

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



Profesor Patrocinante:

Dr. Alejandro J. Rojas N.

Informe de Memoria de Título
para optar al título de:

Ingeniero Civil Electrónico

Efectos de canales de comunicación en sistemas controlados de canales de regadío

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Eléctrica

Profesor Patrocinante:
Dr. Alejandro J. Rojas N.

Efectos de canales de comunicación en sistemas controlados de canales de regadío

Jaime Alfonso Parada Garcés

Informe de Memoria de Título
para optar al Título de

Ingeniero Civil Electrónico

Marzo 2012

Resumen

El presente trabajo tiene como propósito realizar un estudio acerca de los efectos de canales de comunicación en el control sobre canales de regadío. Para llevar a cabo dicho estudio, se considerarán modelos aproximados de los canales de comunicación más recurrentes en sistemas de control, en los cuales la información debe ser transmitida en forma inalámbrica producto de las grandes distancias (del orden de kilómetros) que debe viajar la información entre dos componentes de dichos sistemas de control. Los modelos aproximados de canales de comunicación considerados en el presente trabajo son: a) Canal de comunicación AWGN, b) Canal de comunicación con retardo de transmisión, c) Canal de comunicación con pérdida de paquetes y d) Canal de comunicación de ganancia variable.

En una primera etapa, se explicarán cada una de las partes correspondientes a los sistemas de control empleados en este trabajo, las cuales son: Planta (modelada por tramos como un estanque con retardo de transporte en el flujo de entrada), controlador, actuador (compuertas) y sensor de nivel. En estas explicaciones se incluyen también los respectivos argumentos matemáticos que permiten obtener la representación fenomenológica de las componentes antes mencionadas.

Posteriormente, serán presentados y fundamentados los modelos aproximados de los canales de comunicación mencionados, es decir, canales de comunicación AWGN, con retardo de transmisión, con pérdida de paquetes y de ganancia variable. Después se realiza un análisis de los sistemas de control para los canales de regadío en una situación f, no considerando la presencia de canales de comunicación.

En una última etapa, se analizan estos sistemas sujetos a los efectos producidos por la presencia de canales de comunicación aplicando el Método de Montecarlo mediante iteraciones sucesivas. Estas múltiples iteraciones tienen como objetivo generar distintas realizaciones del ruido en el canal de comunicación, además de evaluar el desempeño del sistema de regadío en su conjunto al hacer variar iteradamente ciertos parámetros gravitantes en el desempeño del sistema en cuestión dentro de una misma realización del ruido en el canal de comunicación.



A mi familia.
Que Dios los bendiga y cuide siempre.

Agradecimientos

A mis padres Jaime y María Angélica, por la educación que me han entregado a lo largo de mi vida, por la oportunidad que me han dado de estudiar y crecer como persona, estando siempre a mi lado para guiarme y ayudarme con su sabiduría, por su infinito cariño y disposición incondicional hacia mi persona. Por estar siempre firmes a mi lado, por su fortaleza y persistencia. Todo lo que soy hoy en día es gracias a ustedes.

A mi hermana María Angélica, porque sin su apoyo, comprensión y cariño en mis primeros años de universidad, me hubiese costado más adaptarme a todo lo que implica la dinámica universitaria, en especial si uno viene de otra ciudad.

A mi abuela Lorenza, por su constante preocupación por mi rendimiento en la universidad y por su oración en pos de la realización de mi proyecto de vida.

De este mismo modo, agradezco el apoyo de mis tíos y primos, con quienes he pasado muy gratos momentos en instancias de convivencia familiar.

En especial, a la familia Arce-Garcés, por hospedarme en su hogar durante parte del desarrollo de mi carrera.

Al Moty, que con sus tiernas travesuras, logró alegrar cada instante de mi estadía en Concepción.

Quiero agradecer también a mi grupo de amigos y compañeros que tuve a lo largo de la carrera (incluyendo las amistades del plan común), quienes hicieron que mi paso por la Universidad haya sido muy grato y más llevadero de lo que hubiese sido sin ellos.

Finalmente, agradezco a mi profesor patrocinante, Alejandro J. Rojas N., por su temple y sapiencia a la hora de dar respuestas a mis innumerables preguntas, a pesar de que algunas de éstas puedan parecer muy obvias desde su punto de vista. Además, agradezco sus muy sabios consejos, que han servido para confeccionar un informe de memoria de título, acorde al nivel esperado para la carrera de Ingeniería Civil Electrónica de la Universidad de Concepción.

A todos, muchas gracias.

Tabla de Contenidos

LISTA DE TABLAS	VIII
LISTA DE FIGURAS	IX
NOMENCLATURA.....	XII
ABREVIACIONES.....	XIII
GLOSARIO.....	XIV
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
1.2. TRABAJOS PREVIOS	1
1.2.1 De los Canales de Regadío.....	2
1.2.2 De los Canales de Comunicación.....	2
1.2.3 De los Sistemas de Control.....	3
1.2.4 Discusión	3
1.3. HIPÓTESIS DE TRABAJO	3
1.4. OBJETIVOS	4
1.4.1 Objetivo General	4
1.4.2 Objetivos Específicos.....	4
1.5. ALCANCES Y LIMITACIONES	4
1.6. TEMARIO Y METODOLOGÍA	5
CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES GENERALES	7
2.1. INTRODUCCIÓN	7
2.2. PRINCIPIOS DE LOS CANALES DE REGADÍO	7
2.3. CONTROL DE LOS CANALES DE REGADÍO.....	17
2.4. PRINCIPIOS DE LOS CANALES DE COMUNICACIÓN.....	27
2.4.1 Canal de comunicación AWGN.....	28
2.4.2 Canal de comunicación con retardo de transmisión.....	30
2.4.3 Canal de comunicación con pérdida de paquetes	31
2.4.4 Canal de comunicación de ganancia variable.....	33
2.4.5 SNR de un canal de comunicación.....	35
CAPÍTULO 3. LAZOS CERRADOS DE CONTROL EN TIEMPO CONTINUO Y DISCRETO	38
3.1. INTRODUCCIÓN	38
3.2. SIMULACIONES Y ANÁLISIS DE LOS LAZOS CERRADOS DE CONTROL EN TIEMPO CONTINUO.....	38
3.3. INESTABILIDAD DE CUERDA EN TIEMPO CONTINUO	39
3.4. SIMULACIONES Y ANÁLISIS DE LOS LAZOS CERRADOS DE CONTROL EN TIEMPO DISCRETO.....	40
3.5. INESTABILIDAD DE CUERDA EN TIEMPO DISCRETO	47
CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE LOS EFECTOS DE COMUNICACIÓN PARA TIEMPO CONTINUO	54
4.1. INTRODUCCIÓN	54
4.2. LAZOS CERRADOS DE CONTROL PARA CANALES DE REGADÍO	55
4.3. ANÁLISIS DE LOS EFECTOS DE COMUNICACIÓN	56
4.4. ESCENARIOS DE CANALES DE COMUNICACIÓN AWGN.....	57
4.4.1 Escenario con canal de comunicación Controlador – Planta (tipo CG).....	57
4.4.2 Escenario con canal de comunicación Planta – Controlador (tipo GC).....	60
4.5. ESCENARIOS DE CANALES DE COMUNICACIÓN CON RETARDO.....	62
4.5.1 Escenario con canal de comunicación Controlador – Planta (tipo CG).....	62
4.5.2 Escenario con canal de comunicación Planta – Controlador (tipo GC).....	65
4.5.3 Comparación de escenarios con canal de comunicación Controlador – Planta y Planta – Controlador (tipos CG y GC).....	67
CAPÍTULO 5. ANÁLISIS DE LOS EFECTOS DE COMUNICACIÓN PARA TIEMPO DISCRETO	70

5.1.	INTRODUCCIÓN	70
5.2.	LAZOS CERRADOS DE CONTROL PARA CANALES DE REGADÍO	70
5.3.	ANÁLISIS DE LOS EFECTOS DE COMUNICACIÓN	72
5.4.	ESCENARIOS DE CANALES DE COMUNICACIÓN AWGN	73
5.4.1	<i>Escenario con canal de comunicación Controlador – Planta (tipo CG)</i>	73
5.4.2	<i>Escenario con canal de comunicación Planta – Controlador (tipo GC)</i>	76
5.5.	ESCENARIOS DE CANALES DE COMUNICACIÓN CON RETARDO.....	79
5.5.1	<i>Escenario con canal de comunicación Controlador – Planta (tipo CG)</i>	79
5.5.2	<i>Escenario con canal de comunicación Planta – Controlador (tipo GC)</i>	82
5.5.3	<i>Comparación de escenarios con canal de comunicación Controlador – Planta y Planta – Controlador (tipos CG y GC)</i>	84
5.6.	ESCENARIOS DE CANALES DE COMUNICACIÓN CON PÉRDIDA DE PAQUETES	87
5.6.1	<i>Escenario con canal de comunicación Controlador – Planta (tipo CG)</i>	87
5.6.2	<i>Escenario con canal de comunicación Planta – Controlador (tipo GC)</i>	90
5.6.3	<i>Comparación de escenarios con canal de comunicación Controlador – Planta y Planta – Controlador (tipos CG y GC)</i>	92
5.7.	ESCENARIOS DE CANALES DE COMUNICACIÓN DE GANANCIA VARIABLE	95
5.7.1	<i>Escenario con canal de comunicación Controlador – Planta (tipo CG)</i>	95
5.7.2	<i>Escenario con canal de comunicación Planta – Controlador (tipo GC)</i>	98
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES		101
6.1.	RESUMEN.....	101
6.2.	CONCLUSIONES.....	101
6.3.	TRABAJO FUTURO.....	102
ANEXO A. CÓDIGOS FUENTE		106
A.1.	SCRIPT DISCRETO_CORRECTO_D2D.M.....	106
A.2.	SCRIPT CONTINUO_AWGN_CG_SNR.M.....	108
A.3.	SCRIPT CONTINUO_AWGN_GC_SNR.M.....	110
A.4.	SCRIPT CONTINUO_RET_COM_CG_SNR.M.....	112
A.5.	SCRIPT CONTINUO_RET_COM_GC_SNR.M.....	114
A.6.	SCRIPT CONTINUO_RET_COM_CG_Y_GC_SNR.M.....	116
A.7.	SCRIPT DISCRETO_EQUIV_AWGN_CG_1MIN_SNR.M.....	119
A.8.	SCRIPT DISCRETO_EQUIV_AWGN_GC_1MIN_SNR.M.....	121
A.9.	SCRIPT DISCRETO_EQUIV_RET_COM_CG_1MIN_SNR.M.....	123
A.10.	SCRIPT DISCRETO_EQUIV_RET_COM_GC_1MIN_SNR.M.....	125
A.11.	SCRIPT DISCRETO_EQUIV_RET_COM_CG_Y_GC_1MIN_SNR.M.....	127
A.12.	SCRIPT DISCRETO_EQUIV_PERD_PAQ_CG_Y_AWGN_1MIN_SNR.M.....	130
A.13.	SCRIPT DISCRETO_EQUIV_PERD_PAQ_GC_Y_AWGN_1MIN_SNR.M.....	132
A.14.	SCRIPT DISCRETO_EQUIV_PERD_PAQ_CG_GC_AWGN_1MIN_SNR.M.....	134
A.15.	SCRIPT DISCRETO_EQUIV_KVAR_AWGN_CG_1MIN_SNR.M.....	138
A.16.	SCRIPT DISCRETO_EQUIV_KVAR_AWGN_GC_1MIN_SNR.M.....	141

Lista de Tablas

TABLA 2.1 Tiempos de retardo y Área de superficies para las 5 piscinas, [1] 11



Lista de Figuras

Fig. 2.1 Tramo de canal en aguas abiertas con compuertas, [1]	7
Fig. 2.2 Compuertas automatizadas, [1].....	8
Fig. 2.3 Modelo de canal de regadío como “N” piscinas conectadas en serie cuya dinámica está descrita por la ecuación (2.1), [1].....	8
Fig. 2.4 Estanque de ejemplo para abordar la similitud del mismo con una piscina de regadío, [3].	11
Fig. 2.5 Respuesta ante entrada escalón en L.A., para una piscina con $T = 15[\text{min}]$	23
Fig. 2.6 Respuesta ante entrada escalón en L.A., para una piscina con $T = 1[\text{min}]$	25
Fig. 2.7 Respuesta ante entrada escalón en L.C., para dos piscinas, una con $T = 15[\text{min}]$ y otra con $T = 1[\text{min}]$	27
Fig. 2.8 Canal de comunicación con ruido aditivo, [10]	28
Fig. 2.9 Modelo Simulink aproximado para un canal de comunicación AWGN	29
Fig. 2.10 Modelo Simulink aproximado para un canal de comunicación con retardo.....	30
Fig. 2.11 Modelo Simulink aproximado para un canal de comunicación con pérdida de paquetes ..	32
Fig. 2.12 Modelo del bloque de subsistema para el caso de un canal de comunicación con pérdida de paquetes	32
Fig. 2.13 Modelo Simulink aproximado para un canal de comunicación de ganancia variable	34
Fig. 2.14 Modelo del bloque de subsistema para el caso de un canal de comunicación de ganancia variable	35
Fig. 3.1 Modelo Simulink del sistema de control en tiempo continuo para 5 piscinas.....	38
Fig. 3.2 Simulación resultante del Modelo Simulink de la Figura 3.1 considerando sólo la respuesta transiente	39
Fig. 3.3 Simulación resultante del Modelo Simulink de la Figura 3.1 considerando sólo la perturbación.....	40
Fig. 3.4 Modelo Simulink del sistema de control en tiempo discreto para 5 piscinas con un tiempo de muestreo de $15[\text{min}]$	41
Fig. 3.5 Simulación resultante del Modelo Simulink de la Figura 3.4 considerando sólo la respuesta transiente	42
Fig. 3.6 Simulación resultante del Modelo Simulink de la Figura 3.4 considerando sólo la perturbación.....	43
Fig. 3.7 Modelo Simulink del sistema de control en tiempo discreto para 5 piscinas con un tiempo de muestreo de $1[\text{min}]$	44
Fig. 3.8 Simulación resultante del Modelo Simulink de la Figura 3.7 considerando sólo la respuesta transiente	45
Fig. 3.9 Simulación resultante del Modelo Simulink de la Figura 3.7 considerando sólo la perturbación.....	46
Fig. 3.10 Reemplazo a realizar en las 5 piscinas cuyo tiempo de muestreo es de $15[\text{min}]$, para que haya <i>inestabilidad de cuerda</i> en tiempo discreto	47
Fig. 3.11 Modelo Simulink del sistema de control en tiempo discreto para 5 piscinas con un tiempo de muestreo de $15[\text{min}]$ y que cumple con la <i>inestabilidad de cuerda</i>	48
Fig. 3.12 Simulación resultante del Modelo Simulink de la Figura 3.11 considerando sólo la respuesta transiente	49
Fig. 3.13 Simulación resultante del Modelo Simulink de la Figura 3.11 considerando sólo la perturbación.....	50

Fig. 3.14 Reemplazo a realizar en las 5 piscinas cuyo tiempo de muestreo es de 1[<i>min</i>], para que haya <i>inestabilidad de cuerda</i> en tiempo discreto	50
Fig. 3.15 Modelo Simulink del sistema de control en tiempo discreto para 5 piscinas con un tiempo de muestreo de 1[<i>min</i>] y que cumple con la <i>inestabilidad de cuerda</i>	51
Fig. 3.16 Simulación resultante del Modelo Simulink de la Figura 3.15 considerando sólo la respuesta transiente	52
Fig. 3.17 Simulación resultante del Modelo Simulink de la Figura 3.15 considerando sólo la perturbación.....	53
Fig. 4.1 Modelo Simulink del sistema de control en tiempo continuo para 5 piscinas.....	55
Fig. 4.2 Modelo de un canal de comunicación AWGN tipo CG en tiempo continuo para 5 piscinas	57
Fig. 4.3 SNR promedio de los canales de comunicación tipo CG como función de ν en tiempo continuo para 5 piscinas	58
Fig. 4.4 Modelo de un canal de comunicación AWGN tipo GC en tiempo continuo para 5 piscinas	60
Fig. 4.5 SNR promedio de los canales de comunicación tipo GC como función de ν en tiempo continuo para 5 piscinas	61
Fig. 4.6 Modelo de un canal de comunicación con retardo tipo CG en tiempo continuo para 5 piscinas.....	62
Fig. 4.7 SNR promedio de los canales de comunicación tipo CG como función de t en tiempo continuo para 5 piscinas	63
Fig. 4.8 Modelo de un canal de comunicación con retardo tipo GC en tiempo continuo para 5 piscinas.....	65
Fig. 4.9 SNR promedio de los canales de comunicación tipo GC como función de t en tiempo continuo para 5 piscinas	66
Fig. 4.10 SNR promedio de los canales de comunicación tipo CG y GC como función de t en tiempo continuo para 5 piscinas	68
Fig. 5.1 Modelo Simulink del sistema de control en tiempo discreto para 5 piscinas con un tiempo de muestreo de 1[<i>min</i>].....	71
Fig. 5.2 Modelo de un canal de comunicación AWGN tipo CG en tiempo discreto para 5 piscinas	73
Fig. 5.3 SNR promedio de los canales de comunicación tipo CG como función de ν en tiempo discreto para 5 piscinas	74
Fig. 5.4 Modelo de un canal de comunicación AWGN tipo GC en tiempo discreto para 5 piscinas	76
Fig. 5.5 SNR promedio de los canales de comunicación tipo GC como función de ν en tiempo discreto para 5 piscinas	77
Fig. 5.6 Modelo de un canal de comunicación con retardo tipo CG en tiempo discreto para 5 piscinas	79
Fig. 5.7 SNR promedio de los canales de comunicación tipo CG como función de t en tiempo discreto para 5 piscinas	80
Fig. 5.8 Modelo de un canal de comunicación con retardo tipo GC en tiempo discreto para 5 piscinas	82
Fig. 5.9 SNR promedio de los canales de comunicación tipo GC como función de t en tiempo discreto para 5 piscinas	83
Fig. 5.10 SNR promedio de los canales de comunicación tipo CG y GC como función de t en tiempo discreto para 5 piscinas	85
Fig. 5.11 Modelo de un canal de comunicación con pérdida de paquetes tipo CG en tiempo discreto para 5 piscinas	87

Fig. 5.12 SNR promedio de los canales de comunicación tipo CG como función de u en tiempo discreto para 5 piscinas	88
Fig. 5.13 Modelo de un canal de comunicación con pérdida de paquetes tipo GC en tiempo discreto para 5 piscinas	90
Fig. 5.14 SNR promedio de los canales de comunicación tipo GC como función de u en tiempo discreto para 5 piscinas	91
Fig. 5.15 SNR promedio de los canales de comunicación tipo CG y GC como función de u en tiempo discreto para 5 piscinas	93
Fig. 5.16 Modelo de un canal de comunicación de ganancia variable tipo CG en tiempo discreto para 5 piscinas	95
Fig. 5.17 SNR promedio de los canales de comunicación tipo CG como función de α en tiempo discreto para 5 piscinas	96
Fig. 5.18 Modelo de un canal de comunicación de ganancia variable tipo GC en tiempo discreto para 5 piscinas	98
Fig. 5.19 SNR promedio de los canales de comunicación tipo GC como función de α en tiempo discreto para 5 piscinas	99



