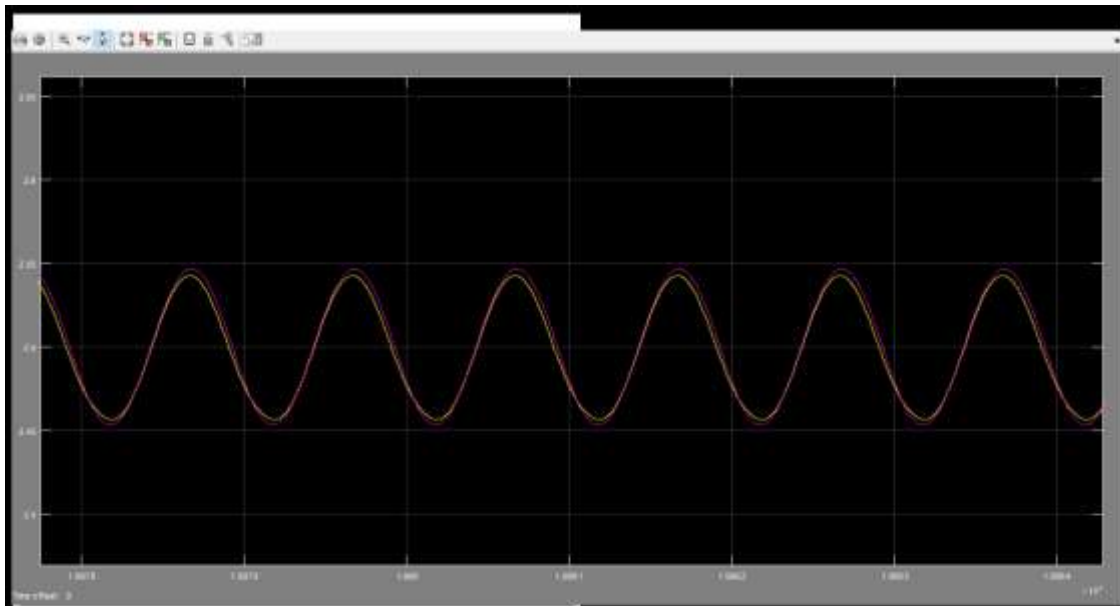


Figura 93 Tiempo de adaptación para un factor de convergencia a 0.001 y número de coeficientes a 10

Factor de convergencia 0.01 con 10 coeficientes

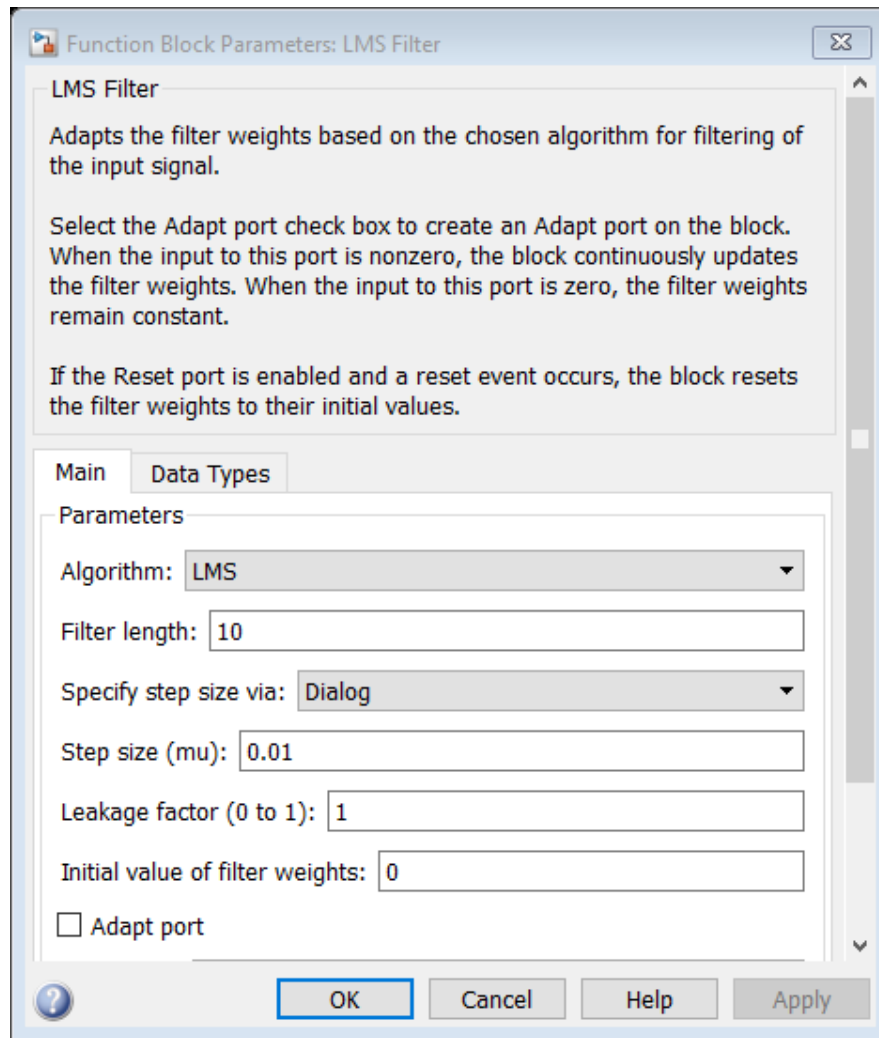


Figura 94 Configuración de los parámetros LMS para un factor de convergencia a 0.01 y número de coeficientes a 10

Fuente: Elaboración propia

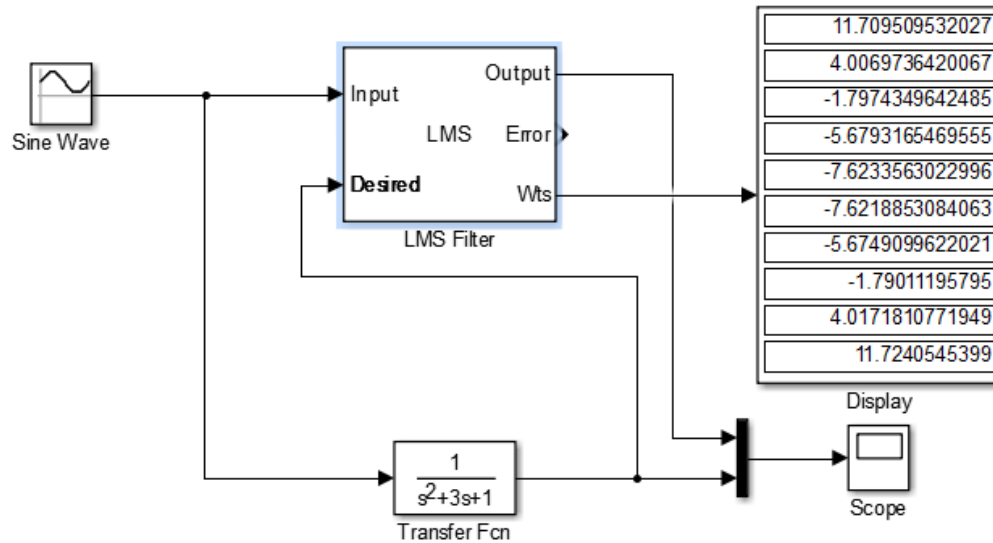


Figura 95 Configuración del bloque LMS en simulink para un factor de convergencia a 0.01 y número de coeficientes a 10