Nomenclatura

N	: número de muestras.
T	: tiempo de muestreo.
f_s	: frecuencia de muestreo.
t	: instante de tiempo.
$f(t)$: función o señal en el tiempo continuo.
k	: valor entero (positivo en esta memoria de título) que denota el número de muestra de una señal cualesquiera en el dominio del tiempo.
kT	: instante de tiempo en el cual es muestreada una señal cualesquiera.
$f(k)$: función o señal en el tiempo discreto (también escrita $f(kT)$).
$f(s)$: función o señal en el plano de Laplace.
$y(z)$: función o señal de salida del sistema en el plano z .
$u(z)$: función o señal de entrada al sistema en el plano z .
$h(z)$: función de transferencia entre la salida del sistema $y(z)$ y la entrada al sistema $u(z)$.
$C_{15}(z)$: función de transferencia en el tiempo discreto del controlador con $T = 15[\text{min}]$.
$C_1(z)$: función de transferencia en el tiempo discreto del controlador con $T = 1[\text{min}]$.
P	: Nivel de Potencia de Entrada Admisible (Admissible Input Power Level)
Φ	: Densidad Espectral de Ruido (Noise Spectral Density)
H	: Entropía del canal de comunicación
C	: Capacidad del canal de comunicación



Abreviaciones

Mayúsculas

AWGN	: Additive White Gaussian Noise (Ruido Gaussiano, Blanco y Aditivo).
SNR	: Signal to Noise Ratio (Razón Señal-Ruido).
RLS	: Recursive Least Squares (Mínimos Cuadrados Recursivos).
LQR	: Linear Quadratic Regulator (Regulador Lineal Cuadrático).
MPC	: Model Predictive Control (Modelo de Control Predictivo).
FLC	: Fuzzy Logic Controller (Controlador Lógico Difuso).
F. de T.	: Función de Transferencia.
L.A.	: Lazo abierto.
L.C.	: Lazo cerrado.
L.D.	: Lazo directo.
L.T.I.	: Linear Time-Invariant (Lineal e Invariante en el Tiempo).
CT	: Tiempo continuo.
DT	: Tiempo discreto.
C	: Controlador.
G	: Planta.
T	: Función de sensibilidad complementaria $\left(T = \frac{C \cdot G}{1 + C \cdot G} \right)$.
CG	: Canal de comunicación entre el controlador y la planta.
GC	: Canal de comunicación entre la planta y el controlador.
P.I.	: Proporcional-Integral.
P.I.D.	: Proporcional-Integral-Derivativo.
S.P.	: Sobrepaso.
M.G.	: Margen de ganancia.
M.F.	: Margen de fase.
B.W.	: Bandwidth (Ancho de banda).
E.S.	: Entrada/salida.
S.S.	: Steady state (Estado estacionario).
T.L.	: Transformada de Laplace.
T.Z.	: Transformada Z.
TCP/IP	: Transmission Control Protocol / Internet Protocol.
ASCE	: American Society of Civil Engineers (Sociedad Americana de Ingenieros Civiles).

Minúsculas

s	: segundos.
min	: minutos.
m	: metros.
c.i.	: condiciones iniciales.
i.i.d.	: independent and identically distributed (independientes e idénticamente distribuidas).

Glosario

Sistema	: Conjunto de elementos interconectados e interactuantes que cumplen con un objetivo determinado.
Medio	: Todo aquello que rodea externamente a un sistema.
Proceso	: Conjunto de fenómenos de transferencia, acumulación y transformación de materia, energía e información asociados a un sistema.
Algoritmo	: Serie de pasos organizados que describen el proceso que se debe seguir para dar solución a un problema específico.
Modelo	: Descripción analítica, algorítmica o conceptual de un proceso.
Estructura	: Descriptor de interconexiones entre elementos de un sistema (ecuaciones, secuencia de cálculo de un algoritmo, diagrama en bloques).
Variable	: Descriptor de las interacciones entre los elementos de un sistema, así como de las influencias medio-sistema y sistema-medio.
Parámetro	: Descriptor de las características de un elemento en un sistema.
Modelado	: Determinación de ecuaciones, variables y parámetros conducentes a la obtención de un modelo.
Controlador	: Dispositivo capaz de realizar un control o regulación de una magnitud física asociada a un sistema.
Sensor	: Dispositivo capaz de detectar magnitudes físicas o químicas, llamadas variables de instrumentación, y transformarlas en variables eléctricas.
Actuador	: Dispositivo capaz de transformar energía hidráulica, neumática o eléctrica en la activación de un proceso con la finalidad de generar un efecto sobre un proceso automatizado.
Planta	: Consiste en un equipo cuyo objetivo es realizar una operación determinada.
Compuerta	: Plancha fuerte que se desliza por un carril o corredor que se coloca en los canales, presas o diques para graduar o cortar el paso del agua.
SNR	: Razón entre la potencia de la señal y la potencia del ruido, o bien, margen que hay entre la potencia de la señal que se transmite y la potencia del ruido que la corrompe.
Paquete de datos	: Unidad fundamental de transporte de información en todas las redes de computadoras modernas.
Ancho de banda	: Banda de frecuencias que contiene la mayor parte de la energía de la señal. Se considera despreciable la energía contenida en las frecuencias fuera de este margen (un criterio a seguir sería considerar aquella banda de frecuencias que transporte un 90% de la energía total de la señal).
Piscina de regadío	: Tramo de agua entre dos compuertas.
Canal de regadío	: Conjunto de piscinas de regadío conectadas físicamente en cascada.

Capítulo 1. Introducción

1.1. Introducción General

Hoy en día el manejo óptimo del recurso hídrico es fundamental en la agricultura, debido a que cada vez se está haciendo más escaso a nivel mundial. Es por esto y, sumado a los precios accesibles de sensores y actuadores, que se está adoptando la tendencia a nivel mundial de automatizar los sistemas de distribución de agua para riego. En cuanto a los efectos de canales de comunicación, el control de los sistemas de canales de regadío no los considera, pero cada vez esto es menos cierto, debido al auge de las comunicaciones inalámbricas a lo largo de las últimas dos décadas.

En la presente memoria de título se estudiarán los siguientes modelos de canales de comunicación, que afectan la transmisión de la información en sistemas controlados de canales de regadío: AWGN, retardo de transmisión, pérdida de paquetes y ganancia variable. En donde, para analizar el efecto producido por la presencia de estos 4 tipos de canales de comunicación, se recurrirá al SNR.

Los resultados obtenidos a partir de los estudios mencionados en el párrafo anterior, servirán de base para trabajo experimental futuro en el Laboratorio de Control de Procesos del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción, el cual será realizado por otras personas.

El modelamiento y simulación de sistemas de canales de regadío se llevará a cabo mediante Simulink, utilitario del programa Matlab®, que permite la modelación, simulación y análisis de sistemas dinámicos. Se implementarán tanto los modelos ideales como los modelos que incluyen los efectos producidos por la presencia de canales de comunicación.

1.2. Trabajos Previos

Algunos de estos trabajos se detallan a continuación.

1.2.1 De los Canales de Regadío

La información más relevante sobre los canales de regadío para llevar a cabo este trabajo se encontró en [1], mientras que en [2] se hace uso del modelo discreto identificado mediante un algoritmo RLS. En [5] se presenta un modelo para el diseño de los controladores de nivel de agua para el riego y canales de drenaje que describe las características esenciales de los procesos relevantes para el canal de control. En [13] se aprecia un complemento de lo expuesto en [1], puesto que la temática, los esquemas y los gráficos son idénticos. Mientras que en [14] se modelan canales hidráulicos a partir de las ecuaciones de Saint-Venant, las cuales, en relación con las ecuaciones de estructura hidráulica, se utilizan para representar el comportamiento dinámico del agua que fluye en ríos, canales de riego y drenaje.

1.2.2 De los Canales de Comunicación

En el artículo citado en [4] se abordan temas relativos a Sistemas de Control de Red, los cuales son distribuidos espacialmente para establecer la comunicación entre los sensores, actuadores y controladores en una red de comunicación común. En tanto que en [6] se explica el concepto de canal AWGN, siendo que es un artículo de Control, lo cual significa que a algún cierto porcentaje de personas que conforman el área de Control Automático, les interesa considerar en sus estudios la presencia de canales de comunicación AWGN en el Control de un sistema. Además, en [7] se abordan canales de comunicación cuyo valor de SNR se encuentra restringido, tanto en tiempo continuo como en tiempo discreto y donde, en ambos casos, los datos obtenidos muestran que hay limitaciones en la capacidad de estabilizar una planta inestable, a lo largo de un canal de comunicación con un valor de SNR limitado, en un Sistema Lineal Invariante en el Tiempo (LTI) con realimentación. En [8] se abordan diversas herramientas referentes a la teoría de la información, las cuales responden a dos preguntas fundamentales de la teoría de la comunicación. ¿Cuál es la compresión de datos final? (Respuesta: La Entropía H) y ¿Cuál es la velocidad de transmisión máxima de la comunicación? (Respuesta: La Capacidad del Canal C). La metodología empleada para la aplicación del Método de Montecarlo es revisada en [9]. En [10], [11] y [12] se abordan conceptos de Sistemas de Comunicación y de Comunicaciones Digitales, que permiten comprender los principios tanto básicos como profundos de los canales de comunicación y su modelamiento.

Por último, en [15] se presenta un estudio acerca de los fenómenos físicos que posibilitan la transmisión de información desde una estación emisora, hasta una estación receptora; así como los

medios físicos más empleados en la actualidad para el transporte de la señal portadora de la información.

1.2.3 De los Sistemas de Control

Los temas revisados en [3] permiten analizar sistemas lineales, con énfasis en estructuras realimentadas. En particular para este trabajo, se recurre a la estructura del compensador en adelanto para sistemas continuos, la cual es capaz de explicar el tipo de controlador empleado en [1]. De los temas abordados en [16] son útiles para este trabajo: *Transformada de Laplace*, *Transformada Z* y *ganancia dc* de un sistema lineal invariante en el tiempo, tanto en tiempo continuo como en tiempo discreto.

1.2.4 Discusión

La revisión realizada muestra que los efectos de los canales de comunicaciones en sistemas de control de canales de regadío y la utilización de modelos más realistas que representen el comportamiento de la información transmitida entre actuadores, controladores y sensores han sido poco abordados. En este trabajo se abordan efectos de canales de comunicación tales como: AWGN, retardo de transmisión, pérdida de paquetes por transmisión de datos y ganancia variable.

Por otro lado, se requiere optimizar el manejo del recurso hídrico debido a las altas tasas de aumento de la población mundial, lo cual trae como consecuencia la creciente demanda por dicho recurso. Ahora, para lograr esta optimización, cabe destacar la disponibilidad de sensores y actuadores a precios reducidos, producto de una creciente tendencia a nivel mundial por incorporar estos elementos en el control de canales de regadío.

Finalmente, el accionamiento de las estructuras de regulación y paso de la mayoría de los sistemas de distribución de agua para riego no es automatizado.

1.3. Hipótesis de Trabajo

- El desempeño de control va a empeorar por la presencia de canales de comunicación.
- Los efectos de los canales de comunicación en los sistemas de canales de regadío pueden ser cuantificados mediante la SNR de dichos canales.

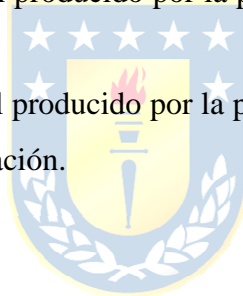
1.4. Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Estudiar diversos efectos de canales de comunicación presentes en los sistemas de control de canales de regadío.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Estimar el efecto sobre el control producido por la presencia de un canal de comunicación AWGN.
- Estimar el efecto sobre el control producido por la presencia de retardo en la comunicación.
- Estimar el efecto sobre el control producido por la pérdida de paquetes en una comunicación vía Internet.
- Estimar el efecto sobre el control producido por la presencia de un canal de comunicación de ganancia variable en la comunicación.

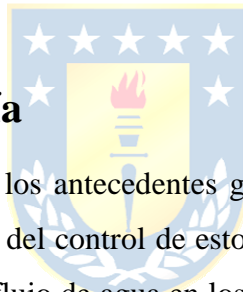


1.5. Alcances y Limitaciones

- Los efectos de canales de comunicación a analizar son primordialmente: AWGN, retardo de transmisión, pérdida de paquetes por transmisión de datos (por ejemplo vía internet) y ganancia variable.
- Se considerará como planta a cinco piscinas de regadío conectadas en cascada, tanto para el modelo en tiempo continuo como para el modelo en tiempo discreto.
- Las simulaciones del comportamiento tanto del sistema continuo como del discreto serán realizadas mediante Simulink y/o Matlab®.
- Para el modelo en tiempo continuo, no se ha considerado el efecto de la onda viajera a través del agua y no se han empleado las ecuaciones de Saint-Venant para modelar la dinámica del flujo de agua. Esto trae como consecuencia que la planta del modelo continuo haya sido considerada como un integrador con una constante “ α ”, asociada al área de la superficie de

la *piscina-i*, más un retardo de transporte de agua, el cual va desde la salida de la planta de la *piscina-i*, hasta la referencia de la *piscina-(i+1)* (piscina siguiente).

- En el modelo en tiempo continuo, sólo se ha considerado la presencia de una perturbación en la quinta piscina, la cual consiste en que el agricultor extrae agua de ésta.
- El controlador del modelo en tiempo continuo está dado por un compensador en adelanto [3] más un integrador, el cual fue obtenido de [1].
- El controlador correspondiente al sistema en tiempo discreto, viene dado por el equivalente discretizado del controlador propuesto para el sistema en tiempo continuo.
- Como planta del modelo en tiempo discreto, se ha considerado el modelo propuesto en [2], identificado mediante el algoritmo RLS. Nótese que los bloques en este modelo ligados a: **a)** La salida del controlador de la piscina actual (*piscina-i*), **b)** La perturbación, dada por la extracción de agua en la quinta y última piscina por parte del agricultor y **c)** La salida del controlador de la piscina siguiente (*piscina-(i+1)*), son distintos.



1.6. Temario y Metodología

El Capítulo 2 hace referencia a los antecedentes generales tanto de los canales de regadío como de los canales de comunicación y del control de estos sistemas en su conjunto. Cabe destacar que, en dicho capítulo, la dinámica del flujo de agua en los canales de regadío, no será representada mediante las ecuaciones de Saint-Venant, sino que mediante otra versión consistente en un estanque que se comporta como un integrador en tiempo continuo y un cuasi-integrador en tiempo discreto.

El Capítulo 3 exhibe los sistemas de control en lazo cerrado, es decir, sin considerar los efectos producidos por la presencia de canales de comunicación, tanto en tiempo continuo como en tiempo discreto. Además para los modelos en tiempo continuo, se aprecia en las simulaciones el efecto de inestabilidad de cuerda, mientras que para los modelos en tiempo discreto, se obtiene un controlador discreto equivalente, acorde al tiempo de muestreo impuesto a conveniencia del usuario.

Más adelante, el Capítulo 4 presenta previamente, a modo de reseña, la solución de control para el canal de regadío en tiempo continuo, para posteriormente mostrar el análisis mediante el Método de Montecarlo para los casos de canal de comunicación AWGN y retardo en el envío de información.

El Capítulo 5 aborda los mismos aspectos que el Capítulo 4, pero enfocados en los sistemas de control en tiempo discreto. Se incluye también el análisis mediante el Método de Montecarlo,

pero ahora para los casos de canal de comunicación AWGN, retardo en el envío de información, pérdida de paquetes de datos y presencia de ganancia variable durante la transmisión de la información.

Finalmente, el Capítulo 6 resume las conclusiones que se pueden realizar al observar los resultados obtenidos a lo largo de este trabajo.



Capítulo 2. Antecedentes Generales

2.1. Introducción

Para comprender de mejor manera el funcionamiento de los sistemas de control para canales de regadío, se presenta este capítulo, con el fin de introducir algunos conceptos asociados tanto a los canales de regadío, como a los canales de comunicación que pretenden modelar de forma más realista las transmisiones de información sensor – controlador, controlador – actuador, actuador – sensor y sus transmisiones recíprocas.

2.2. Principios de los canales de regadío

Un canal de regadío consiste básicamente en varias piscinas asociadas en cascada mediante compuertas situadas en los extremos de éstas.

Las redes de riego de aguas abiertas son utilizadas en los canales de regadío de todo el mundo para apoyar la actividad agrícola. Por lo general, estas redes operan en lazo abierto, entonces, para lograr que la distribución de agua sea realizada en lazo cerrado, es necesario un refuerzo de los sistemas de ingeniería con información adecuada acerca de la infraestructura de sensores, actuadores, procesamiento de la información y recursos de comunicación.

La importancia de la operación en lazo cerrado de las redes de regadío radica en que se logra producir una mejora significativa en la calidad del servicio, junto con una mayor eficiencia de la distribución de agua.

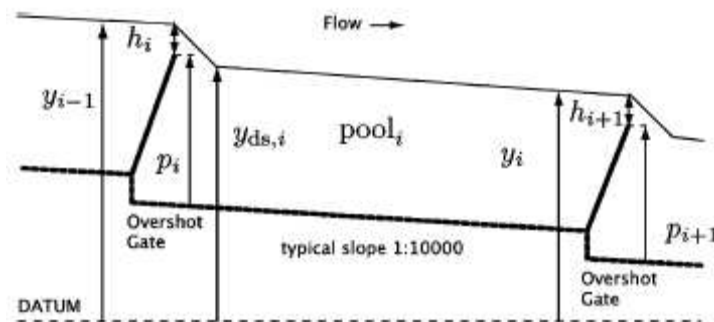


Fig. 2.1 Tramo de canal en aguas abiertas con compuertas, [1]

El tramo de agua entre dos compuertas se denomina piscina, tal como el mostrado en la figura 2.1. A su vez, un grupo de piscinas componen un canal de regadío. Un modelo real de compuertas automatizadas se muestra en la figura 2.2.



Fig. 2.2 Compuertas automatizadas, [1]

En general, un modelo para un canal de regadío puede ser pensado como piscinas de regadío asociadas en serie, como se ilustra en la figura 2.3. Este modelo es el que se utilizará en las secciones siguientes.