Fuente: Elaboración propia

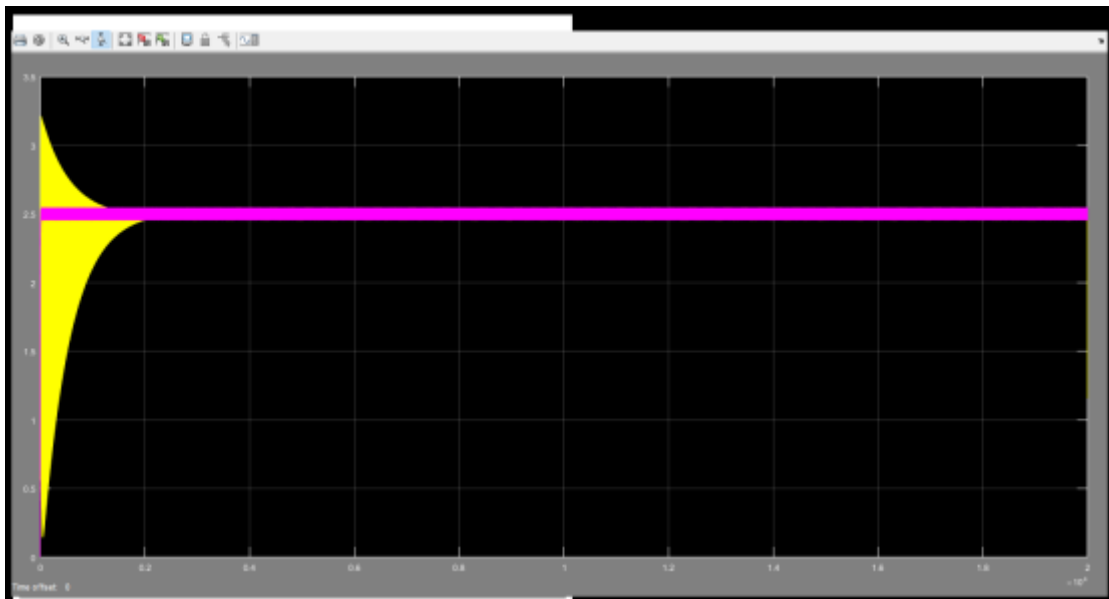


Figura 96 Respuesta en simulink para un factor de convergencia a 0.01 y número de coeficientes a 10

Fuente: Elaboración propia

Adaptación en 2000 segundos

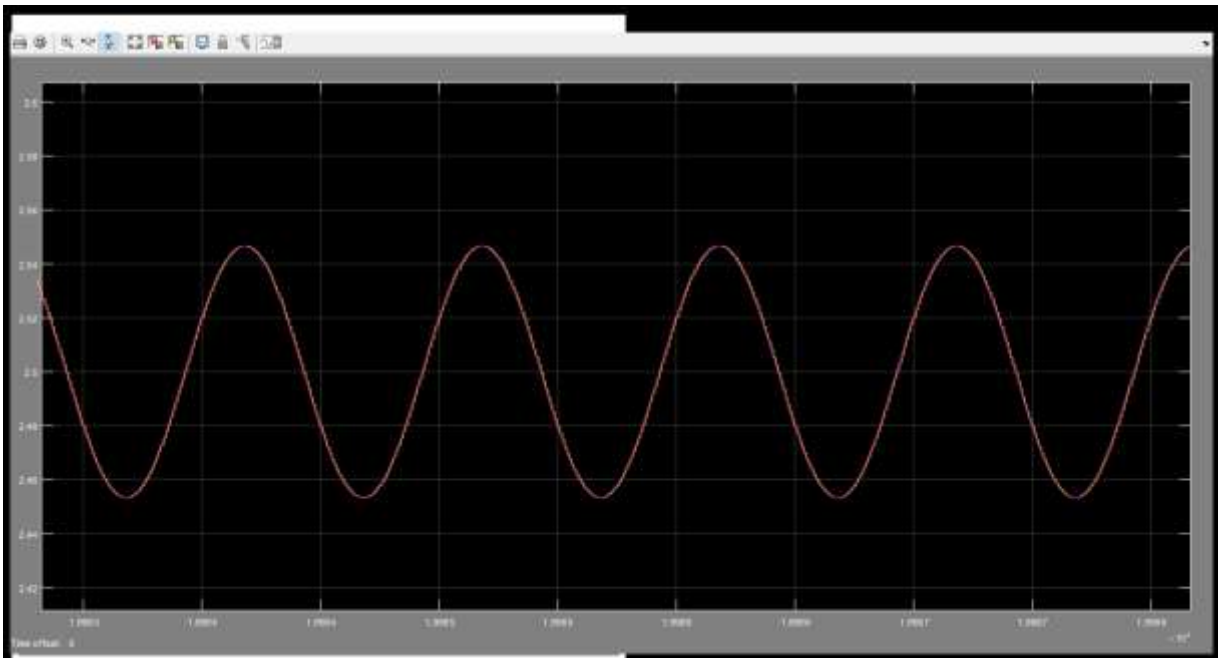


Figura 97 Tiempo de adaptación para un factor de convergencia a 0.01 y número de coeficientes a 10

Fuente: Elaboración propia

Respuesta Transitoria:

Factor de convergencia 0.001 con 10 coeficientes

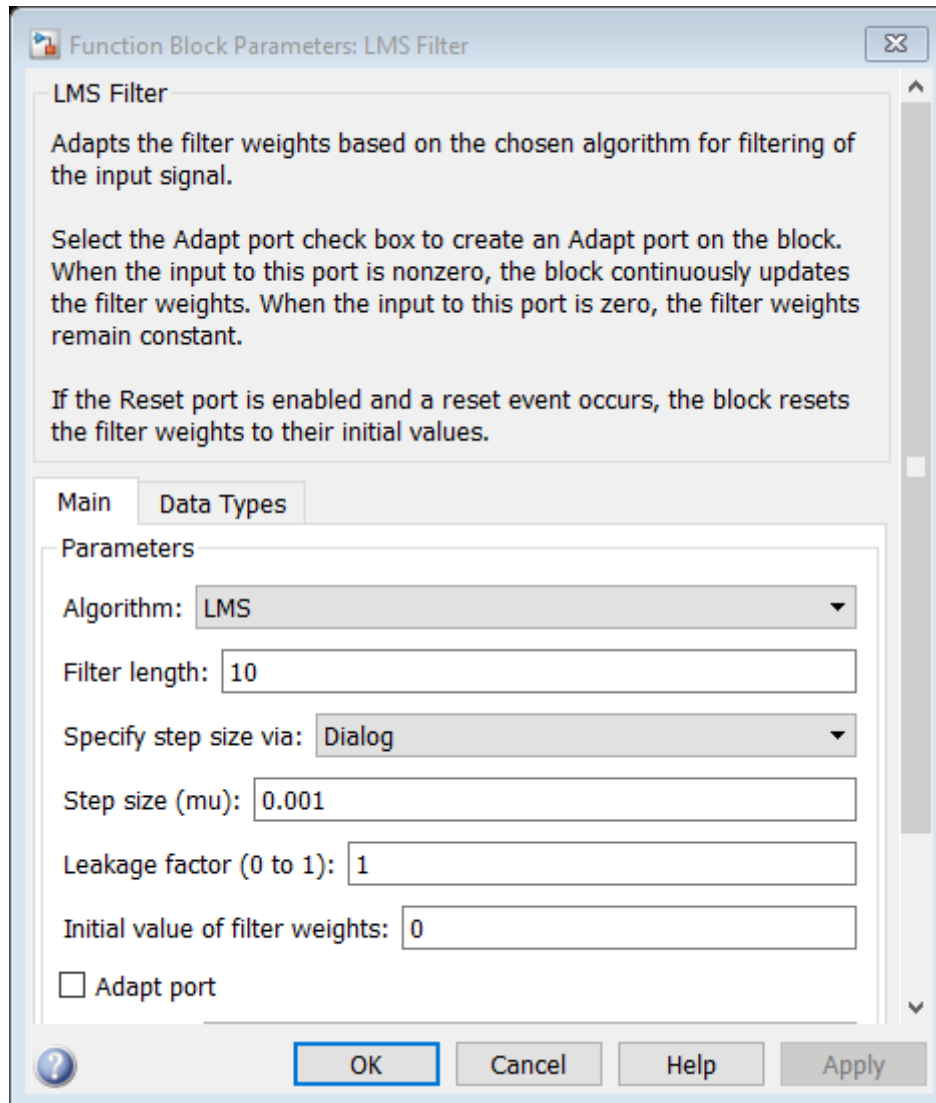


Figura 98 Configuración del parámetro LMS para un factor de convergencia a 0.001 y número de coeficientes a 10

Fuente: Elaboración propia

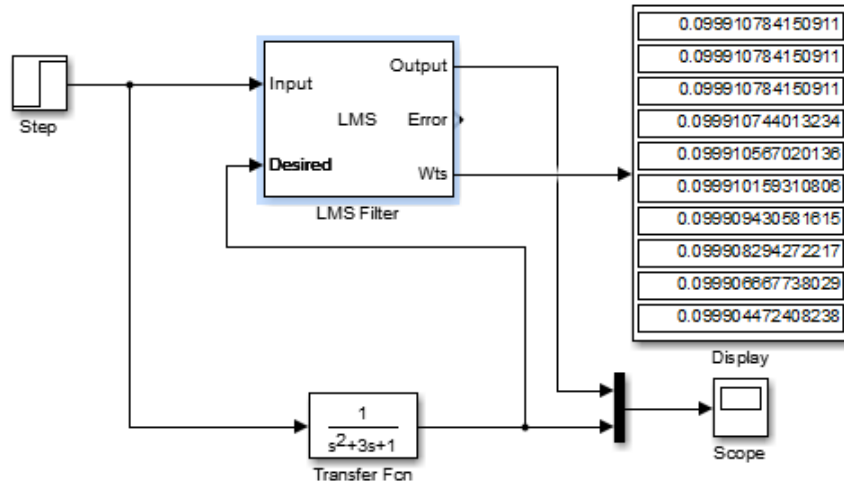


Figura 99 Configuración del bloque LMS en simulink para un factor de convergencia a 0.001 y número de coeficientes a 10

Fuente: Elaboración propia

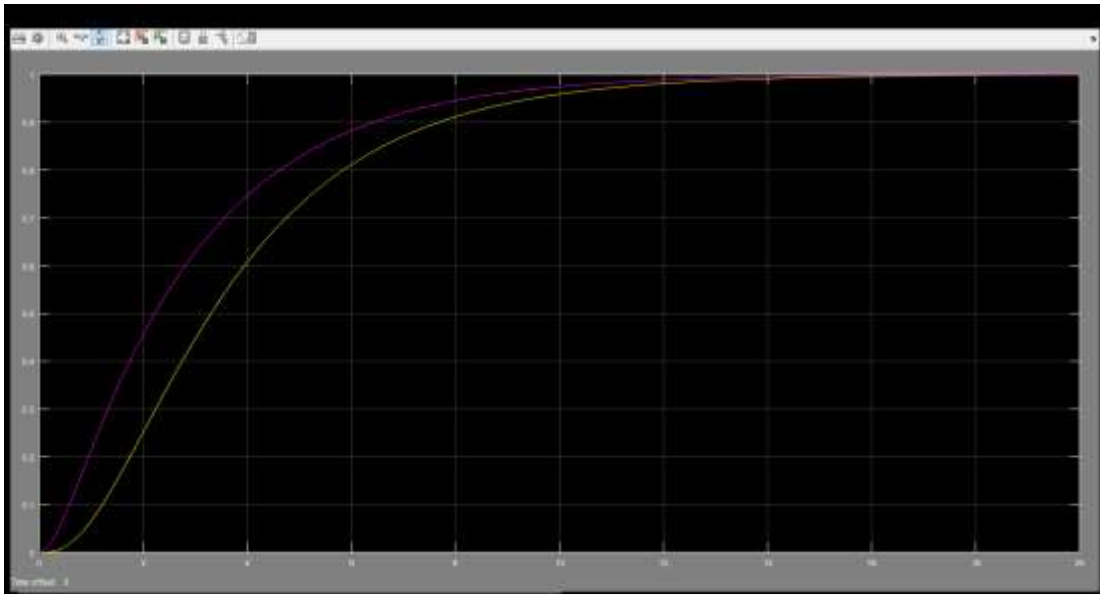


Figura 100 Respuesta transitoria para un factor de convergencia a 0.001 y número de coeficientes a 10

Fuente: Elaboración propia

Retardo de 0.9 segundos

Factor de convergencia 0.01 con 10 coeficientes

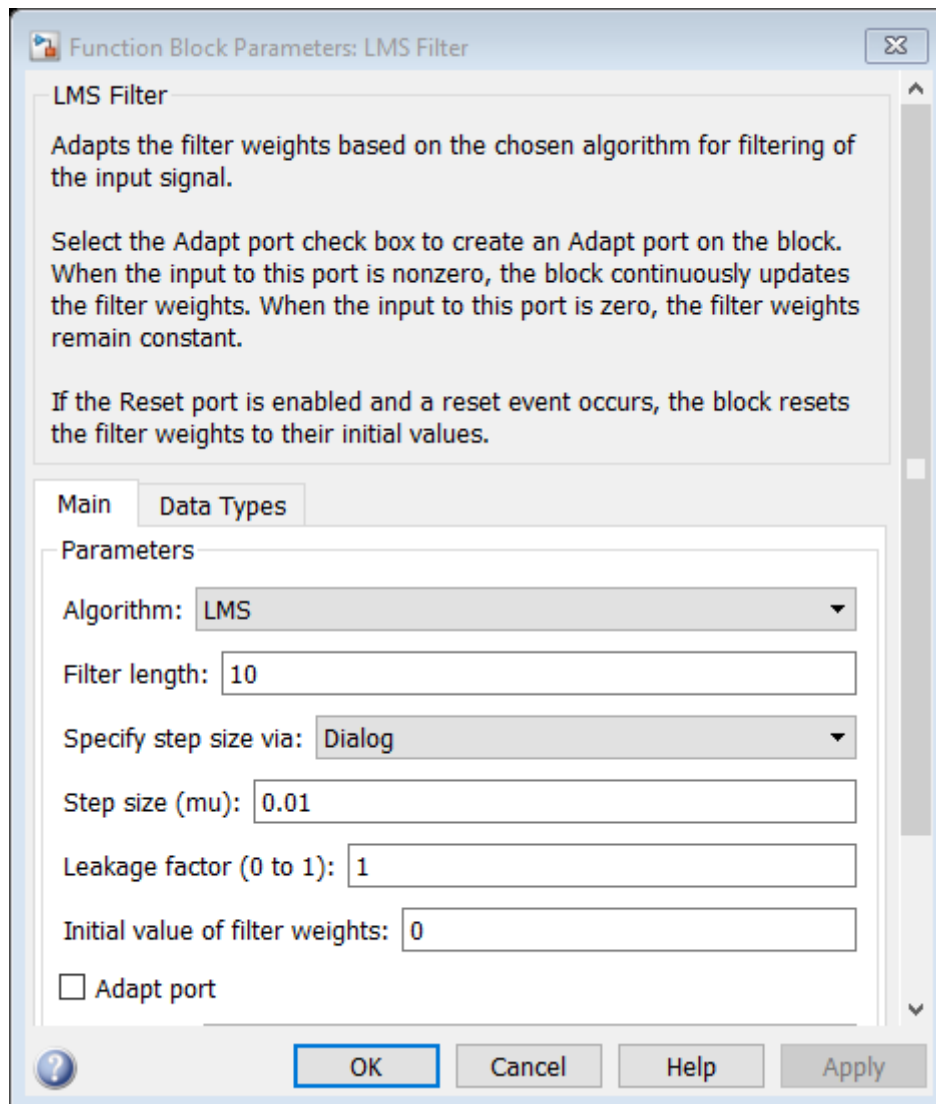


Figura 101 Configuración del parámetro LMS para un factor de convergencia a 0.01 y número de coeficientes a 10