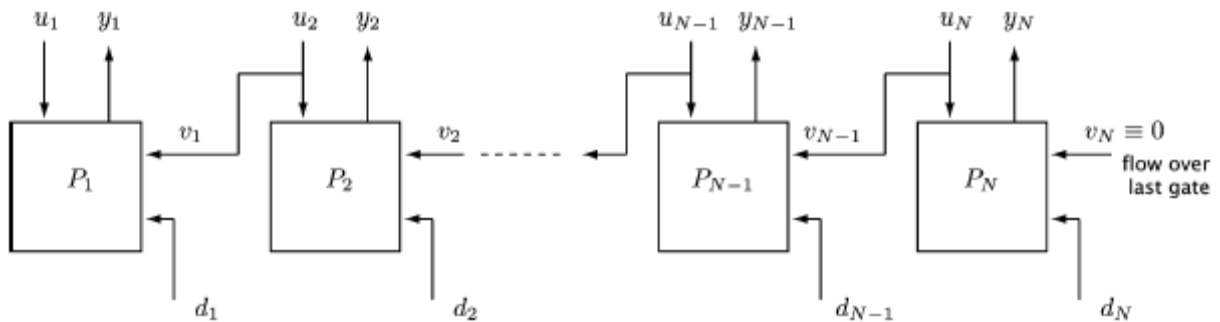


Fig. 2.3 Modelo de canal de regadío como “N” piscinas conectadas en serie cuya dinámica está descrita por la ecuación (2.1), [1]

Para obtener el modelo matemático aproximado, en tiempo continuo, que rige el comportamiento del sistema, compuesto de 5 piscinas de regadío ligadas en cascada, acorde al

análisis que será llevado a cabo en la presente memoria de título, no será considerado el uso del modelo hidrológico dado por las ecuaciones de Saint-Venant. Además, el control de dicho sistema será efectuado a baja frecuencia para no excitar la frecuencia de la onda viajera, puesto que no será considerado este efecto en el presente estudio.

En el modelo matemático que será presentado a continuación, no se incluirá la dinámica del modelo hidrológico, caracterizada por el polinomio $\pi_i(\cdot)$, que para piscinas cuya longitud es de varios kilómetros, los modelos más fidedignos son obtenidos usando un polinomio de tercer orden, cuyas raíces corresponden a un integrador y a una oscilación amortiguada de un valor pequeño. Además, el modelo aguas abajo de nivel en la *piscina-i*, que será mostrado a continuación, se basa en el principio de conservación de masa. Entonces, la ecuación que describe al modelo mostrado en la figura anterior, en el dominio del tiempo, es la siguiente:

$$\pi_i \left(\frac{d}{dt} \right) y_i(t) = \gamma_i \cdot h_i^{3/2}(t - \tau_i) - \gamma_{i+1} \cdot h_{i+1}^{3/2}(t) - d_i(t) \quad (2.1)$$

Ahora bien, considerando una operación del lazo de control por debajo de la frecuencia de la onda viajera presente en la piscina, el modelo matemático puede ser reemplazado por la ecuación (2.2) mostrada a continuación:

$$\alpha_i \cdot \frac{d}{dt} y_i(t) = \gamma_i \cdot h_i^{3/2}(t - \tau_i) - \gamma_{i+1} \cdot h_{i+1}^{3/2}(t) - d_i(t) \quad (2.2)$$

Lo cual indica que la planta ha sido considerada como un integrador, debido a que el ancho de banda del controlador está por debajo de la frecuencia de la onda viajera.

Luego, linealizando el modelo mediante el cambio de variables $u_i = \gamma_i \cdot h_i^{3/2}$, se obtiene el modelo presentado en (2.3):

$$\alpha_i \cdot \frac{d}{dt} y_i(t) = u_i(t - \tau_i) - u_{i+1}(t) - d_i(t) \quad (2.3)$$

Entonces, teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

$$v_i(s) = u_{i+1}(s), \quad i = 1, 2, 3, 4, 5, \quad v_5(s) = u_6(s) = 0$$

Con la condición de borde $v_N(s) \equiv 0$, $N = 5$

Y aplicando Transformada de Laplace, se obtiene la expresión dada por (2.4):

$$y_i(s) = \frac{1}{s \cdot \alpha_i} \cdot (\exp(-s \cdot \tau_i) \cdot u_i(s) - v_i(s) - d_i(s)) \quad (2.4)$$

Donde:

P_i	: Posición de la <i>compuerta-i</i>
$y_i(s)$: Nivel de la <i>piscina-i</i>
τ_i	: Tiempo de retardo de la <i>piscina-i</i>
α_i	: Área de la superficie de la <i>piscina-i</i>
$u_i(s)$: Flujo de agua sobre la <i>compuerta-i</i> (valor de la salida del controlador de la <i>piscina-i</i>)
γ_i	: Constante que depende de la geometría de la <i>compuerta-i</i>
h_i	: Distancia entre el nivel de agua de la piscina anterior y_{i-1} y el tope de la posición P_i de la <i>compuerta-i</i> o altura de la <i>compuerta-i</i>
$v_i(s)$: Flujo de agua sobre la <i>compuerta-(i+1)</i> (valor de la salida del controlador de la <i>piscina-(i+1)</i>)
$d_i(s)$: Perturbación asociada a la <i>piscina-i</i>
$v_N(s)$: Flujo de agua sobre la última compuerta (<i>compuerta N-ésima</i>)

La tabla de valores correspondiente a las 5 piscinas para tiempo continuo, es la siguiente:

TABLA 2.1 Tiempos de retardo y Área de superficies para las 5 piscinas, [1]

i	τ_i	α_i
1	8 mins	22414m ²
2	3 mins	11942m ²
3, 4, 5	16 mins	43806m ²

Ahora bien, para justificar el modelo propuesto en (2.4), se considera que cada piscina de regadío se comporta como un estanque con un retardo en la entrada del mismo, tal como el mostrado en la figura 2.4.

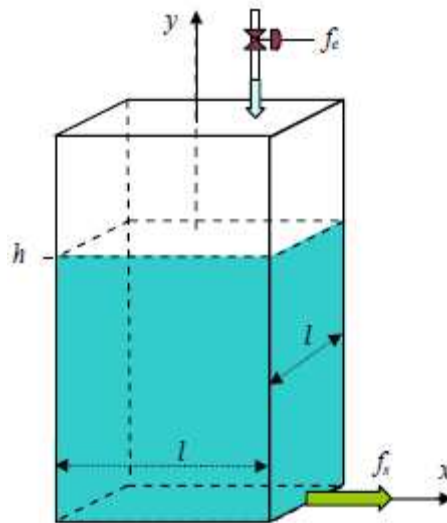


Fig. 2.4 Estanque de ejemplo para abordar la similitud del mismo con una piscina de regadío, [3]

Luego, mediante un balance de masa se obtiene la ecuación que modela al estanque con un retardo τ en el flujo de entrada.

$$\frac{dm}{dt} = \dot{m}_{entrada}(t - \tau) - \dot{m}_{salida} \quad (2.5)$$

Donde “m” corresponde a la masa de agua que fluye por el estanque.

Luego, se sabe que $m = \rho \cdot V = \rho \cdot A \cdot h$ y que $\frac{dm}{dt} = \rho \cdot \frac{dV}{dt} = \rho \cdot A \cdot \frac{dh}{dt} = \rho \cdot f$, con:

- m : Masa
 ρ : Densidad del fluido (agua)
 V : Volumen
 A : Sección transversal estanque ($A = l^2$)
 h : Altura del estanque
 f : Flujo volumétrico
 \dot{m} : Flujo másico

Entonces, haciendo los reemplazos correspondientes, y considerando que:

- f_e : Flujo de entrada
 f_s : Flujo de salida

Se obtiene la siguiente ecuación:

$$\frac{d(\rho \cdot A \cdot h)}{dt} = \rho \cdot f_e(t - \tau) - \rho \cdot f_s \quad (2.6)$$



Lo cual equivale a:

$$\rho \cdot A \cdot \frac{dh}{dt} = \rho \cdot f_e(t - \tau) - \rho \cdot f_s \quad (2.7)$$

Ahora bien, se pueden cancelar los “ ρ ”, para obtener:

$$A \cdot \frac{dh}{dt} = f_e(t - \tau) - f_s \quad (2.8)$$

Trasladando al otro lado de la igualdad el área “ A ” y aplicando Transformada de Laplace se obtiene la siguiente expresión:

$$s \cdot h(s) - h(0^-) = \frac{f_e(s) \cdot \exp(-s \cdot \tau) - f_s(s)}{A} \quad (2.9)$$

Considerando c.i. nulas, se tiene que $h(0^-) = 0$ y, trasladando el término “s” al otro lado de la igualdad, se obtiene la siguiente expresión:

$$h(s) = \frac{f_e(s) \cdot \exp(-s \cdot \tau) - f_s(s)}{A \cdot s} \quad (2.10)$$

Nótese que dicha expresión coincide en estructura con la mostrada en (2.4).

Análogamente, el modelo matemático basado en [2], que será empleado en el sistema de regadío en tiempo discreto, en el dominio de la frecuencia compleja, corresponde al siguiente:

$$y_i(z) = \left\{ \frac{B(z)}{A(z)} \right\} \cdot u_i(z) + \left\{ \frac{C(z)}{A(z)} \right\} \cdot d_i(z) + \left\{ \frac{D(z)}{A(z)} \right\} \cdot v_i(z) \quad (2.11)$$

Donde:

$$v_i(z) = u_{i+1}(z), \quad i = 1, 2, 3, 4, 5, \quad v_5(z) = u_6(z) = 0$$

Con la condición de borde $v_N(z) \equiv 0$, $N = 5$

$y_i(z)$: Nivel de la *piscina-i*

$u_i(z)$: Flujo de agua sobre la *compuerta-i* (valor de la salida del controlador de la *piscina-i*)

$v_i(z)$: Flujo de agua sobre la *compuerta-(i+1)* (valor de la salida del controlador de la *piscina-(i+1)*)

$d_i(z)$: Perturbación asociada a la *piscina-i*

$v_N(z)$: Flujo de agua sobre la última compuerta (*compuerta N-ésima*)

La justificación matemática del modelo propuesto en (2.12) se detalla a continuación:

En [2], se hace uso del siguiente algoritmo RLS:

$$\{A(z^{-1})\} \cdot y_i(z) = \{B(z^{-1}) \cdot z^{-1}\} \cdot u_i(z) + \{C(z^{-1}) \cdot z^{-1}\} \cdot d_i(z) + \{D(z^{-1}) \cdot z^{-1}\} \cdot v_i(z) \quad (2.12)$$

De donde, al despejar $y_i(z)$, se obtiene lo siguiente:

$$y_i(z) = \left\{ \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} \cdot z^{-1} \right\} \cdot u_i(z) + \left\{ \frac{C(z^{-1})}{A(z^{-1})} \cdot z^{-1} \right\} \cdot d_i(z) + \left\{ \frac{D(z^{-1})}{A(z^{-1})} \cdot z^{-1} \right\} \cdot v_i(z) \quad (2.13)$$

Ahora interesa obtener las expresiones para $\frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} \cdot z^{-1}$, $\frac{C(z^{-1})}{A(z^{-1})} \cdot z^{-1}$ y $\frac{D(z^{-1})}{A(z^{-1})} \cdot z^{-1}$, para ello,

se le asignará una forma polinomial generalizada, acorde a lo expuesto en [2]. Dicho esto, las expresiones asignadas son las siguientes:

$$A(z^{-1}) = a_0 + a_1 \cdot z^{-1} + a_2 \cdot z^{-2} \quad (2.14)$$

$$B(z^{-1}) = b_0 + b_1 \cdot z^{-1} \quad (2.15)$$

$$C(z^{-1}) = c_0 + c_1 \cdot z^{-1} \quad (2.16)$$

$$D(z^{-1}) = d_0 + d_1 \cdot z^{-1} \quad (2.17)$$

Cuyos valores, según [2], son los siguientes:

$$a_0 = 1, a_1 = -0,97386, a_2 = 0,056245$$

$$b_0 = 0,31253, b_1 = 0,020021$$

$$c_0 = -0,32678, c_1 = 0,22708$$

$$d_0 = -0,016787, d_1 = 0,0089414$$

Luego, se obtiene la expresión para $\frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} \cdot z^{-1}$ como sigue:

$$\frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} \cdot z^{-1} = \frac{b_0 + b_1 \cdot z^{-1}}{a_0 + a_1 \cdot z^{-1} + a_2 \cdot z^{-2}} \cdot z^{-1} = \frac{b_0 \cdot z^{-1} + b_1 \cdot z^{-2}}{a_0 + a_1 \cdot z^{-1} + a_2 \cdot z^{-2}} \quad (2.18)$$

Entonces, al multiplicar numerador y denominador de (2.19) por “ z^2 ”, se obtiene la siguiente expresión:

$$\frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} \cdot z^{-1} = \frac{b_0 \cdot z + b_1}{a_0 \cdot z^2 + a_1 \cdot z + a_2} \quad (2.19)$$

Lo cual equivale a decir que:

$$\frac{B(z)}{A(z)} = \frac{b_0 \cdot z + b_1}{a_0 \cdot z^2 + a_1 \cdot z + a_2} \quad (2.20)$$

Análogamente, para $\frac{C(z^{-1})}{A(z^{-1})} \cdot z^{-1}$ y $\frac{D(z^{-1})}{A(z^{-1})} \cdot z^{-1}$, siguiendo el método antes descrito, se

obtienen las siguientes expresiones:

$$\frac{C(z)}{A(z)} = \frac{c_0 \cdot z + c_1}{a_0 \cdot z^2 + a_1 \cdot z + a_2} \quad (2.21)$$

$$\frac{D(z)}{A(z)} = \frac{d_0 \cdot z + d_1}{a_0 \cdot z^2 + a_1 \cdot z + a_2} \quad (2.22)$$

Luego, reemplazando los valores de $a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, c_0, c_1, d_0$ y d_1 en (2.20), (2.21) y (2.22), se obtienen las F. de T. (2.23), (2.24) y (2.25) que constituyen la planta de [2] para un tiempo de muestreo de 15[min]:

$$\frac{B(z)}{A(z)} = \frac{0,31253 \cdot z + 0,020021}{z^2 - 0,97386 \cdot z + 0,056245} \quad (2.23)$$

$$\frac{C(z)}{A(z)} = \frac{-0,32678 \cdot z + 0,22708}{z^2 - 0,97386 \cdot z + 0,056245} \quad (2.24)$$

$$\frac{D(z)}{A(z)} = \frac{-0,016787 \cdot z + 0,0089414}{z^2 - 0,97386 \cdot z + 0,056245} \quad (2.25)$$

Ahora, para efectos de obtener una mejor representación del sistema en tiempo continuo, al trabajar en tiempo discreto, se procederá a explicar que hace el comando Matlab® “*d2d*”. La sintaxis de este comando viene dada por: $SYS = D2D(SYS,TS,METHOD)$ y lo que hace es volver a muestrear el modelo en tiempo discreto LTI, denominado SYS , para generar un sistemas discreto equivalente cuyo tiempo de muestreo es TS . El método de resampleo ocupado, para la obtención de dicho modelo equivalente, corresponde a la sintaxis $METHOD$, el cual debe se elegido entre las siguientes sentencias:

'zoh' : Retentor de orden cero en las entradas
 'tustin' : Transformada bilineal o Método de Tustin
 'prewarp' : Método de Tustin con frecuencia de pandeo u oscilación. La frecuencia crítica Wc (en rad/s), se especifica como cuarta entrada dada por $sys = D2D(sys,Ts,'prewarp',Wc)$

El método empleado cuando se omite la sentencia es el 'zoh'.

Entonces, usando el comando Matlab® “*d2d*” en cada una de estas F. de T. para un tiempo de muestro de 1[*min*] se obtienen las siguientes F. de T.:

$$\frac{B(z)}{A(z)} = \frac{0,01661 \cdot z - 0,01243}{z^2 - 1,824 \cdot z + 0,8254} \quad (2.26)$$

$$\frac{C(z)}{A(z)} = \frac{-0,04976 \cdot z + 0,04851}{z^2 - 1,824 \cdot z + 0,8254} \quad (2.27)$$

$$\frac{D(z)}{A(z)} = \frac{-0,0022 \cdot z + 0,002102}{z^2 - 1,824 \cdot z + 0,8254} \quad (2.28)$$

2.3. Control de los canales de regadío

Para entender cabalmente el modelo que va a ser obtenido a continuación, se explicará en que consiste una red de adelanto según [3].

Una red de adelanto es una red en la cual el cero de controlador se sitúa delante del polo (el cero se sitúa más a la derecha del polo dentro de la recta real), lo cual determina la dirección de desplazamiento del polo según convenga, por lo tanto, el compensador es de la siguiente forma:

$$C(s) = k_c \cdot \alpha \cdot \frac{1 + s \cdot T_c}{1 + \alpha \cdot T_c \cdot s} = k_c \cdot \frac{s + \frac{1}{T_c}}{s + \frac{1}{\alpha \cdot T_c}} \quad (2.29)$$



Donde:

k_c : Ganancia crítica

α : Parámetro de diseño del compensador en adelanto

T_c : Constante de tiempo crítica

Para el diseño de este controlador, debe cumplirse que el parámetro α esté en el rango $0 < \alpha < 1$. Note que en (2.29) se aprecia un cero en $s = -\frac{1}{T_c}$ y un polo en $s = -\frac{1}{\alpha \cdot T_c}$.

Entonces, el modelo del controlador en tiempo continuo, obtenido de [1] y que consiste en un compensador en adelanto [3] más un integrador, viene dado por:

$$C(s) = \frac{k \cdot (1 + s \cdot \phi)}{s \cdot (1 + s \cdot \rho)} \quad (2.30)$$

Cuyos valores, también obtenidos de [1], son los siguientes:

$$k = 7,72 \quad (2.31)$$

$$\phi = 128 \quad (2.32)$$

$$\rho = 15,2 \quad (2.33)$$

Ahora bien, al hacer la comparación entre los controladores (2.29) y (2.30), se obtiene las siguientes relaciones:

$$k = k_c \cdot \alpha \quad (2.34)$$

$$\phi = T_c \quad (2.35)$$

$$\rho = \alpha \cdot T_c \quad (2.36)$$

La idea es obtener expresiones para α , T_c y k_c en función de los parámetros k , ϕ y ρ , cuyos valores son conocidos. Luego, reemplazando (2.35) en (2.36) y despejando se obtiene la siguiente expresión y valor para α :

$$\alpha = \frac{\rho}{T_c} = \frac{\rho}{\phi} = \frac{15,2}{128} = 0,11875 \quad (2.37)$$

Para T_c la expresión es la dada en (2.35) con un valor de $T_c = \phi = 128$, y por último, para k_c , reemplazando (2.35) en (2.36), después despejando α en (2.36) y lo obtenido reemplazándolo en (2.34), se llega a la siguiente expresión y valor para k_c :

$$k_c = \frac{k}{\alpha} = k \cdot \frac{\phi}{\rho} = 7,72 \cdot \frac{128}{15,2} \approx 65,01053 \quad (2.38)$$

A continuación, se procederá a explicar la obtención del controlador discreto equivalente, a partir del controlador citado en (2.30).

Si se desea conocer la salida $y(t)$ discreta; es decir, $y(kT)$, el desarrollo matemático anterior debería considerar sólo las F. de T. $h_a(s)$ y $h_{yu}(s)$. Es decir, la F. de T. entre la señal $v(kT)$ y el muestreo de la salida $y(t)$, que se representaría por $y(z)/v(z)=C(z)$ en este caso, estaría dada por:

$$\frac{y(z)}{v(z)} = \mathcal{Z}\{y(kT)\} = \frac{z-1}{z} \mathcal{Z} \left\{ \mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{1}{s} h_a(s) h_{yu}(s) \right\} \Big|_{t=kT} \right\} \quad (2.39)$$

Con:

$$h_a(s) = 1 \quad (2.40)$$

$$h_{yu}(s) = C(s) = \frac{k \cdot (1 + s \cdot \phi)}{s \cdot (1 + s \cdot \rho)} \quad (2.41)$$

Desarrollando $h_a(s)$ y $h_{yu}(s)$ en fracciones parciales, se obtiene:

$$\frac{1}{s} \cdot h_a(s) \cdot h_{yu}(s) = \frac{1}{s} \cdot 1 \cdot \frac{k \cdot (1 + s \cdot \phi)}{s \cdot (1 + s \cdot \rho)} = \frac{k}{s^2} - \frac{\rho \cdot \left(k - \frac{\phi \cdot k}{\rho} \right)}{s} + \frac{\rho^2 \cdot \left(k - \frac{\phi \cdot k}{\rho} \right)}{\rho \cdot s + 1} \quad (2.42)$$

Aplicando transformada inversa de Laplace a (2.42) y reemplazando t por kT o nT , se obtiene:

$$\phi \cdot k - \rho \cdot k + k \cdot (nT) + \rho \cdot k \cdot \exp\left(-\frac{(nT)}{\rho}\right) - \phi \cdot k \cdot \exp\left(-\frac{(nT)}{\rho}\right) \quad (2.43)$$

Luego, aplicando transformada Z o transformada de Laurent a (2.43) y multiplicando lo obtenido por $\frac{z-1}{z}$, se llega a la siguiente expresión para $\frac{y(z)}{v(z)} = C(z)$:

$$\frac{k \cdot \left(\rho - \phi + T \cdot z - \rho \cdot z + \phi \cdot z - T \cdot \exp\left(-\frac{T}{\rho}\right) - \rho \cdot \exp\left(-\frac{T}{\rho}\right) + \phi \cdot \exp\left(-\frac{T}{\rho}\right) + \rho \cdot z \cdot \exp\left(-\frac{T}{\rho}\right) - \phi \cdot z \cdot \exp\left(-\frac{T}{\rho}\right) \right)}{(z-1) \cdot \left(z - \exp\left(-\frac{T}{\rho}\right) \right)} \quad (2.44)$$

Nótese que el controlador discreto equivalente obtenido en (2.44), para mayor simplicidad en la manipulación algebraica, puede ser expresado como sigue:

$$C(z) = \frac{k \cdot (\alpha \cdot z + \beta)}{(z-1) \cdot (z-\gamma)} \quad (2.45)$$

Con:

$$\alpha = T - \rho + \phi + \rho \cdot \exp\left(-\frac{T}{\rho}\right) - \phi \cdot \exp\left(-\frac{T}{\rho}\right) = T - \rho + \phi + (\rho - \phi) \cdot \exp\left(-\frac{T}{\rho}\right) \quad (2.46)$$

$$\beta = \rho - \phi - T \cdot \exp\left(-\frac{T}{\rho}\right) - \rho \cdot \exp\left(-\frac{T}{\rho}\right) + \phi \cdot \exp\left(-\frac{T}{\rho}\right) = \rho - \phi + (\phi - T - \rho) \cdot \exp\left(-\frac{T}{\rho}\right) \quad (2.47)$$

$$\gamma = \exp\left(-\frac{T}{\rho}\right) \quad (2.48)$$

Cabe destacar que el controlador en tiempo discreto obtenido en (2.45) fue discretizado para obtener un desempeño en lazo cerrado comparable al obtenido con el controlador en tiempo continuo.

Luego, la planta aproximada empleada para obtener los valores de k , α , β y γ , corresponde a la obtención de la realización mínima de la planta real dada por

$$G_{1_{15\min}}(z) = \frac{0,31253 \cdot z + 0,020021}{z^2 - 0,97386 \cdot z + 0,056245}, \text{ mediante la factorización de ésta y su respectiva}$$

cancelación cero/polo, obteniéndose la siguiente F. de T.:

$$G_{1_{aprox_{15\min}}}(z) = \frac{0,31253}{z - 0,9122} \quad (2.49)$$

El uso del modelo aproximado y no el real para la planta, se debe exclusivamente al diseño del controlador para lograr estabilidad al operar en L.C.

Entonces, la función de sensibilidad complementaria viene dada por:

$$T_1(z) = \frac{C(z) \cdot G_{1aprox_15min}(z)}{1 + C(z) \cdot G_{1aprox_15min}(z)} = \frac{\frac{k \cdot (\alpha \cdot z + \beta) \cdot 0,31253}{(z-1) \cdot (z-\gamma) \cdot z-0,9122}}{1 + \frac{k \cdot (\alpha \cdot z + \beta) \cdot 0,31253}{(z-1) \cdot (z-\gamma) \cdot z-0,9122}} \quad (2.50)$$

La cual, mediante manipulación algebraica, queda como sigue:

$$T_1(z) = \frac{k \cdot (\alpha \cdot z + \beta) \cdot 0,31253}{(z-1) \cdot (z-\gamma) \cdot (z-0,9122) + k \cdot (\alpha \cdot z + \beta) \cdot 0,31253} \quad (2.51)$$

Desarrollando el denominador se obtiene lo siguiente:

$$T_1(z) = \frac{k \cdot (\alpha \cdot z + \beta) \cdot 0,31253}{z^3 - (\gamma+1,9122) \cdot z^2 + (1,9122 \cdot \gamma + 0,31253 \cdot \alpha \cdot k + 0,9122) \cdot z + (0,31253 \cdot \beta \cdot k - 0,9122 \cdot \gamma)} \quad (2.52)$$

Luego, dado que los polos en L.C. se desea que sean 0,5, 0,6 y 0,7, el polinomio deseado viene dado por:

$$(z-0,5) \cdot (z-0,6) \cdot (z-0,7) = z^3 - 1,8 \cdot z^2 + 1,07 \cdot z - 0,21 \quad (2.53)$$

Ahora que se conocen los coeficientes del polinomio del denominador de la función de sensibilidad complementaria y los coeficientes del polinomio deseado, se procede a igualar dichos coeficientes, obteniéndose el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\begin{aligned}
-\gamma - 1,9122 &= -1,8 \\
1,9122 \cdot \gamma + 0,31253 \cdot \alpha \cdot k + 0,9122 &= 1,07 \\
0,31253 \cdot \beta \cdot k - 0,9122 \cdot \gamma &= -0,21
\end{aligned} \tag{2.54}$$

Asignándole a “k” arbitrariamente el valor 10 y resolviendo el sistema de ecuaciones con dicha restricción, se obtienen los siguientes valores:

$$k = 10 \text{ (valor escogido arbitrariamente)}$$

$$\alpha = \frac{1,191}{k} = 0,1191$$

$$\beta = \frac{-0,9994}{k} = -0,09994$$

$$\gamma = -0,1122$$

Finalmente, con estos valores se logra obtener un sistema estable en lazo cerrado, con polos en 0,5, 0,6 y 0,7 al considerar una piscina. Reemplazando estos valores, el controlador queda como sigue:

$$C(z) = C_{15}(z) = \frac{10 \cdot (0,1191 \cdot z - 0,09994)}{(z-1) \cdot (z - (-0,1122))} = \frac{1,191 \cdot z - 0,9994}{(z-1) \cdot (z+0,1122)} = \frac{1,191 \cdot z - 0,9994}{z^2 - 0,8878 \cdot z - 0,1122} \tag{2.55}$$

Cabe destacar que este controlador heredará un tiempo de muestro de 15[min], debido a que formará un lazo cerrado de control junto a la planta de [2], la cual posee un tiempo de muestro de 15[min].

Entonces, aplicando el comando Matlab® “d2d”, cuyo funcionamiento fue explicado en el capítulo 2.2, al controlador expuesto anteriormente y para un tiempo de muestro de 1[min], se obtiene el siguiente controlador:

$$C_1(z) = \frac{0,1531 \cdot z^2 - 0,2511 \cdot z + 0,09871}{z^3 - 2,691 \cdot z^2 + 2,438 \cdot z - 0,747} \tag{2.56}$$

El cual también es estable operando en lazo cerrado junto a la planta de [2], al igual que el controlador que hereda un tiempo de muestreo de 15[min].

Cabe destacar que para el Capítulo 5 sólo se analizará el sistema que posee un tiempo de muestreo de 1[min], debido a que es más representativo respecto del sistema de tiempo continuo y, además, se logra visualizar el retardo de transporte asociado al canal de regadío, el cual es ocultado cuando se muestrea el sistema cada 15[min].

Ahora, para visualizar el comportamiento del sistema ante diversos escenarios, se visualizarán las respuestas ante entrada escalón tanto en L.A. como en L.C. Entonces, la respuesta ante entrada escalón en L.A., para una piscina y ocupando un tiempo de muestreo de 15[min], se muestra en el siguiente gráfico:

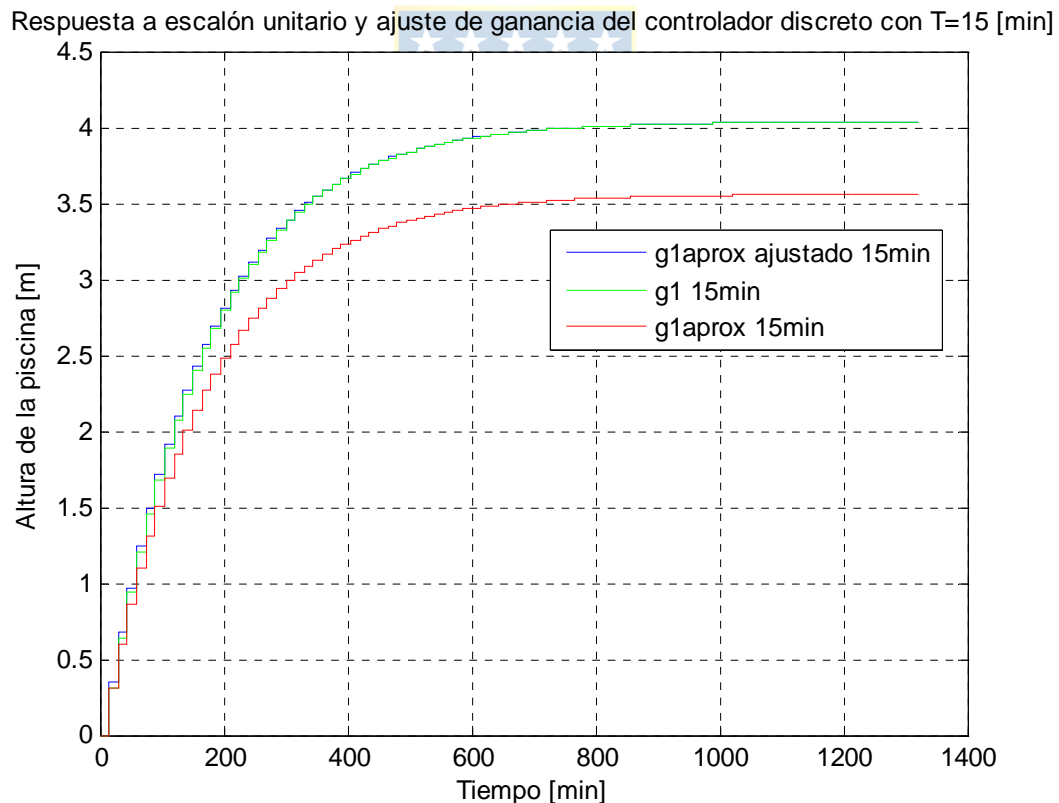


Fig. 2.5 Respuesta ante entrada escalón en L.A., para una piscina con $T = 15$ [min]

Las líneas de color azul y verde corresponden al modelo aproximado con ajuste de ganancia y al modelo real respectivamente, mientras que la línea roja corresponde al modelo aproximado sin ningún tipo de ajuste. A esto se debe que la línea azul siga a la línea verde.

Luego, se procede a explicar la obtención de las F. de T. que han sido graficadas en la Figura 2.5. A partir de [2] se obtiene la expresión mostrada en (2.57) a continuación:

$$g1_{15 \text{ min}} = \frac{0,31253 \cdot z + 0,020021}{z^2 - 0,97386 \cdot z + 0,056245} = \frac{0,31253 \cdot (z + 0,06406)}{(z - 0,9122) \cdot (z - 0,06166)} \quad (2.57)$$

Donde, mediante la cancelación polo/cero visible al factorizar la expresión mostrada en (2.57), se obtiene la expresión (2.58):

$$g1_{aprox_{15 \text{ min}}} = \frac{0,31253}{z - 0,9122} \quad (2.58)$$

Ahora bien, se procederá a definir el concepto de ganancia dc para luego explicar la obtención de las *ganancias dc* que permitan obtener (2.62), logrando así ajustar la ganancia del controlador aproximado para lograr la misma respuesta ante entrada escalón respecto de la F. de T. de la planta original.

Se define como *ganancia dc* al valor de la respuesta en estado estacionario para entrada escalón de un sistema. En un sistema discreto se determina como:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} y(kT) = \lim_{z \rightarrow 1} \frac{z-1}{z} \cdot y(z) = \lim_{z \rightarrow 1} \frac{z-1}{z} \cdot h(z) \cdot u(z) = \lim_{z \rightarrow 1} \frac{z-1}{z} \cdot h(z) \cdot \frac{z}{z-1} = \lim_{z \rightarrow 1} h(z) = h(1) \quad (2.59)$$

Luego, aplicando (2.59) a (2.57) y (2.58), se obtienen los siguientes valores de *ganancias dc*:

$$g1_{15 \text{ min}_{dc}} = \lim_{z \rightarrow 1} \frac{0,31253 \cdot z + 0,020021}{z^2 - 0,97386 \cdot z + 0,056245} = \frac{0,31253 \cdot 1 + 0,020021}{1^2 - 0,97386 \cdot 1 + 0,056245} = 4,0365 \quad (2.60)$$

$$g1_{aprox_{15 \text{ min}_{dc}} = \lim_{z \rightarrow 1} \frac{0,31253}{z - 0,9122} = \frac{0,31253}{1 - 0,9122} = 3,5596 \quad (2.61)$$

Obteniéndose finalmente la expresión para el controlador aproximado con ajuste de ganancia, dada por (2.62), tal como se muestra a continuación:

$$g_{1\text{aprox_ajustado_15min}} = \frac{\left(\frac{4,0365}{3,5596} \cdot 0,31253\right)}{z-0,9122} = \frac{0,3544}{z-0,9122} \quad (2.62)$$

Luego, la misma respuesta ante entrada escalón, pero para el sistema con $T = 1$ [min], se exhibe en el siguiente gráfico:

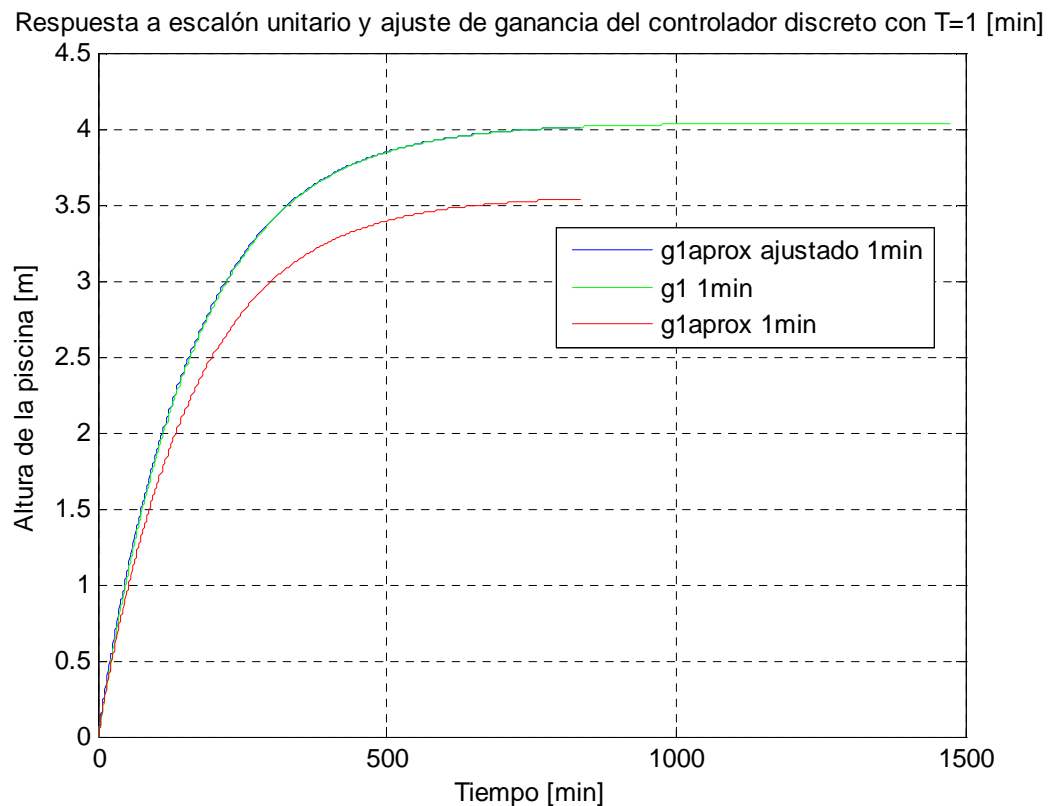


Fig. 2.6 Respuesta ante entrada escalón en L.A., para una piscina con $T = 1$ [min]

Note que al igual que en el gráfico de la Figura 2.5, las líneas de color azul y verde corresponden al modelo aproximado con ajuste de ganancia y al modelo real respectivamente, mientras que la línea roja corresponde al modelo aproximado sin ningún tipo de ajuste. Análogamente, a esto también se debe que la línea azul siga a la línea verde.