Fuente: Elaboración propia

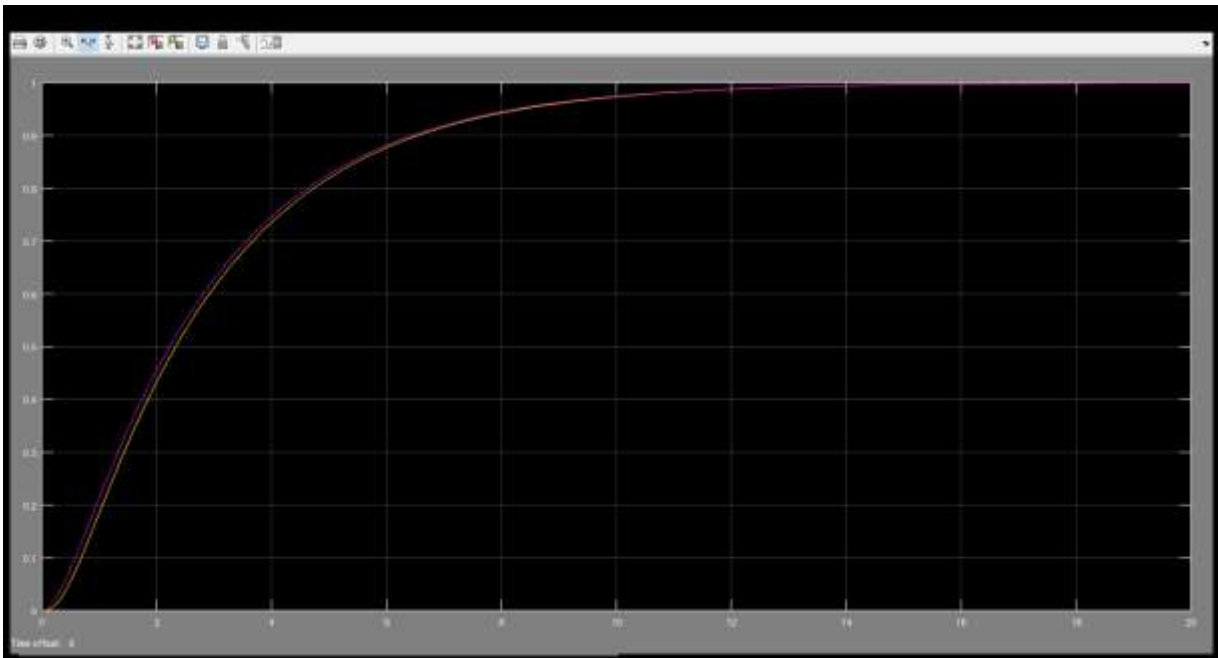


Figura 102 Respuesta transitoria para un factor de convergencia a 0.01 y número de coeficientes a 10

Fuente: Elaboración propia

Retardo de 80ms

Factor de convergencia 0.1 con 10 coeficientes

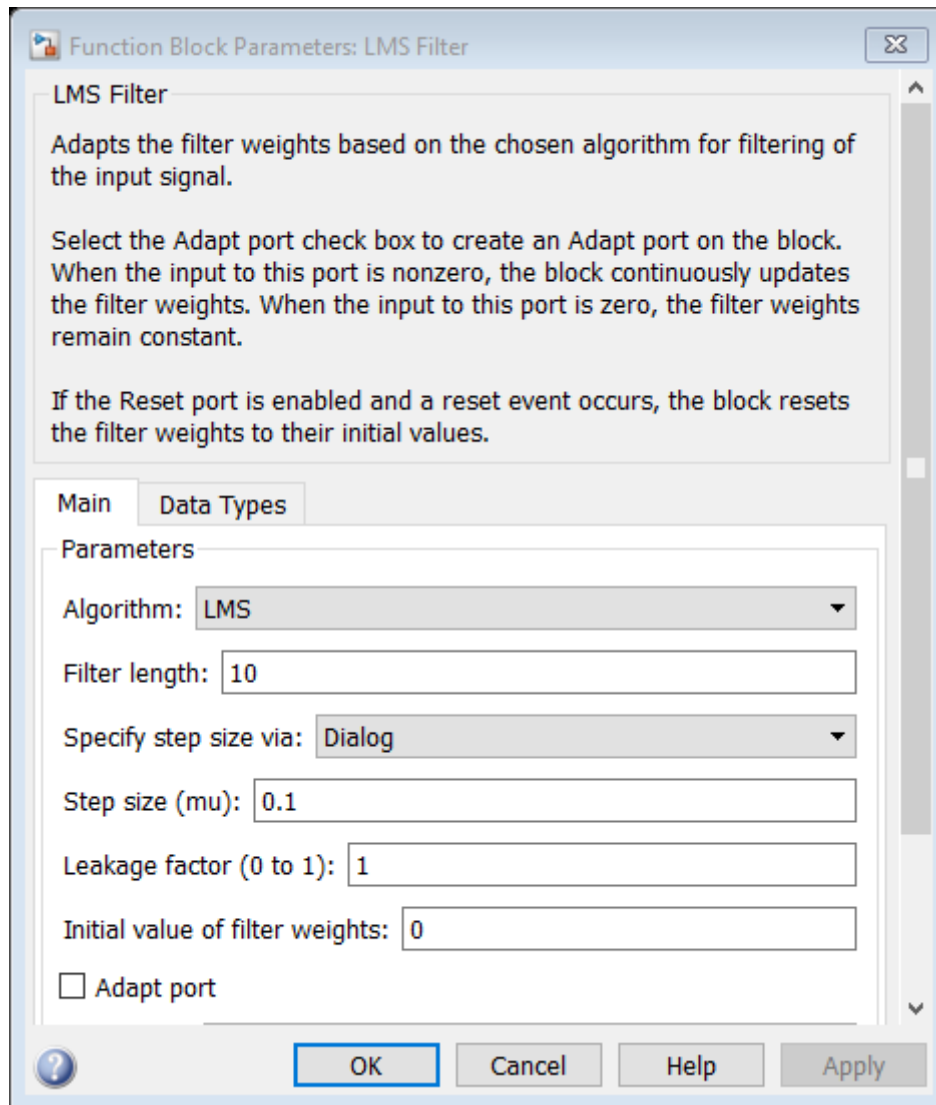


Figura 103 Configuración del parámetro LMS para un factor de convergencia a 0.1 y número de coeficientes a 10