La obtención de las F. de T. graficadas en la Figura 2.6, se lleva a cabo mediante el resamdeo de las F. de T. graficas en la Figura 2.5, usando el comando “*d2d*” que ya fue explicado en el Capítulo 2 Ítem 2.2 Principios de los Canales de Regadío. Entonces, las F. de T. de la Figura 2.5 son las siguientes:

$$g1_{15 \text{ min}} = \frac{0,31253 \cdot z + 0,020021}{z^2 - 0,97386 \cdot z + 0,056245} = \frac{0,31253 \cdot (z + 0,06406)}{(z - 0,9122) \cdot (z - 0,06166)} \quad (2.63)$$

$$g1_{\text{aprox}}_{15 \text{ min}} = \frac{0,31253}{z - 0,9122} \quad (2.64)$$

$$g1_{\text{aprox}}_{\text{ajustado}}_{15 \text{ min}} = \frac{\left(\frac{4,0365}{3,5596}\right) \cdot 0,31253}{z - 0,9122} = \frac{0,3544}{z - 0,9122} \quad (2.65)$$

Y las F. de T. correspondientes a la Figura 2.6. son las siguientes:

$$g1_{1 \text{ min}} = \frac{0,01661 \cdot z - 0,01243}{z^2 - 1,824 \cdot z + 0,8254} = \frac{0,016609 \cdot (z - 0,7484)}{(z - 0,9939) \cdot (z - 0,8305)} \quad (2.66)$$

$$g1_{\text{aprox}}_{1 \text{ min}} = \frac{0,02174}{z - 0,9939} \quad (2.67)$$

$$g1_{\text{aprox}}_{\text{ajustado}}_{1 \text{ min}} = \frac{\left(\frac{4,0365}{3,5596}\right) \cdot 0,02174}{z - 0,9939} = \frac{0,02465}{z - 0,9939} \quad (2.68)$$

Finalmente, la gráfica obtenida para una piscina operando en L.C., tanto para $T = 15[\text{min}]$ como para $T = 1[\text{min}]$, se muestra a continuación:

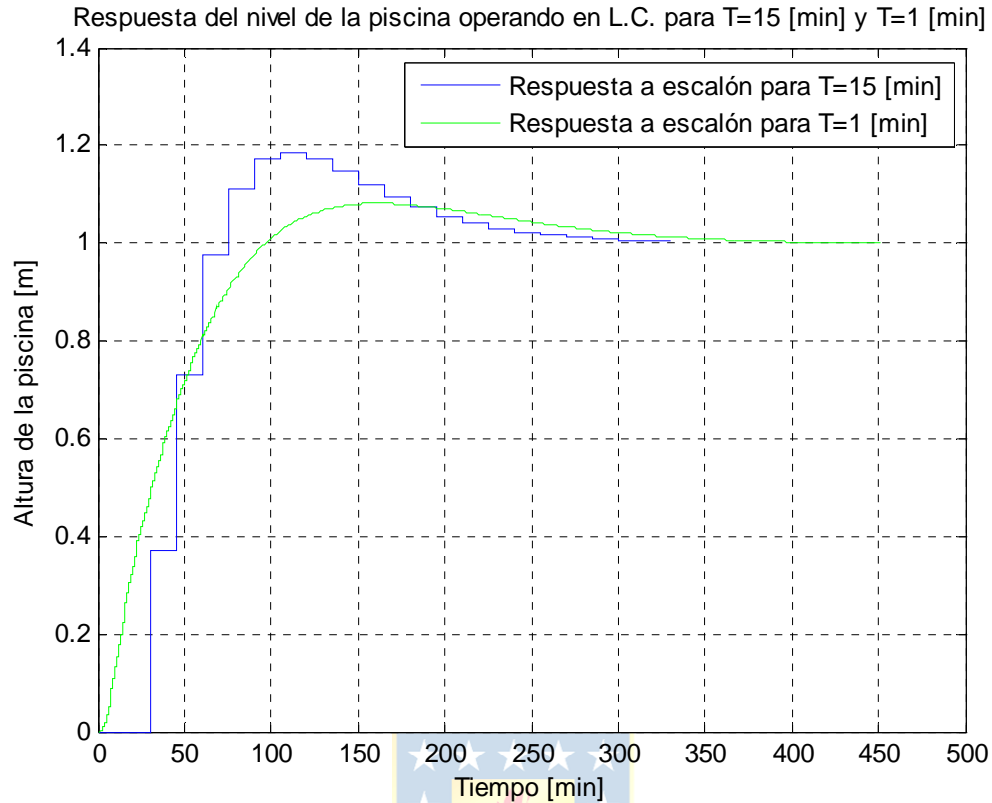


Fig. 2.7 Respuesta ante entrada escalón en L.C., para dos piscinas, una con $T = 15$ [min] y otra con $T = 1$ [min]

En el gráfico de la Figura 2.6, cabe destacar que el sistema con $T = 1$ [min] logra seguir a la perfección al sistema con $T = 15$ [min], que corresponde al sistema original proveniente de [2]. Además, efectivamente el sistema logra una respuesta estable debido al diseño antes mostrado para el controlador con $T = 15$ [min], en donde, cabe destacar, que para obtener el controlador discreto equivalente para $T = 1$ [min], basta con utilizar el comando “*d2d*” de Matlab® tal como ha sido explicado anteriormente en el Capítulo 2.2.

2.4. Principios de los canales de comunicación

Se denomina canal de comunicación al medio por el cual viajan las señales portadoras de la información entre el emisor y el receptor [8]. En la presente memoria de título, se emplearán cuatro modelos de canales de comunicación (AWGN, con retardo de transmisión, con pérdida de paquetes y de ganancia variable), en sus versiones simplificadas, para modelar la presencia de ruido, entre

otros efectos de comunicación de datos, en la transmisión de información sensor – controlador, controlador – actuador, actuador – sensor y sus transmisiones recíprocas.

Cabe destacar que el ruido de comunicación presente en todos los efectos a analizar es el AWGN, debido a que las señales presentes en la naturaleza son esencialmente en banda base o pasa bajos (voz, audio, video, datos, señales de transductores). Es decir, se trata de señales cuyo espectro se extiende a partir de cero (o cercano a cero) hasta un valor finito, usualmente menor que algunos megahertz.

En resumen, la principal idea de añadir canales de comunicación en los lazos cerrados de control consiste en representar los efectos que se van a producir en el control de nivel y flujo del agua en cada una de las 5 piscinas que componen el canal de regadío, debido a que la información entre las diversas partes que componen el sistema de control será transmitida de manera inalámbrica y viajará grandes distancias. En este trabajo, la distancia antes mencionada es entre compuertas, debido a que, por ejemplo, en una compuerta habrá un controlador y en la compuerta siguiente habrá un sensor de nivel asociado a la planta.

2.4.1 Canal de comunicación AWGN

Debido a que el modelo matemático de canal de comunicación más utilizado en la presente memoria de título es el canal con ruido aditivo, se presentará a continuación su modelo matemático. En este modelo, la señal transmitida $s(t)$ es corrompida por el proceso aleatorio de ruido aditivo $n(t)$. Físicamente, el proceso de ruido aditivo proviene de los componentes electrónicos en el sistema de comunicaciones o por interferencias encontradas durante la transmisión.

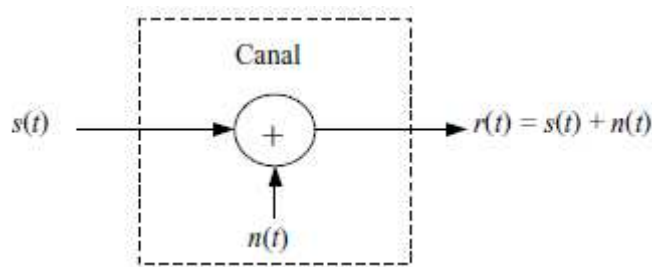


Fig. 2.8 Canal de comunicación con ruido aditivo, [10]

Si el ruido es principalmente introducido por los componentes electrónicos, entonces éste puede clasificarse como ruido térmico caracterizado estadísticamente como un *Proceso Gaussiano*.

Este es el modelo predominante en los sistemas de comunicaciones y se le conoce como *Canal Aditivo Gaussiano*. Note que a partir de la Figura 2.8 se deduce que:

$$r(t) = s(t) + n(t) \quad (2.69)$$

Donde:

- $r(t)$: Señal recibida
 $s(t)$: Señal transmitida
 $n(t)$: Ruido del canal

Y su modelo aproximado en Simulink (aproximación válida también para un canal de comunicación AWGN en la presente memoria de título), corresponde al siguiente:

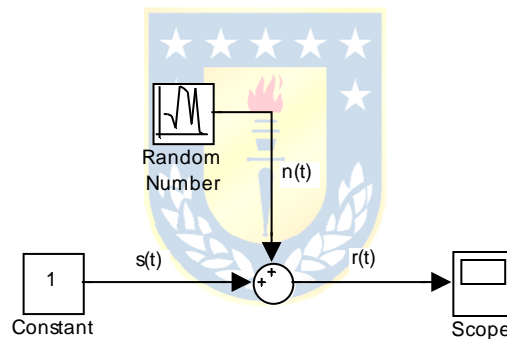


Fig. 2.9 Modelo Simulink aproximado para un canal de comunicación AWGN

En cuyo modelo, el bloque “*Constant*” genera un valor constante a lo largo del tiempo, dado por “1” en este caso. El bloque “*Random Number*” lo que hace es generar una señal aleatoria distribuida normalmente (Gaussiana), la cual se repite para un valor de semilla (“*Seed*”) dado. El tiempo de muestreo por defecto para este bloque es de 0,1 unidades de tiempo.

Adicionalmente, al ser el modelo aproximado de un canal de comunicación AWGN, dado por el bloque Simulink “*Random Number*”, un modelo eminentemente discreto y, el controlador y la planta modelos continuos, se estaría en presencia de un sistema híbrido, lo cual, en estricto rigor, es cierto. Sin embargo, para efectos de simulación en Simulink, no es necesario considerar al sistema como híbrido, puesto que en el ambiente de simulación el sistema es considerado de tiempo

discreto, con un tiempo de muestreo dado por la componente discreta que posea el menor tiempo de muestreo, en cuyo caso corresponde al bloque “*Random Number*” con un tiempo de muestreo de 0,1[*min*].

2.4.2 Canal de comunicación con retardo de transmisión

En caso de estar en presencia de un retardo en la transmisión, la expresión (2.69) se modifica quedando como sigue:

$$r(t) = s(t - \tau_c) + n(t) \quad (2.70)$$

Donde:

- $r(t)$: Señal recibida
- $s(t)$: Señal transmitida
- $n(t)$: Ruido del canal
- τ_c : Tiempo de retardo del canal



Y el modelo aproximado en Simulink para el retardo en la comunicación, se muestra en el siguiente diagrama:

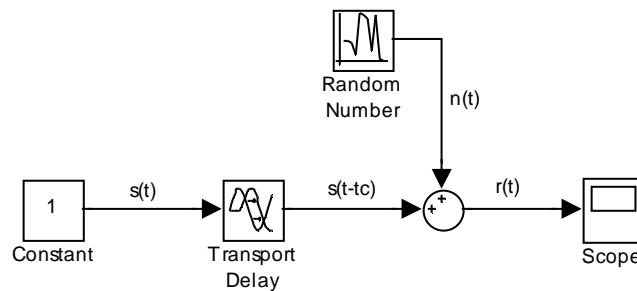


Fig. 2.10 Modelo Simulink aproximado para un canal de comunicación con retardo

En donde, el bloque “*Transport Delay*” corresponde al modelado del fenómeno de retardo en un canal de comunicación AWGN, aproximado en este caso y tal como el mostrado en la Figura 2.9.

2.4.3 Canal de comunicación con pérdida de paquetes

Ahora, si se trata de un fenómeno de pérdida de paquetes de información, lo cual ocurre cuando al transmitir la información, se involucran protocolos TCP/IP y, en cuyo caso la señal transmitida es dividida en paquetes de información que son transmitidos a través de una red que, posiblemente, podría ser poco fiable. Esta falta de fiabilidad es modelada como una probabilidad α de perder un paquete de información. Pues bien, a modo de simplificación, se considera a un paquete de información como el valor de la señal a ser transmitida en el instante de tiempo “ kT ” y, por lo tanto, el modelo del canal se define como:

$$\tilde{s}(t) = \begin{cases} s(t) & \text{con probabilidad } 1-\alpha \\ 0 & \text{con probabilidad } \alpha \end{cases} \quad (2.71)$$



Donde:

- $r(t)$: Señal recibida
- $s(t)$: Señal transmitida
- $\tilde{s}(t)$: Señal que efectivamente es transmitida en el instante de tiempo “ kT ”
- $n(t)$: Ruido del canal
- α : Probabilidad de perder un paquete de información

Además, se cumple que:

$$r(t) = \tilde{s}(t) + n(t) \quad (2.72)$$

Luego, el modelo aproximado en Simulink, para un canal de comunicación con pérdida de paquetes, se presenta a continuación:

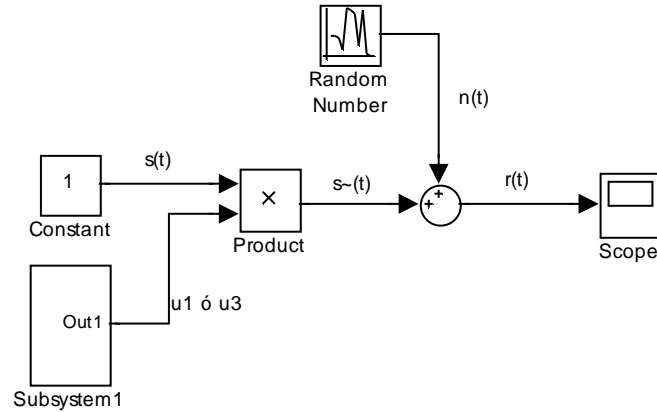


Fig. 2.11 Modelo Simulink aproximado para un canal de comunicación con pérdida de paquetes

En el cual, el bloque “*Subsystem1*”, corresponde al diagrama presentado a continuación:

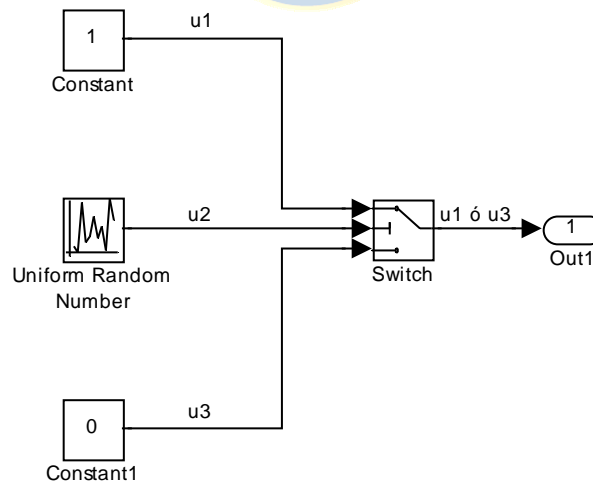


Fig. 2.12 Modelo del bloque de subsistema para el caso de un canal de comunicación con pérdida de paquetes

Donde el bloque “*Uniform Random Number*” genera una señal aleatoria uniformemente distribuida entre un valor mínimo y máximo, repitiéndose para un valor de semilla (“*Seed*”) dado. El tiempo de muestreo por defecto para este bloque es de 0,1 unidades de tiempo. El bloque “*Product*”, presente en la Figura 2.11, multiplica las dos entradas elemento a elemento cada 0,1 unidades de tiempo en este caso. Entonces, si el bloque “*Subsystem1*” arroja un valor 0 ($Threshold = \alpha = 1$), hay pérdida de paquete. Por el contrario, si el bloque “*Subsystem1*” arroja un valor 1 ($Threshold = \alpha = 0$), entonces no hay pérdida de paquete.

En tanto, el bloque “*Switch*”, compuesto por tres entradas y una salida, deja pasar el valor de la primera entrada si la segunda entrada satisface el criterio seleccionado y, si la segunda entrada no satisface el criterio seleccionado, entonces deja pasar el valor de la tercera entrada. En estas entradas, numeradas de arriba a abajo, la primera y tercera entradas son de ingreso de datos, mientras que la segunda entrada corresponde al puerto de control.

Ahora bien, el criterio seleccionado para este trabajo y, que viene por defecto en este bloque de Simulink, es el siguiente:

$$u2 \geq \alpha$$

(2.73)



Donde:

$u2$: Segunda entrada del bloque “*Switch*”

α : Valor de umbral escogido por el usuario ($0 \leq \alpha \leq 1$ para este trabajo)

2.4.4 Canal de comunicación de ganancia variable

Finalmente, si se considera un canal de comunicación con ganancia variable (un ejemplo más concreto es el de transmitir la señal desde una antena de telefonía celular, hasta un celular de un cliente de telefonía móvil en particular, o bien transmisiones inalámbricas en general), es posible modelarlo como sigue:

$$r(t) = \kappa \cdot s(t) + n(t)$$

(2.74)

Donde:

- $r(t)$: Señal recibida
 $s(t)$: Señal transmitida
 $n(t)$: Ruido del canal
 κ : Ganancia variable del canal, que por lo general es representada por un proceso estocástico

Cabe destacar que la variable de ruido mostrada en (2.70) y (2.74) es usualmente asumida como un proceso i.i.d., Gaussiano, blanco y de media cero.

Luego, el modelo aproximado para un canal de comunicación con ganancia variable, se presenta a continuación:

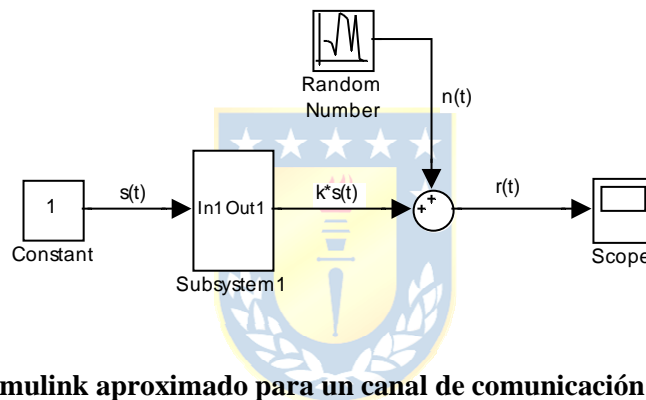


Fig. 2.13 Modelo Simulink aproximado para un canal de comunicación de ganancia variable

En el cual, el bloque “*Subsystem1*”, corresponde al diagrama que se presenta a continuación:

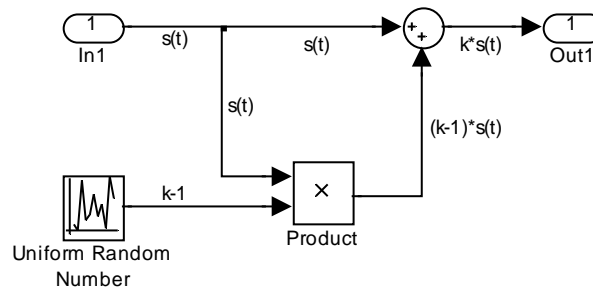


Fig. 2.14 Modelo del bloque de subsistema para el caso de un canal de comunicación de ganancia variable

Donde el bloque “*Uniform Random Number*”, al igual que en el caso de pérdida de paquetes, genera una señal aleatoria uniformemente distribuida entre un valor mínimo y máximo, repitiéndose para un valor de semilla (“*Seed*”) dado. El tiempo de muestreo por defecto para este bloque es también de 0,1 unidades de tiempo. Análogamente, el bloque “*Product*”, presente en la Figura 2.14, multiplica las dos entradas elemento a elemento cada 0,1 unidades de tiempo en este caso.

2.4.5 SNR de un canal de comunicación

Adicionalmente, otro concepto importante para el análisis de canales de comunicación es la razón señal a ruido, cuya relación matemática aproximada, de acuerdo con [6], para los modelos de canal de comunicación mostrados en (2.70) y (2.74), viene dada por:

$$SNR = \frac{Var(s(t))}{Var(n(t))} \quad (2.75)$$

Donde:

- $r(t)$: Señal recibida
- $s(t)$: Señal transmitida
- $n(t)$: Ruido del canal



Pues bien, para el caso del modelamiento de la pérdida de paquetes, exhibido en (2.71), debido a la falta de una señal de ruido que acaba de ser considerada, la SNR se calcula aproximadamente como sigue:

$$SNR = Var(s(t)) \quad (2.76)$$

Al respecto, cuando se habla de SNR, se hace referencia a la razón entre la potencia de la señal y la potencia del ruido. Otra definición posible para SNR es el margen que hay entre la potencia de la señal que se transmite y la potencia del ruido que la corrompe.

Para justificar la aproximación de carácter numérico expuesta en (2.75), se recurrirá a [6]. Dicha referencia plantea el problema de la estabilización de diversas plantas mediante el uso sobre un canal de comunicación con ruido a medida que transcurre el tiempo. Dicho esto, considere una planta con F. de T. dada por $G(s)$ y con las siguientes ecuaciones de estado:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A \cdot x(t) + B \cdot r(t) \\ y(t) &= C \cdot x(t) \end{aligned} \quad (2.77)$$

Donde:

$x \in R^n$, $r \in R$, $y \in R$ y las matrices (A, B, C) se asumen de realización mínima. Además, se asume un canal de ancho de banda infinito AWGN con la siguiente relación entrada-salida:

$$r(t) = s(t) + n(t), \quad t \geq 0, \quad t \in R \quad (2.78)$$



Donde:

- $r(t)$: Señal recibida
- $s(t)$: Señal transmitida
- $n(t)$: Ruido del canal (de media cero, Gaussiano, blanco y con densidad espectral de potencia Φ en este caso en particular)

Lo antes expuesto se limita a los casos en que se estabiliza el sistema de información global, de tal manera que para cualesquier distribución de las condiciones iniciales, la distribución de todas las señales converge exponencialmente a una distribución estacionaria.

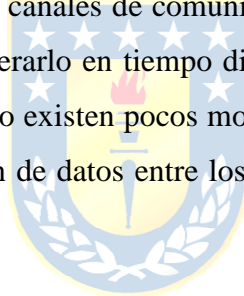
Antes de culminar este capítulo, hay que recalcar que la SNR, en los Capítulos 4 y 5, será calculada en [dB] a través de la siguiente relación:

$$SNR[dB] = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{Var(s(t))}{Var(n(t))} \right) \quad (2.79)$$

En la cual el logaritmo en base 10 se pondera en un factor de 10, debido a que las varianzas involucradas, son las desviaciones estándares de los datos capturados, al cuadrado.

En lo que respecta a la ubicación de los canales de comunicación, se denominará canal de tipo CG a aquél canal que esté situado entre el controlador y la planta, del mismo modo, se denominará canal de tipo GC a aquél canal que esté situado entre la planta y el controlador. Además, las ubicaciones de los canales de comunicación serán todas similares, es decir, para múltiples lazos de control (como se verá en el Capítulo 4 y en el Capítulo 5), los canales de comunicación estarán todos ubicados CG, o todos ubicados GC.

A modo de cierre de este capítulo, en los Capítulos 4 y 5 se verá que el análisis de efectos producidos, producto de la presencia de canales de comunicación, en un sistema de control para un canal de riego, es más natural considerarlo en tiempo discreto que en tiempo continuo, debido a que para los sistemas en tiempo continuo existen pocos modelos, y además engorrosos, que reflejen los efectos producidos en la transmisión de datos entre los elementos que componen dicho sistema de control.



Capítulo 3. Lazos cerrados de control en tiempo continuo y discreto

3.1. Introducción

El propósito de este capítulo es presentar el análisis de control en tiempo continuo y discreto. Así, se tratará de hacer entender al lector los fenómenos que suceden en ambos casos.

3.2. Simulaciones y análisis de los lazos cerrados de control en tiempo continuo

El Modelo Simulink en tiempo continuo para 5 piscinas es:

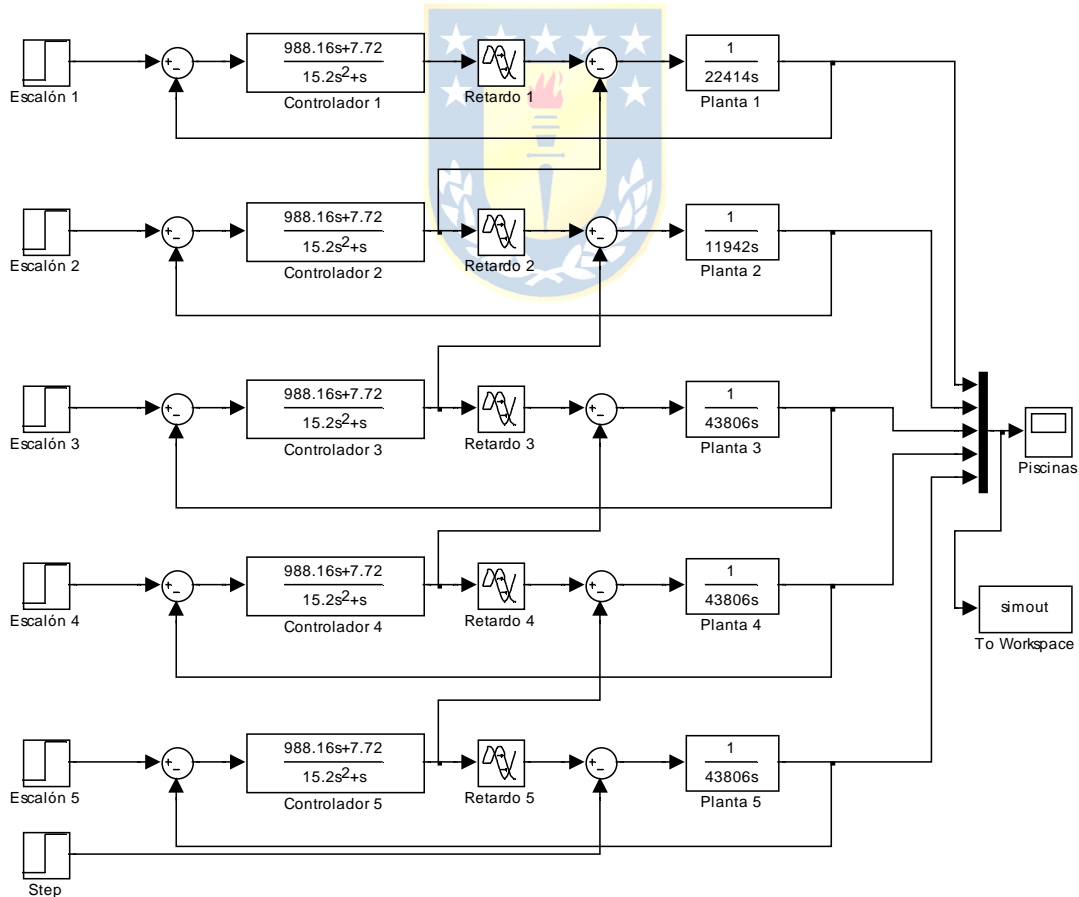


Fig. 3.1 Modelo Simulink del sistema de control en tiempo continuo para 5 piscinas
Cuya simulación para un tiempo de 1000[min], se muestra a continuación:

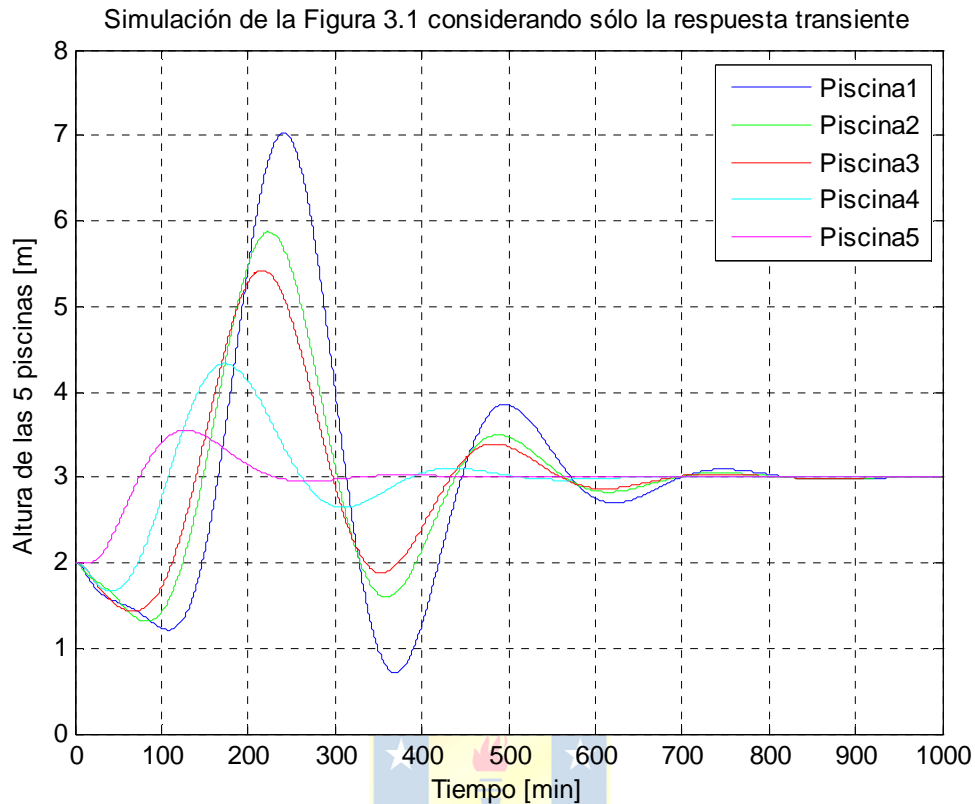


Fig. 3.2 Simulación resultante del Modelo Simulink de la Figura 3.1 considerando sólo la respuesta transiente

En la simulación obtenida, es posible apreciar la correcta estabilización del sistema en todas sus piscinas. Donde cabe destacar que la curva más oscilante corresponde al nivel de la piscina 1, en tanto que la curva menos oscilante corresponde al nivel de la piscina 5.

3.3. Inestabilidad de cuerda en tiempo continuo

Además, cabe destacar que en la gráfica mostrada aparece el denominado efecto de *inestabilidad de cuerda*, el cual consiste en la aparición de valores peaks en las gráficas cada vez más elevados hasta llegar a la primera piscina del lazo de control, donde se presenta el valor peak más alto.

Luego, simulando el mismo Modelo Simulink, pero sólo considerando una perturbación en el nivel de 500[m] a los 1500[min], se obtiene la siguiente respuesta:

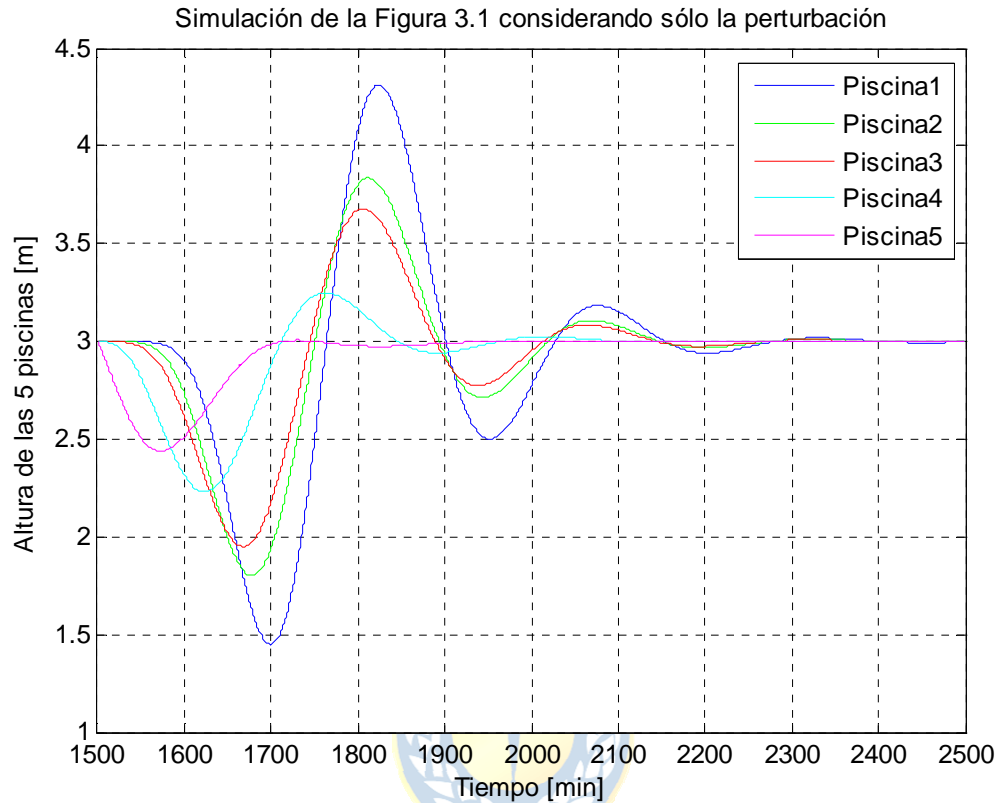


Fig. 3.3 Simulación resultante del Modelo Simulink de la Figura 3.1 considerando sólo la perturbación

En cuya simulación también se aprecia la aparición del efecto de *inestabilidad de cuerda* debido a la presencia de la perturbación.

3.4. Simulaciones y análisis de los lazos cerrados de control en tiempo discreto

Teniendo en cuenta la información anterior, el modelo en tiempo discreto para 5 piscinas, con un tiempo de muestreo de 15[min], se aprecia en el siguiente diagrama Simulink:

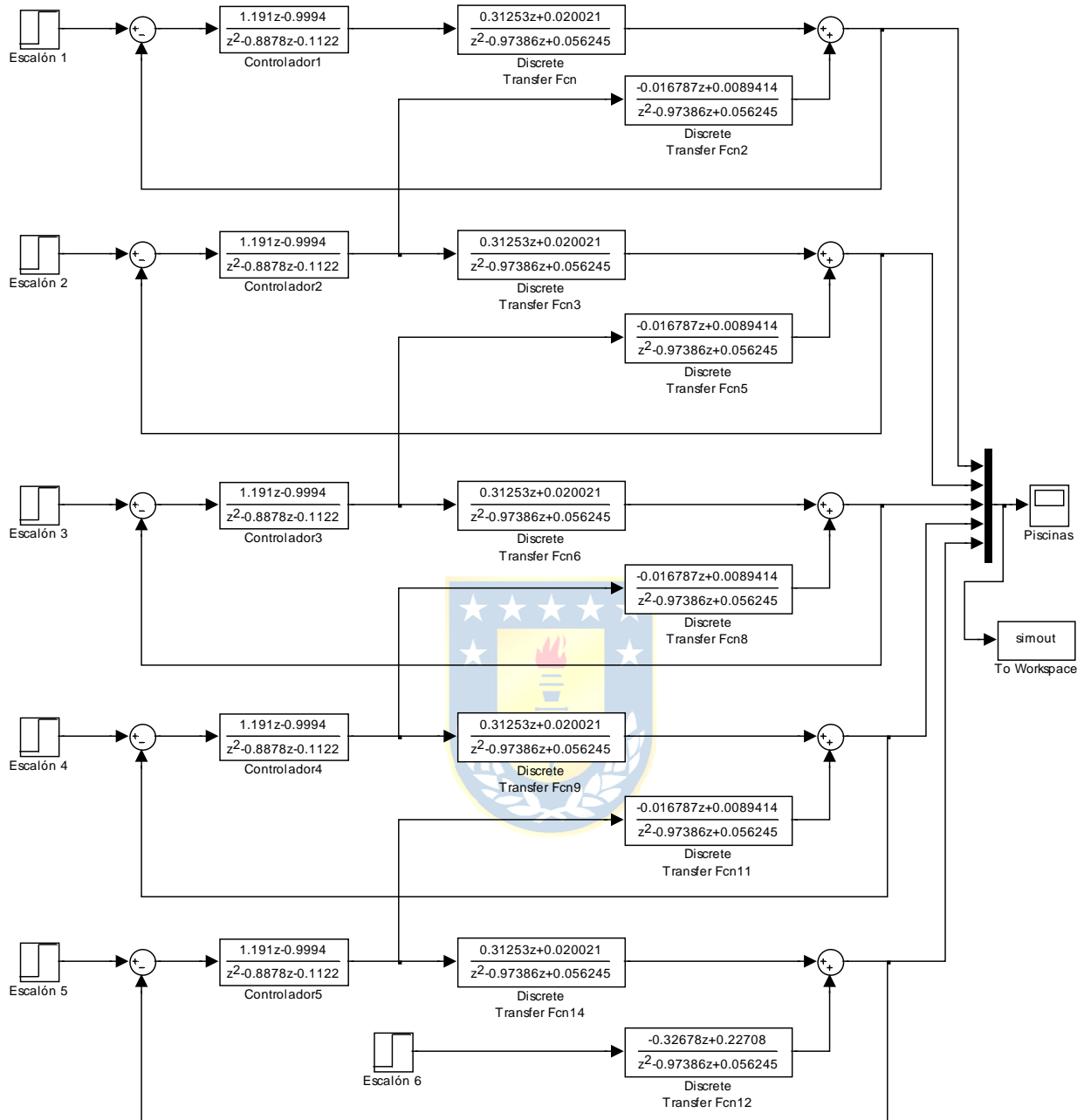


Fig. 3.4 Modelo Simulink del sistema de control en tiempo discreto para 5 piscinas con un tiempo de muestreo de 15[*min*]

La simulación para un tiempo de 600[min], se muestra a continuación:

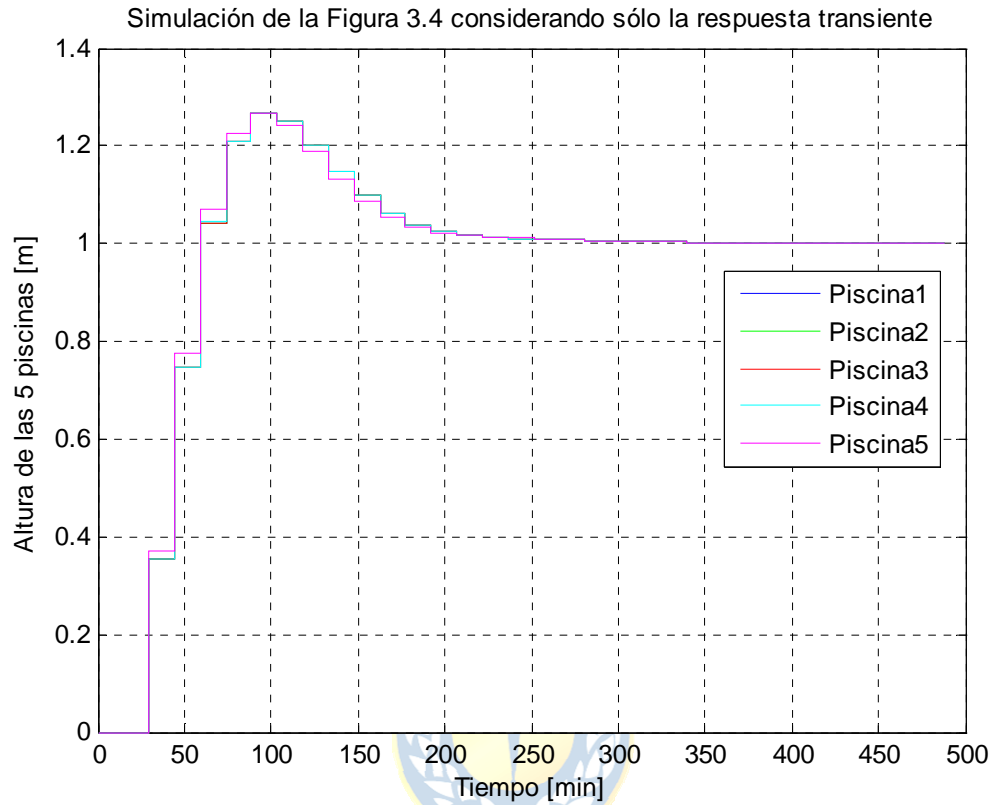


Fig. 3.5 Simulación resultante del Modelo Simulink de la Figura 3.4 considerando sólo la respuesta transiente

En esta gráfica se aprecia que no se cumple el efecto de inestabilidad de cuerda, lo cual será explicado con detalle en el Capítulo 3.4.