Fuente: Elaboración propia

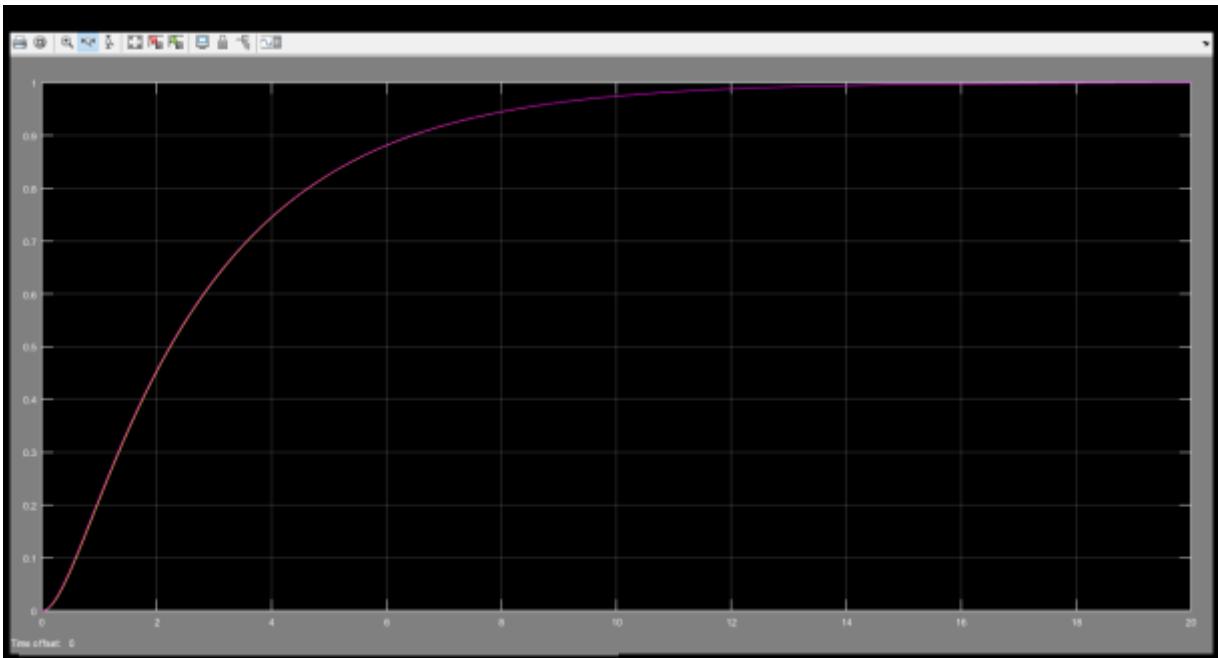


Figura 104 Respuesta transitoria para un factor de convergencia a 0.1 y número de coeficientes a 10

Fuente: Elaboración propia

Retardo de 10ms

Pruebas con Microcontrolador.

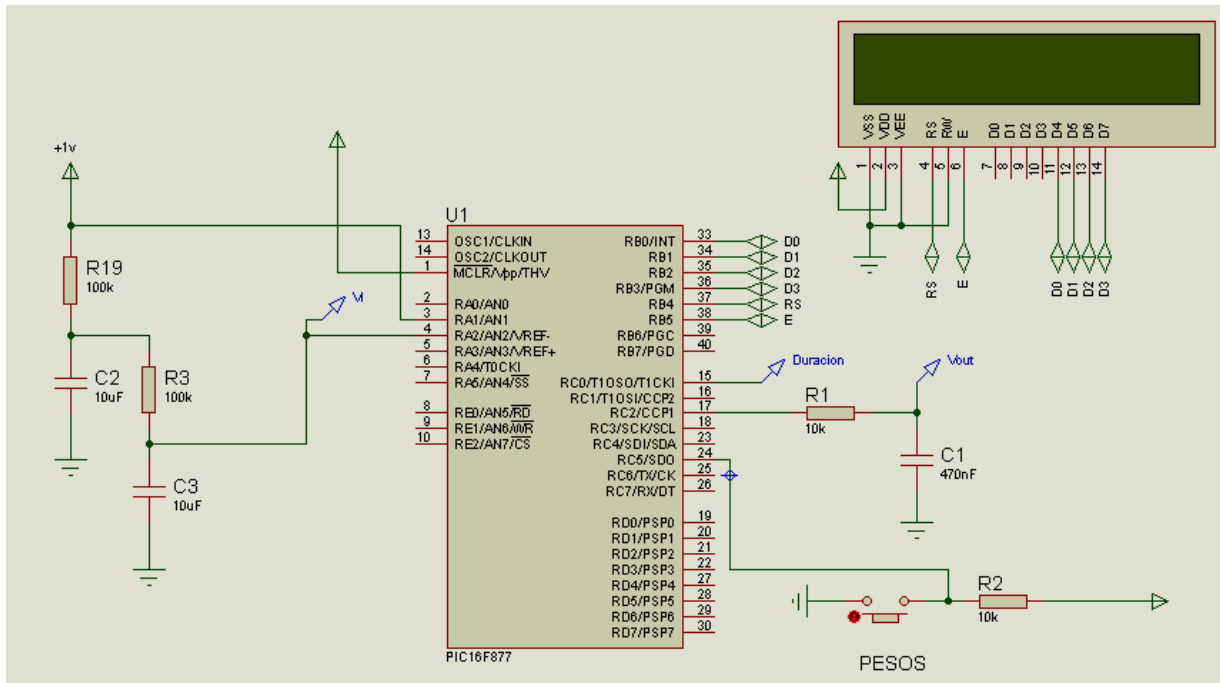


Figura 105 Circuito con el microcontrolador PIC 16F877

Fuente: Elaboración propia

Factor de convergencia 0.001 con 10 coeficientes



Figura 106 Respuesta en PROSPICE para un factor de convergencia a 0.001 y número de coeficientes a 10

Fuente: Elaboración propia

Retardo de 855ms

Factor de convergencia 0.01 con 10 coeficientes



Figura 107 Respuesta en PROSPICE para un factor de convergencia a 0.01 y número de coeficientes a 10

Fuente: Elaboración propia



Figura 108 Respuesta transitoria en PROSPICE para un factor de convergencia a 0.01 y número de coeficientes a 10

Fuente: Elaboración propia

Retardo de 20ms

Factor de convergencia 0.1 con 10 coeficientes



Figura 109 Respuesta en PROSPICE para un factor de convergencia a 0.1 y número de coeficientes a 10

Fuente: Elaboración propia

4.3. Procesamiento y análisis de datos

Tabla 3 *Respuesta estacionaria con 10 coeficientes para sistema de primer orden*

U	0.001	0.01	0.015	0.02
W0	10.55	10.62	10.56	10.63
W1	3.55	3.591	3.579	3.614
W2	-1.72	-1.7	-1.68	-1.67
W3	-5.236	-5.23	-5.188	-5.196
W4	-6.984	-6.986	-6.932	-6.951
W5	-6.956	-6.96	-6.905	-6.928
W6	-5.152	-5.152	-5.106	-5.121
W7	-1.581	-1.569	-1.543	-1.544
W8	3.745	3.774	3.772	3.791
W9	10.8	10.86	10.82	10.86

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4 *Respuesta estacionaria con 20 coeficientes para sistema de primer orden*

U	0.001	0.002	0.005	0.008	0.01
W0	1.413	1.413	1.414	1.415	1.416
W1	0.9849	0.9852	0.9863	0.9877	0.9887
W2	0.6003	0.6007	0.6022	0.6036	0.6045
W3	0.2607	0.2612	0.2628	0.264	0.2648
W4	-0.03251	-0.0319	-0.03049	-0.02949	-0.02893
W5	-0.2782	-0.2776	-0.2764	-0.2757	-0.2753
W6	-0.4753	-0.4747	-0.4738	-0.4734	-0.4731
W7	-0.6231	-0.6227	-0.622	-0.6217	-0.6214
W8	-0.721	-0.7207	-0.7203	-0.7199	-0.7195
W9	-0.7686	-0.7684	-0.7681	-0.7676	-0.7672
W10	-0.7658	-0.7657	-0.7654	-0.7647	-0.7642
W11	-0.7124	-0.7124	-0.712	-0.7112	-0.7106
W12	-0.6088	-0.6088	-0.6083	-0.6074	-0.6068
W13	-0.4552	-0.4553	-0.4546	-0.4537	-0.4532
W14	-0.2524	-0.2524	-0.2517	-0.2509	-0.2504
W15	-0.001103	-0.001069	-0.0003074	0.0004203	0.0008357
W16	0.2977	0.2978	0.2985	0.2991	0.2994
W17	0.6429	0.6431	0.6436	0.644	0.6442
W18	1.033	1.033	1.034	1.034	1.034
W19	1.467	1.467	1.467	1.467	1.467

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5 *Respuesta estacionaria Matlab*

Respuesta estacionaria Matlab		
Coeficientes	Factor de convergencia	Tiempo de Establecimiento
6	0.001	50000
	0.01	20000
	0.1	
10	0.001	14000
	0.01	2280
	0.015	1500
	0.02	
20	0.001	800
	0.002	400
	0.005	200
	0.008	125
	0.01	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6 *Respuesta transitoria Matlab*

Respuesta transitoria Matlab		
Coeficientes	Factor de convergencia	Tiempo de Desfasaje
6	0.001	1.7
	0.01	0.2
	0.1	0.04
10	0.001	1.2
	0.01	0.1
	0.1	0.01