Luego, simulando el mismo Modelo Simulink, pero sólo considerando una perturbación en el nivel de 0,3[m] a los 600[min], se obtiene la siguiente respuesta:

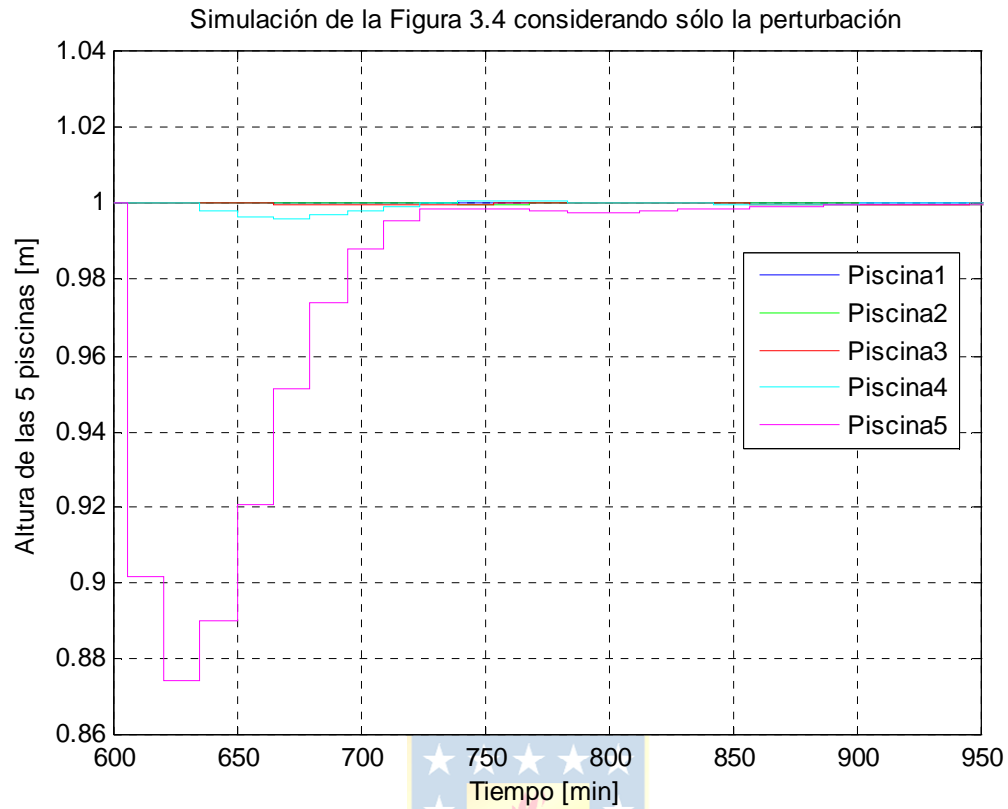


Fig. 3.6 Simulación resultante del Modelo Simulink de la Figura 3.4 considerando sólo la perturbación

En esta simulación tampoco aparece el efecto de *inestabilidad de cuerda* debido a la presencia de la perturbación, lo cual también será explicado más adelante en el Capítulo 3.4.

Ahora, el modelo en tiempo discreto para 5 piscinas, con un tiempo de muestreo de 1[*min*], se aprecia en el siguiente diagrama Simulink:

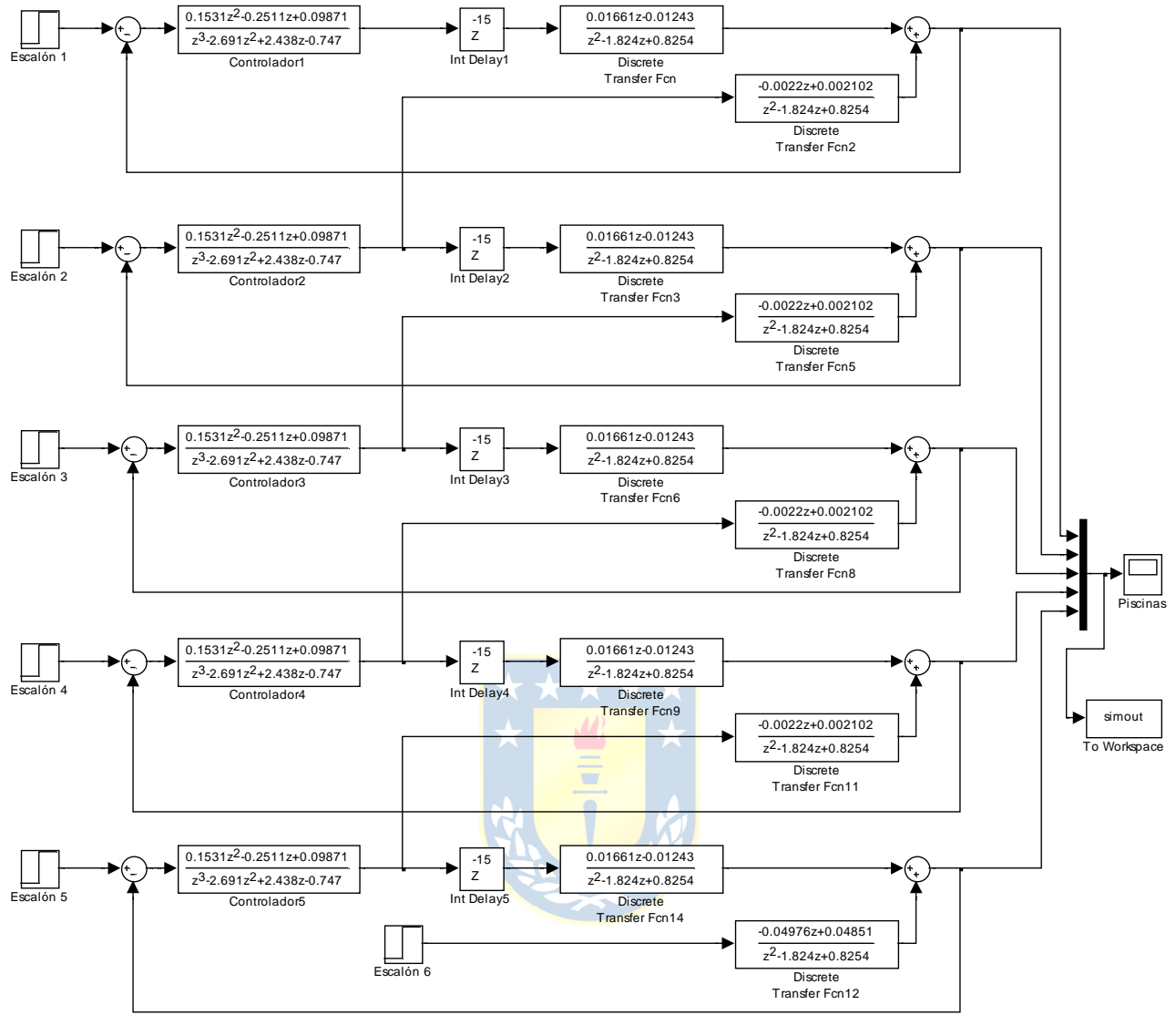


Fig. 3.7 Modelo Simulink del sistema de control en tiempo discreto para 5 piscinas con un tiempo de muestreo de 1[*min*]

La simulación para un tiempo de 400[*min*], se muestra a continuación:

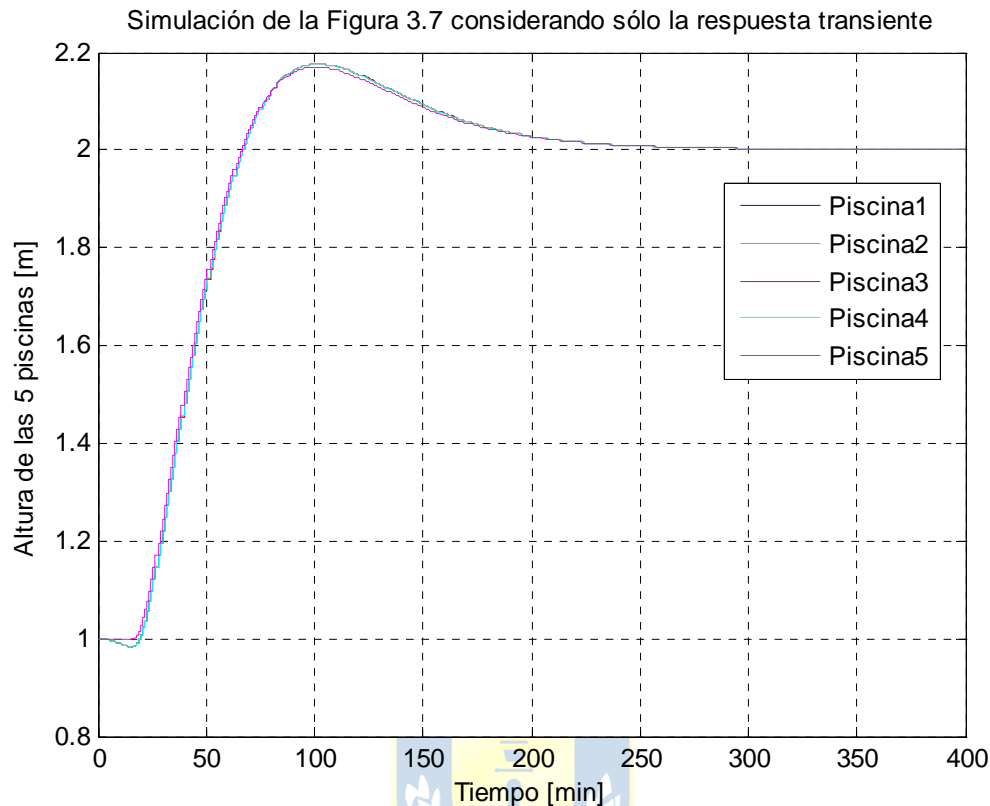


Fig. 3.8 Simulación resultante del Modelo Simulink de la Figura 3.7 considerando sólo la respuesta transiente

En esta simulación se aprecia un buen desempeño del sistema en tiempo discreto para un tiempo de muestreo de 1[*min*], puesto que se logra el principal objetivo consistente en la tan anhelada estabilidad. Cabe destacar que no se aprecia el efecto de *inestabilidad de cuerda* en tiempo discreto, debido a que la salida del controlador de la piscina siguiente se ramifica hacia dos F. de T. distintas. Ahora, si esas F. de T. fueran iguales, efectivamente se produciría el efecto de *inestabilidad de cuerda* en tiempo discreto. Esta última conclusión será abordada con mayor nivel de detalle en el Capítulo 3.4.

Luego, simulando el mismo Modelo Simulink, pero sólo considerando una perturbación en el nivel de 0,3[m] a los 600[*min*], se obtiene la siguiente respuesta:

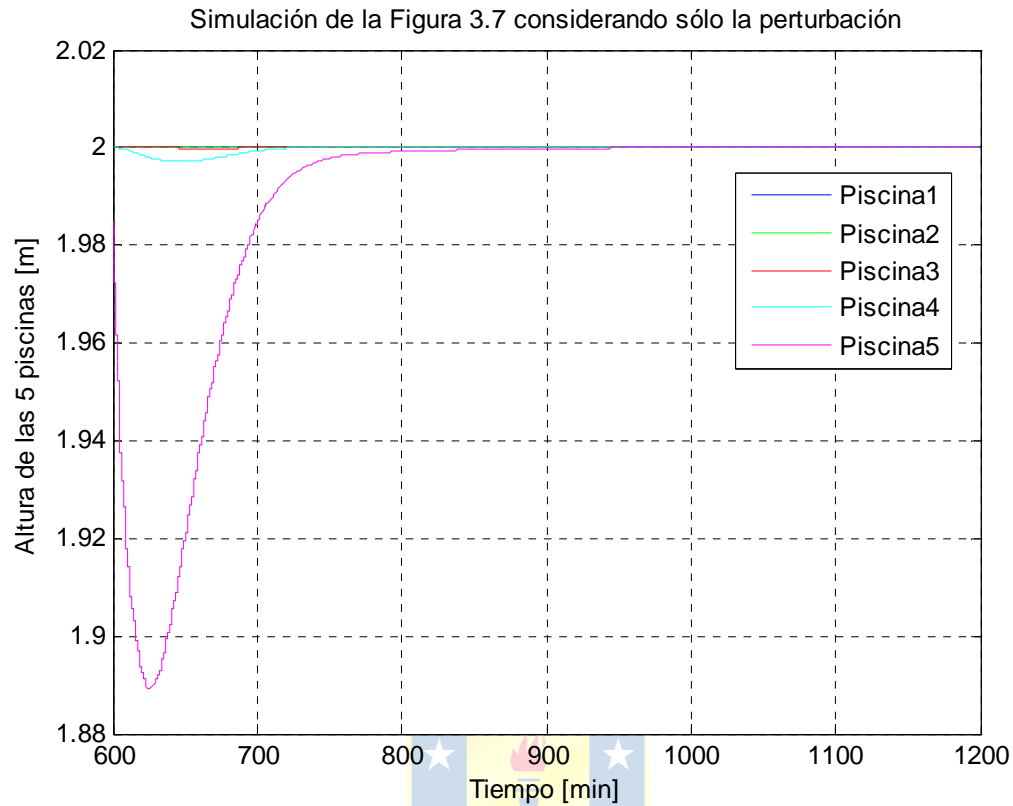


Fig. 3.9 Simulación resultante del Modelo Simulink de la Figura 3.7 considerando sólo la perturbación

En esta simulación, al igual que para un tiempo de muestreo de 15[min], tampoco aparece el efecto de *inestabilidad de cuerda* debido a la presencia de la perturbación, lo cual será explicado más adelante en el Capítulo 3.4.

3.5. Inestabilidad de cuerda en tiempo discreto

En los modelos actuales para el caso discreto, no se da el efecto de *inestabilidad de cuerda*, debido al diseño del modelo en Simulink. En virtud de esto, se demostrará que, haciendo un reemplazo en las cinco piscinas, que constituyen los modelos para un tiempo de muestreo de 15[min], se obtendrán modelos que exhibirán el fenómeno de *inestabilidad de cuerda*. Entonces, el reemplazo a realizar en todos los bloques Simulink, que corresponden a las 5 piscinas, es el siguiente:

$$\frac{-0.016787z+0.0089414}{z^2-0.97386z+0.056245} \quad \text{por} \quad \frac{0.31253z+0.020021}{z^2-0.97386z+0.056245}$$

Fig. 3.10 Reemplazo a realizar en las 5 piscinas cuyo tiempo de muestreo es de 15[min], para que haya *inestabilidad de cuerda en tiempo discreto*

Una vez realizado el reemplazo, se procede a exhibir el Modelo Simulink resultante para su posterior simulación.