Fuente: elaboración propia

Tabla 7 *Respuesta estacionaria Microcontrolador*

Respuesta estacionaria Microcontrolador		
Coeficientes	Factor de convergencia	Tiempo de Establecimiento
6		
10	0.001	14000

	0.01	2300
	0.015	
	0.02	
20	0.001	800
	0.002	400
	0.005	200
	0.008	
	0.01	

Fuente: elaboración propia

Tabla 8 *Respuesta transitoria microcontrolador*

Respuesta transitoria Microcontrolador		
Coeficientes	Factor de convergencia	Tiempo de Desfasaje
6	0.001	1.7
	0.01	0.2
	0.1	0.04
10	0.001	1.2
	0.01	0.1
	0.1	0.01

Fuente: elaboración propia

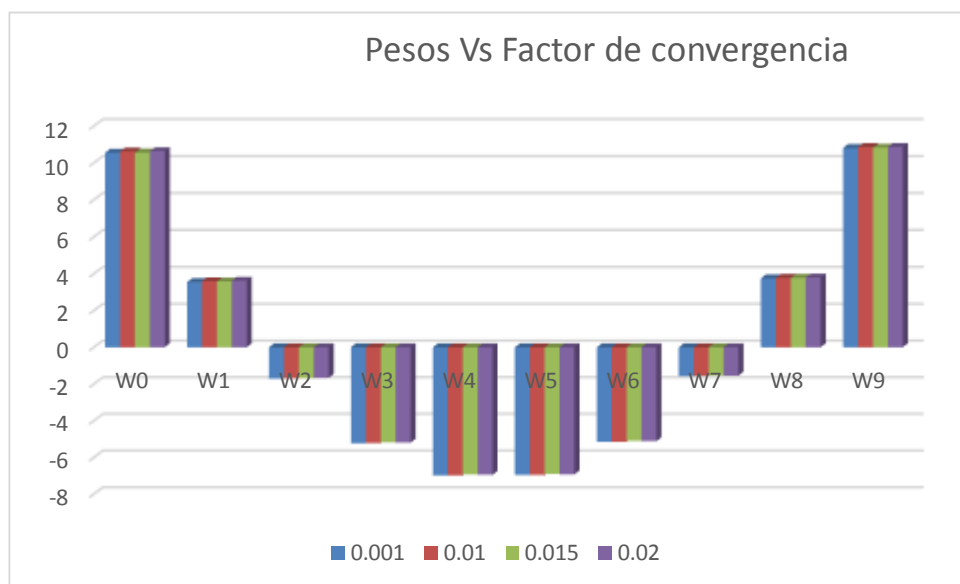


Gráfico 1 Evolución de los 10 coeficientes respuesta estacionaria

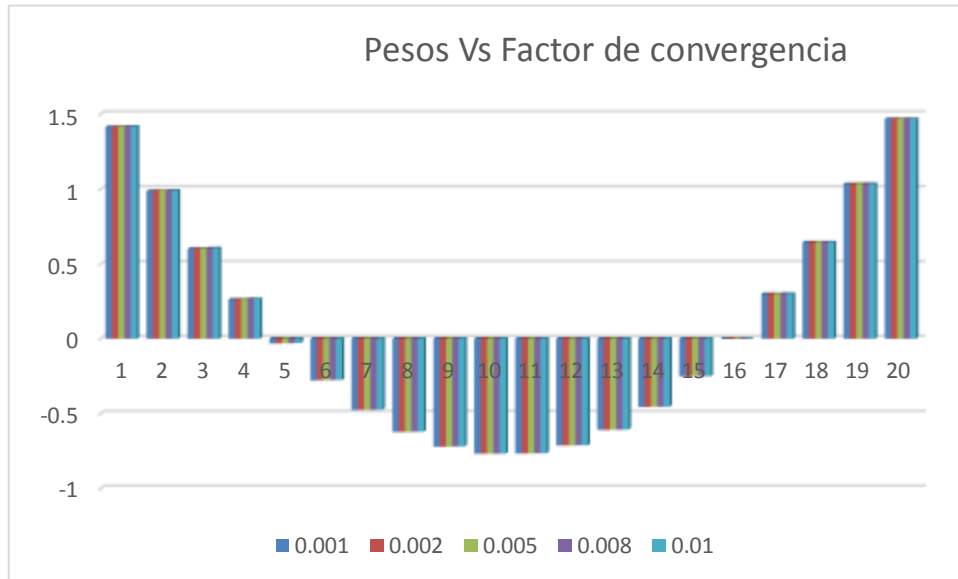


Gráfico 2 Evolución de los 20 coeficientes respuesta estacionaria

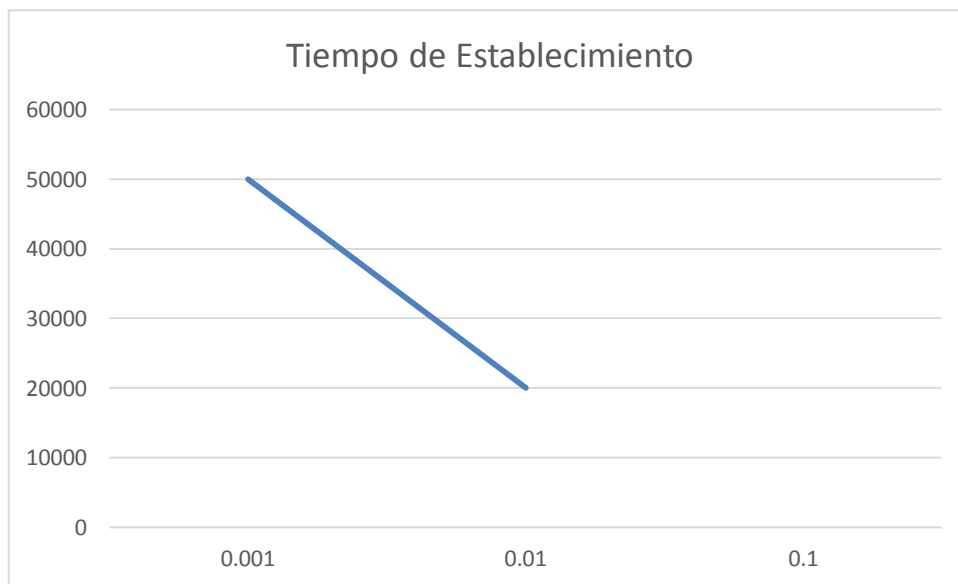


Gráfico 3 Tiempo de establecimiento para 6 Coeficientes

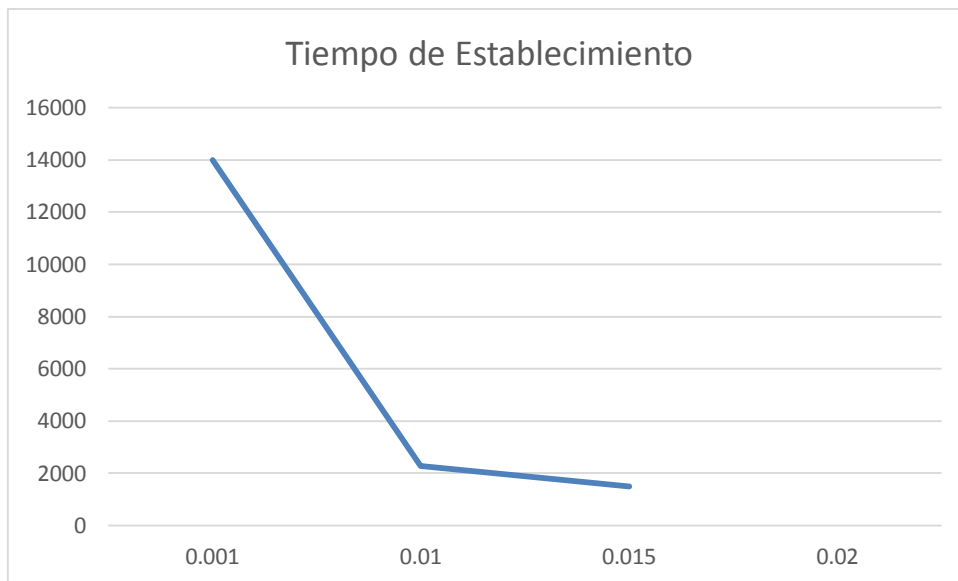


Gráfico 4 Tiempo de establecimiento para 10 Coeficientes

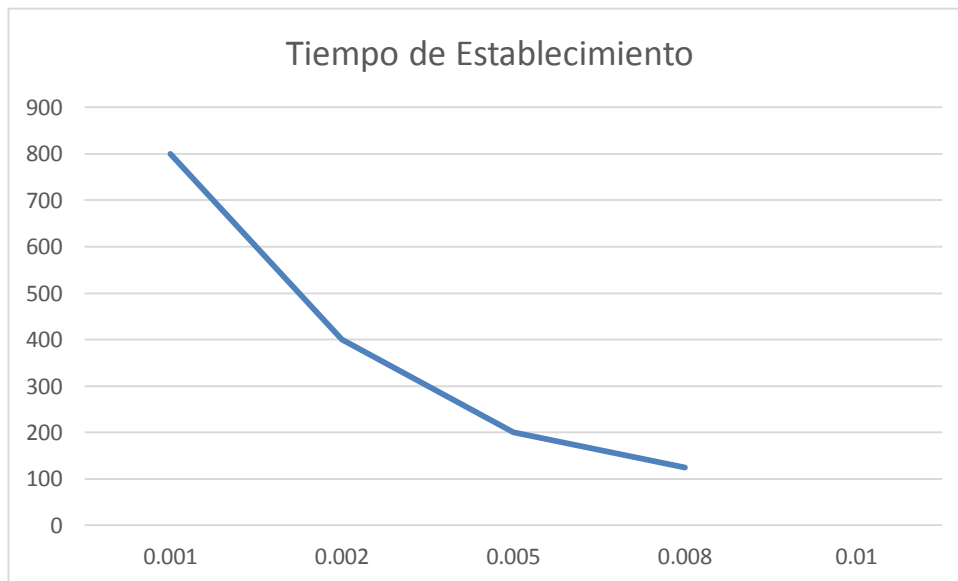


Gráfico 3 Tiempo de establecimiento para 20 Coeficientes

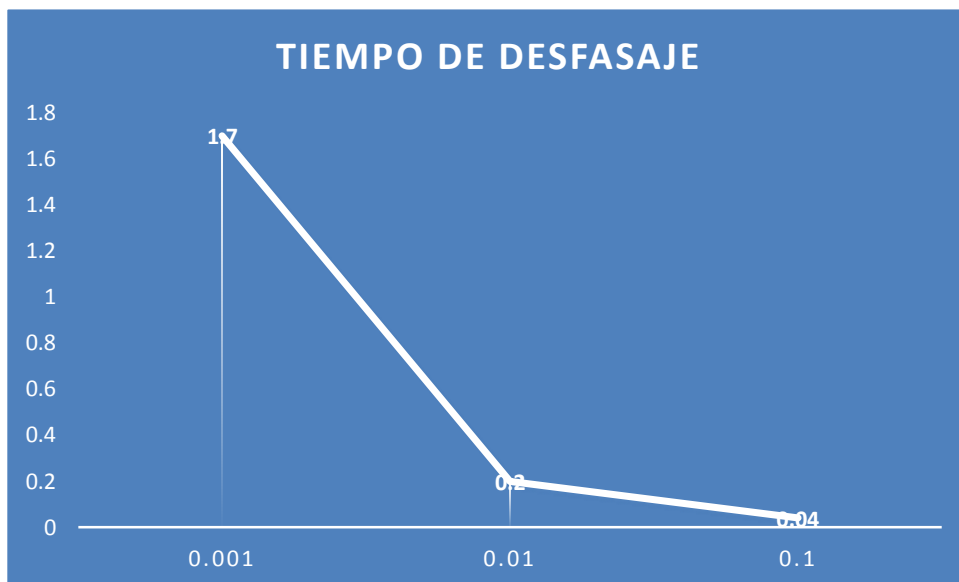


Gráfico 4 Tiempo de Desfasaje para 6 Coeficientes

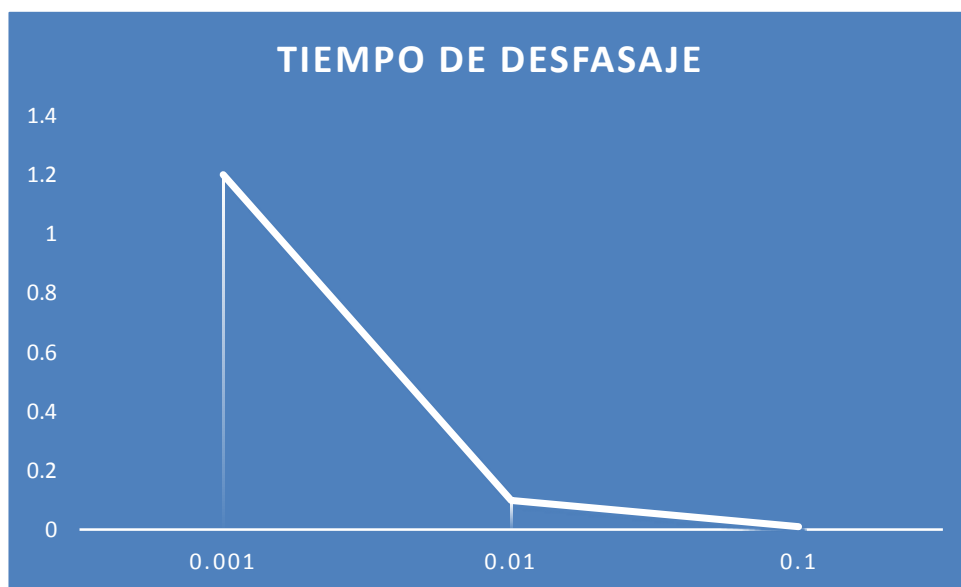


Gráfico 5 Tiempo de Desfasaje para 10 Coeficientes

V. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

5.1. Los pesos asignados al identificador de procesos se mantienen aun cuando cambia el factor de convergencia “*U*” esto se obtiene a procesar la tabla 3, obteniéndose un error porcentual máximo de 2.27%. en la tabla 9 se ilustra este comportamiento

Tabla 9 *Error porcentual para la respuesta estacionaria con 10 coeficientes*

Coeficiente	Valor promedio	Error
W0	10.59	0.66771179
W1	3.5835	1.28759838
W2	-1.6925	2.26917157
W3	-5.2125	0.79818299
W4	-6.96325	0.65414029
W5	-6.93725	0.64380877
W6	-5.13275	0.77802973
W7	-1.55925	2.09270529
W8	3.7705	0.87360664
W9	10.835	0.47957106

Fuente: Elaboración propia

En el caso de 20 coeficientes se observa el mismo efecto salvo para el coeficiente 15 y esto es debido a que su valor es tan pequeño y no afecta al modelamiento, si quitamos este error el máximo sería de 9.9%. en la tabla 10 se ilustra este comportamiento.

Tabla 10 *Error porcentual para la respuesta estacionaria con 20 coeficientes*

Coeficiente	Valor promedio	Error
W0	1.4142	0.18439266
W1	0.98656	0.32926373
W2	0.60226	0.60078486
W3	0.2627	1.3382867
W4	-0.030664	9.97226292
W5	-0.27664	0.89220565
W6	-0.47406	0.38735616
W7	-0.62218	0.22661682
W8	-0.72028	0.16706402
W9	-0.76798	0.15005454
W10	-0.76516	0.17976631
W11	-0.71172	0.22339804
W12	-0.60802	0.29273505
W13	-0.4544	0.40698156
W14	-0.25156	0.71243653
W15	-0.0002447	711.364211
W16	0.2985	0.50806536
W17	0.64356	0.17386538
W18	1.0336	0.10598347
W19	1.467	0

Fuente: Elaboración propia

- 5.2.** El tiempo de establecimiento del modelo para respuesta estacionaria está en función inversa al factor de convergencia “U” tanto para 6,10 y 20 coeficientes, obteniéndose el mejor resultado para 20 coeficientes. Esto se evidencia en la tabla 5. La respuesta estacionaria del microcontrolador no se ajusta a los cálculos hechos en Matlab para 6 coeficientes. Esto se aprecia en las gráficas 3, 4 y 5, y en las tablas 5 y 7.
- 5.3.** En la respuesta Transitoria el sistema tiene el mismo comportamiento en Matlab como con el microcontrolador obteniéndose el mejor resultado con 10 coeficientes. Esto se evidencia en las tablas 6 y 8, y en las gráficas 6 y 7. Obteniéndose un desfase de 10ms que es el tiempo de muestreo del sistema.

CONCLUSIONES

Se logró implementar el algoritmo de identificación de procesos mostrado en la página 17 en el microcontrolador de 8 bits 16f877, este se realizó en Proton Basic como se muestra en la página 80, Tanto para 6, 10 y 20 coeficientes obteniéndose un tiempo de proceso del algoritmo de 3.21ms, esto se evidencia en la figura 82.

Se verifico si el sistema de 8 bits identifica el proceso realizando la comparación de los datos obtenidos con el microcontrolador con los datos obtenidos en Matlab. Obteniéndose una diferencia en la respuesta estacionaria para 6 coeficientes.

REFERENCIAS

- Amstrom, K., & Hagglund, T. (2009). *Control PID Avanzado*. España: Prentice Hall.
- Aluisa, P. (2014). *Desarrollo de un sistema de identificación de procesos industriales en línea, usando la plataforma open-source Arduino y Matlab/Simulink* (Tesis para optar el título profesional de Ingeniero en Electrónica). Universidad de las Fuerzas Armadas, Ecuador.
- Kuo, B. (1996). *Sistemas de Control Automático* (7 ed.). México: Prentice Hall.
- Millán, D. (2012). *Estudio y comparativa de diferentes algoritmos adaptativos para la identificación de sistemas. Simulink* (Tesis para optar el grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática). Universidad Politécnica de Cataluña, España.
- Ogata, K. (1996). *Sistemas de control en tiempo discreto* (2 ed.). México: Prentice Hall.
- Ogata, K. (2010). *Ingeniería de control moderna*. (5 ed.). España: Pearson Educación S.A.
- Palacios E. (2004). *Microcontrolador PIC16784*. México: Alfaomega.
- Perez, H. (2004). *Algoritmos LMS con factores de convergencia variables en el tiempo*. Revista científica, pp. 139-150.
- Valdivia, C. (2012). *Sistemas de Control continuo y discreto*. España: Prentice Hall.
- Vivanco, C. (2013). *Análisis de sistemas de control de primer y segundo orden usando lenguajes de programación Matlab-Simulink* (Tesis para optar el título profesional de Ingeniero en Electrónica). Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, Guayaquil.

ANEXOS



PIC16F87X

28/40-Pin 8-Bit CMOS FLASH Microcontrollers

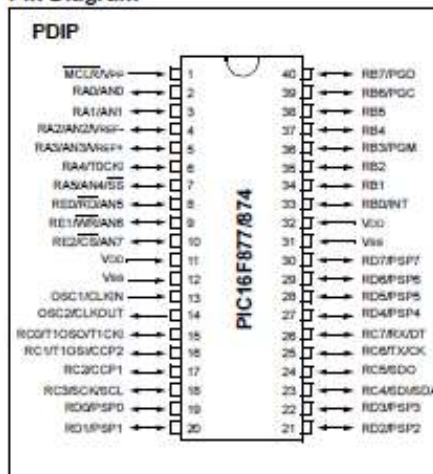
Devices Included in this Data Sheet:

- PIC16F873
- PIC16F876
- PIC16F874
- PIC16F877

Microcontroller Core Features:

- High performance RISC CPU
- Only 35 single word instructions to learn
- All single cycle instructions except for program branches which are two cycle
- Operating speed: DC - 20 MHz clock input
DC - 200 ns instruction cycle
- Up to 8K x 14 words of FLASH Program Memory,
Up to 368 x 8 bytes of Data Memory (RAM)
Up to 256 x 8 bytes of EEPROM Data Memory
- Pinout compatible to the PIC16C73B/74B/76/77
- Interrupt capability (up to 14 sources)
- Eight level deep hardware stack
- Direct, indirect and relative addressing modes
- Power-on Reset (POR)
- Power-up Timer (PWRT) and
Oscillator Start-up Timer (OST)
- Watchdog Timer (WDT) with its own on-chip RC
oscillator for reliable operation
- Programmable code protection
- Power saving SLEEP mode
- Selectable oscillator options
- Low power, high speed CMOS FLASH/EEPROM
technology
- Fully static design
- In-Circuit Serial Programming™ (ICSP) via two
pins
- Single 5V In-Circuit Serial Programming capability
- In-Circuit Debugging via two pins
- Processor read/write access to program memory
- Wide operating voltage range: 2.0V to 5.5V
- High Sink/Source Current: 25 mA
- Commercial, Industrial and Extended temperature
ranges
- Low-power consumption:
 - < 0.6 mA typical @ 3V, 4 MHz
 - 20 µA typical @ 3V, 32 kHz
 - < 1 µA typical standby current

Pin Diagram



Peripheral Features:

- Timer0: 8-bit timer/counter with 8-bit prescaler
- Timer1: 16-bit timer/counter with prescaler,
can be incremented during SLEEP via external
crystal/clock
- Timer2: 8-bit timer/counter with 8-bit period
register, prescaler and postscaler
- Two Capture, Compare, PWM modules
 - Capture is 16-bit, max. resolution is 12.5 ns
 - Compare is 16-bit, max. resolution is 200 ns
 - PWM max. resolution is 10-bit
- 10-bit multi-channel Analog-to-Digital converter
- Synchronous Serial Port (SSP) with SPI (Master
mode) and I²C™ (Master/Slave)
- Universal Synchronous Asynchronous Receiver
Transmitter (USART/SCI) with 9-bit address
detection
- Parallel Slave Port (PSP) 8-bits wide, with
external RD, WR and CS controls (40/44-pin only)
- Brown-out detection circuitry for
Brown-out Reset (BOR)

PIC16F87X

Key Features PIC [®] MCU Mid-Range Reference Manual (DS33023)	PIC16F873	PIC16F874	PIC16F876	PIC16F877
Operating Frequency	DC - 20 MHz	DC - 20 MHz	DC - 20 MHz	DC - 20 MHz
RESETS (and Delays)	POR, BOR (PWRT, OST)	POR, BOR (PWRT, OST)	POR, BOR (PWRT, OST)	POR, BOR (PWRT, OST)
FLASH Program Memory (14-bit words)	4K	4K	8K	8K
Data Memory (bytes)	192	192	368	368
EEPROM Data Memory	128	128	256	256
Interrupts	13	14	13	14
I/O Ports	Ports A,B,C	Ports A,B,C,D,E	Ports A,B,C	Ports A,B,C,D,E
Timers	3	3	3	3
Capture/Compare/PWM Modules	2	2	2	2
Serial Communications	MSSP, USART	MSSP, USART	MSSP, USART	MSSP, USART
Parallel Communications	—	PSP	—	PSP
10-bit Analog-to-Digital Module	5 input channels	8 input channels	5 input channels	8 input channels
Instruction Set	35 instructions	35 instructions	35 instructions	35 instructions