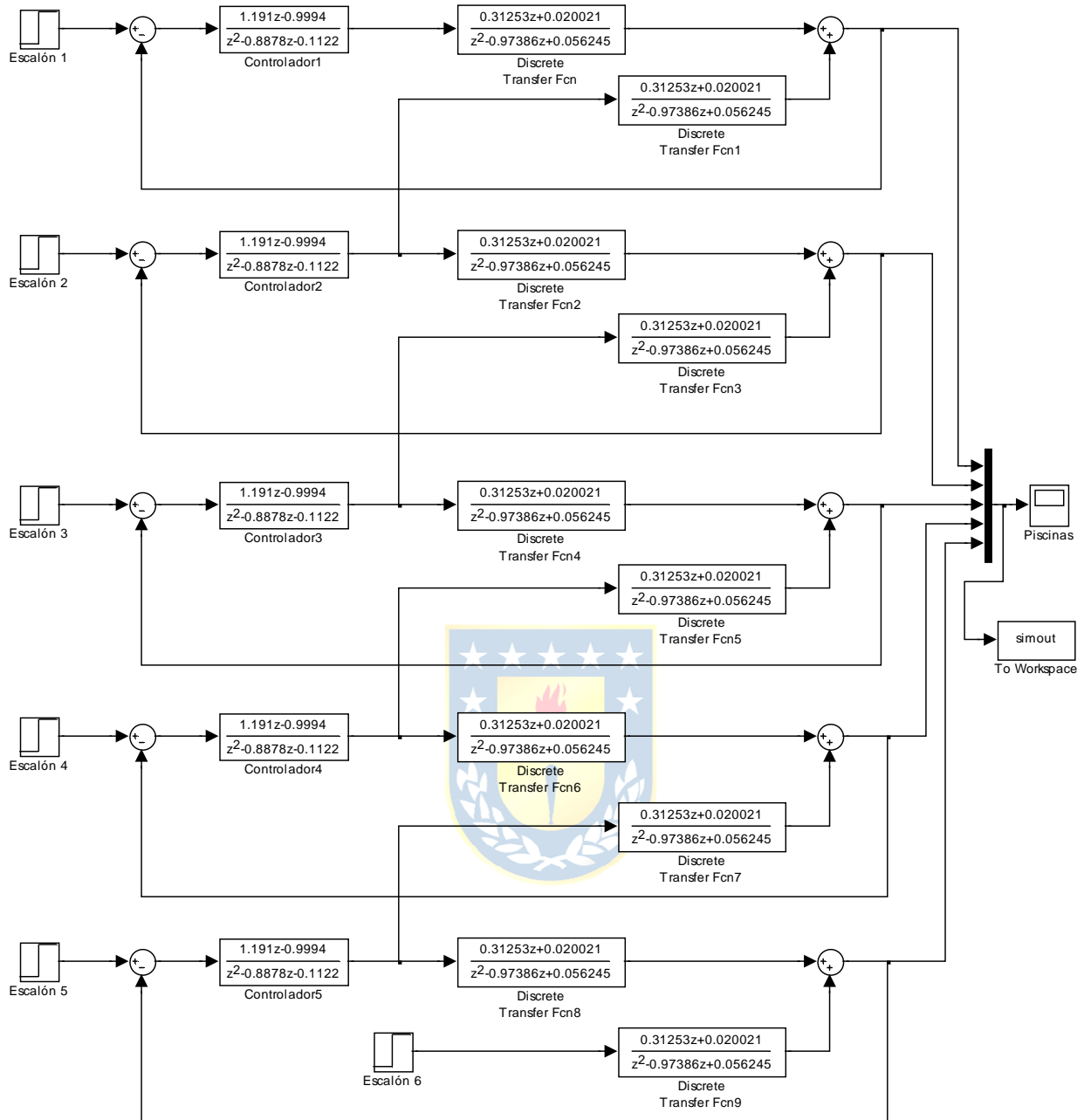


Fig. 3.11 Modelo Simulink del sistema de control en tiempo discreto para 5 piscinas con un tiempo de muestreo de 15[*min*] y que cumple con la *inestabilidad de cuerda*

La simulación para un tiempo de 600[*min*], es la siguiente:

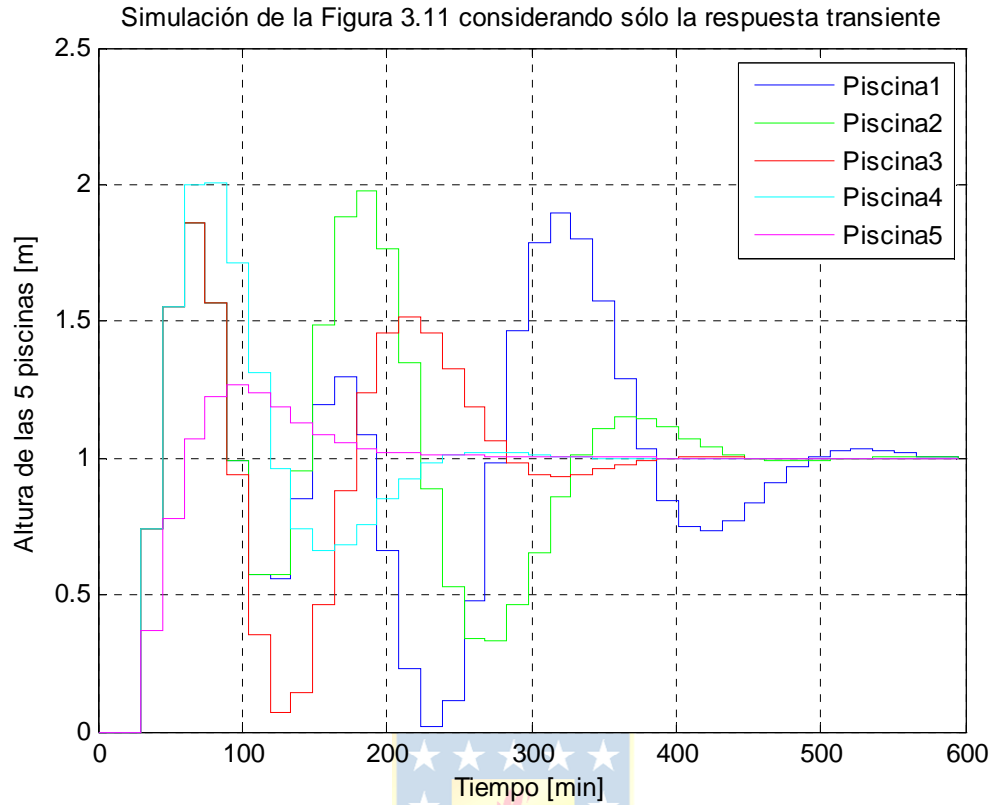


Fig. 3.12 Simulación resultante del Modelo Simulink de la Figura 3.11 considerando sólo la respuesta transiente

Ahora, considerando sólo la perturbación en el nivel de 0,3[m] en el instante de tiempo 1005[min], se obtiene el siguiente resultado:

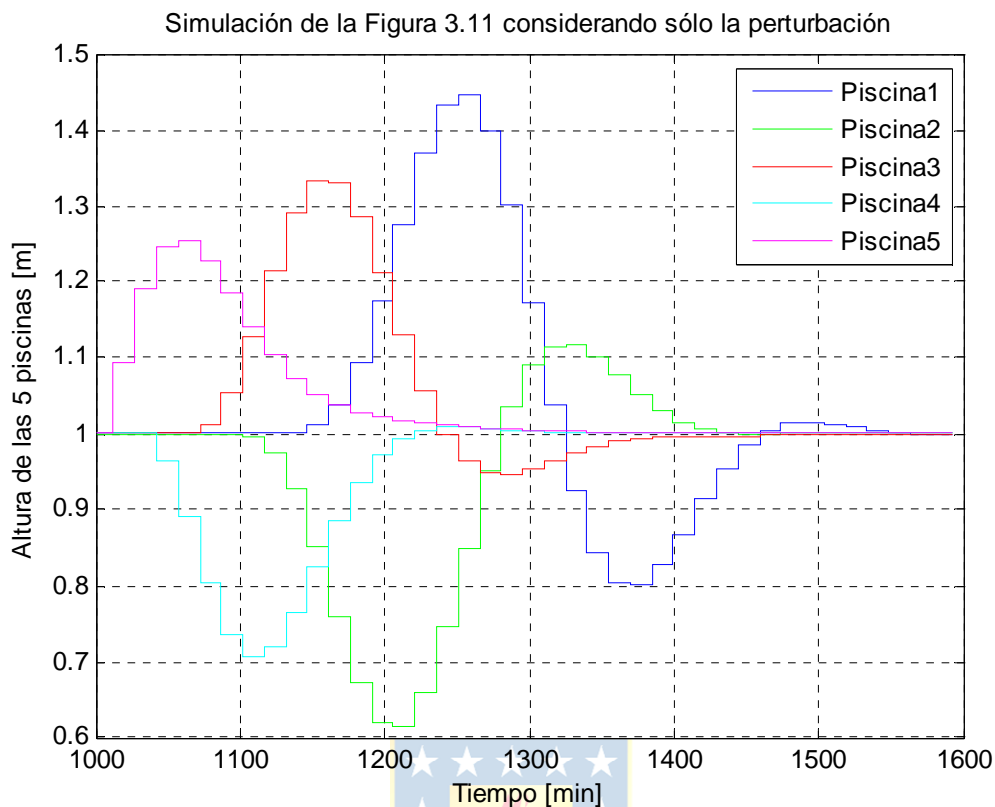


Fig. 3.13 Simulación resultante del Modelo Simulink de la Figura 3.11 considerando sólo la perturbación

Al igual que en el caso donde no es considerada la presencia de perturbación, se cumple el efecto de *inestabilidad de cuerda*.

Para el caso de un tiempo de muestreo de 1[*min*], se procede a hacer un reemplazo similar al caso cuyo tiempo de muestreo es de 15[*min*], en las 5 piscinas, para lograr la *inestabilidad de cuerda*, dicho reemplazo corresponde al mostrado en la Figura 3.4.

$$\frac{-0.0022z+0.002102}{z^2-1.824z+0.8254} \quad \text{por} \quad \frac{0.01661z-0.01243}{z^2-1.824z+0.8254}$$

Fig. 3.14 Reemplazo a realizar en las 5 piscinas cuyo tiempo de muestreo es de 1[*min*], para que haya *inestabilidad de cuerda* en tiempo discreto

Luego, el modelo que exhibe el fenómeno de *inestabilidad de cuerda*, en tiempo discreto, para 5 piscinas y con un tiempo de muestreo de 1[*min*], se aprecia en el siguiente diagrama Simulink:

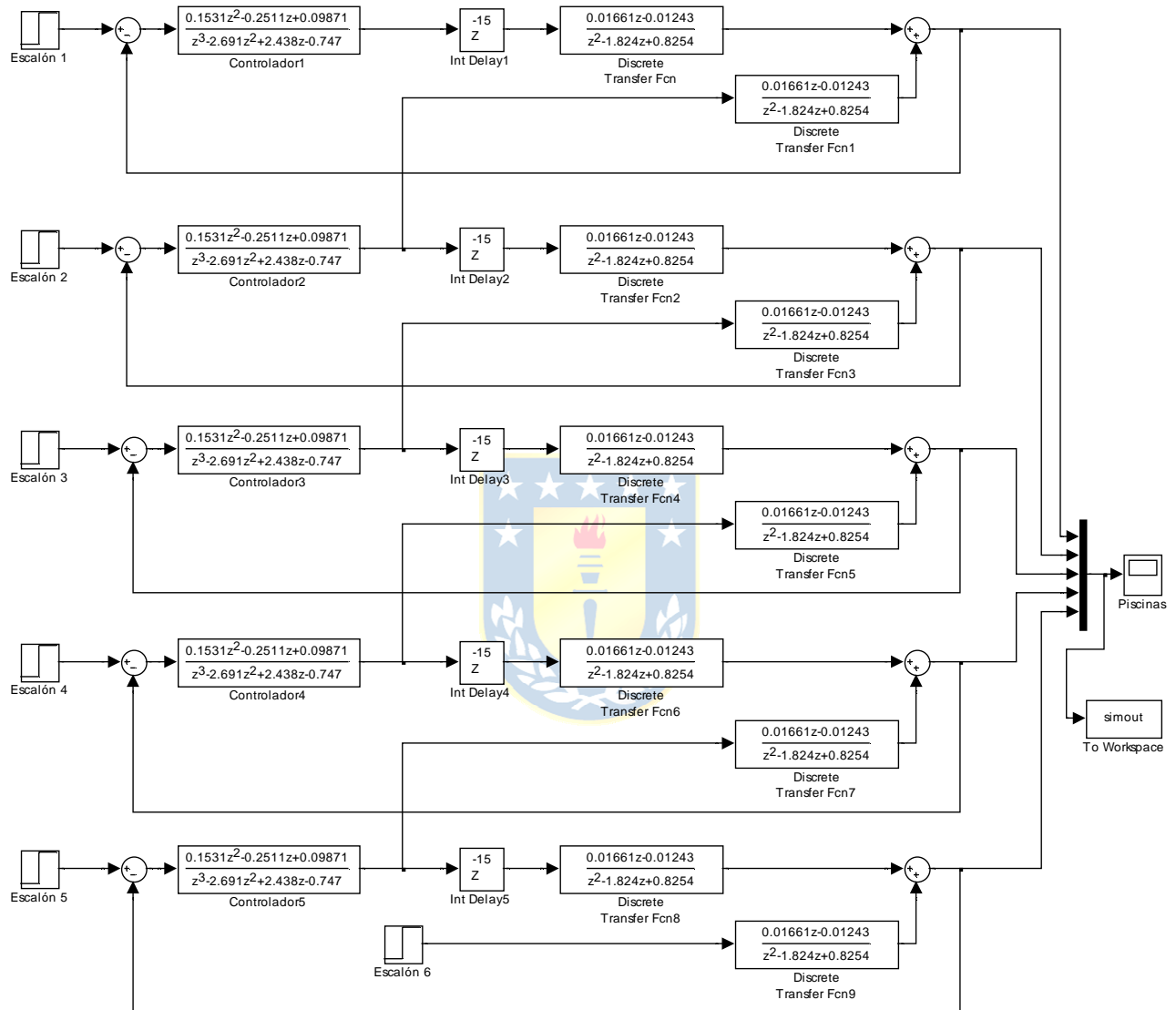


Fig. 3.15 Modelo Simulink del sistema de control en tiempo discreto para 5 piscinas con un tiempo de muestreo de 1[*min*] y que cumple con la *inestabilidad de cuerda*

Cuya simulación para un tiempo de 600[min], es la siguiente:

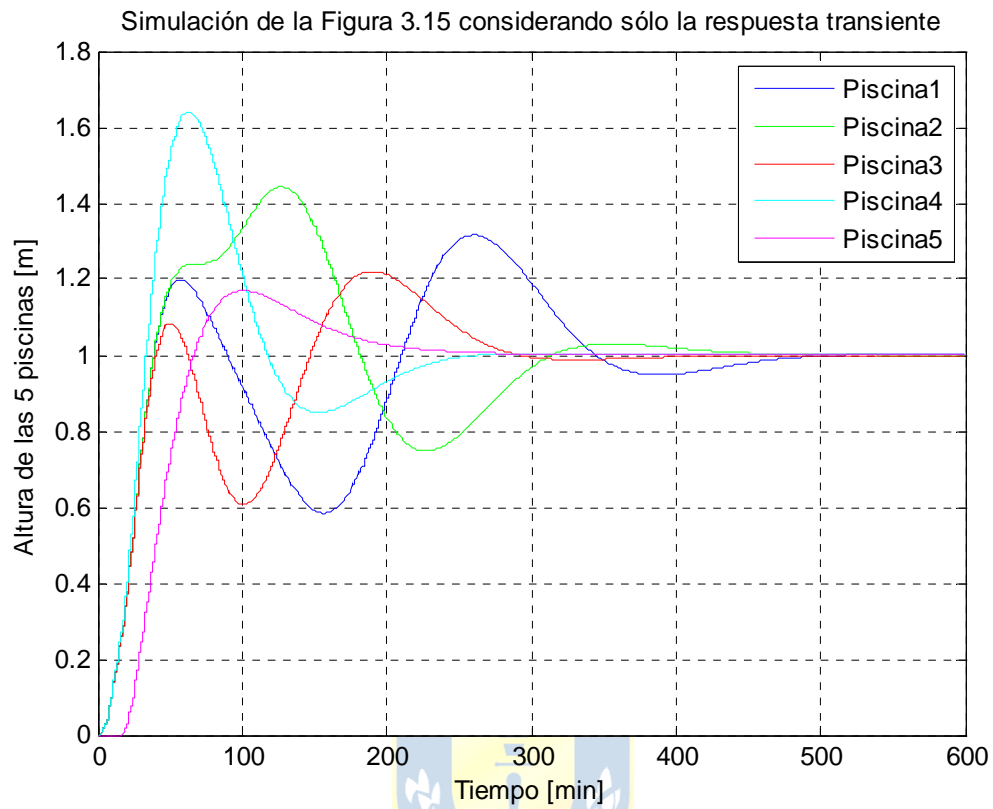


Fig. 3.16 Simulación resultante del Modelo Simulink de la Figura 3.15 considerando sólo la respuesta transiente

Ahora, considerando sólo la perturbación en el nivel de 0,3[m] en el instante de tiempo 1000[min], se obtiene el siguiente resultado:

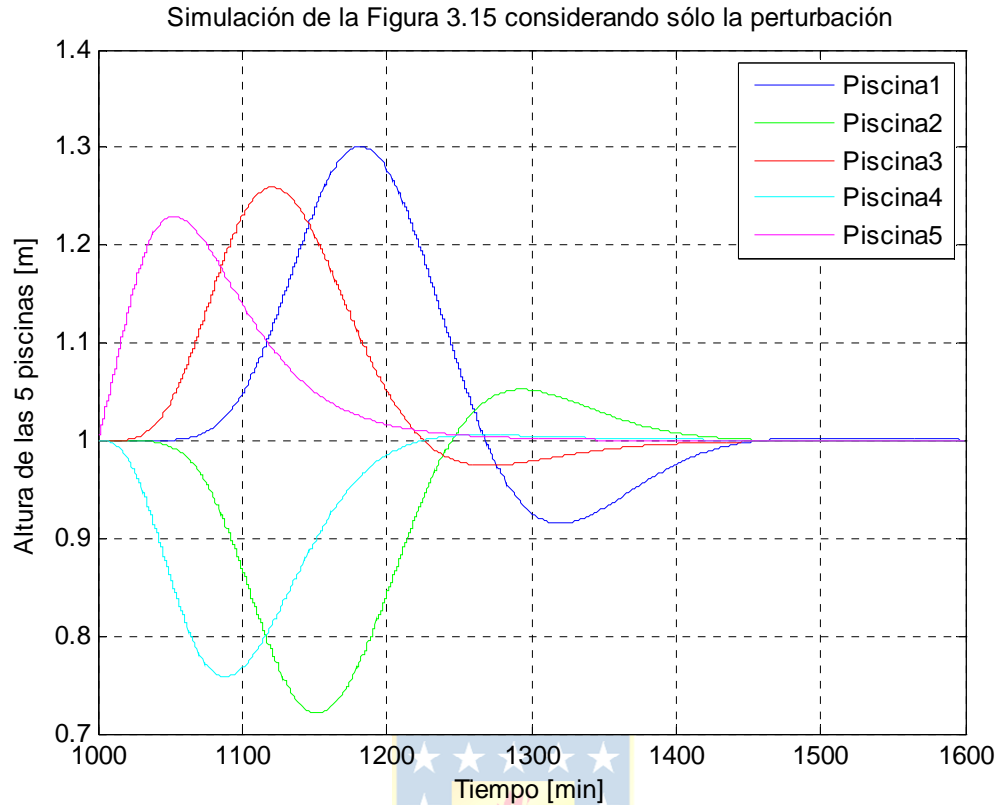


Fig. 3.17 Simulación resultante del Modelo Simulink de la Figura 3.15 considerando sólo la perturbación

Note que, al igual que para los casos en donde uno sólo considera la respuesta transiente del sistema y el otro sólo considera la presencia de perturbación, empleando ambos un tiempo de muestreo de 15[*min*], en estos otros dos casos, que emplean un tiempo de muestreo de 1[*min*] y que también un caso considera sólo la respuesta transiente del sistema y el otro caso considera sólo la presencia de perturbación, es posible apreciar la presencia del fenómeno de *inestabilidad de cuerda*.

Capítulo 4. Análisis de los efectos de comunicación para tiempo continuo

4.1. Introducción

Para la simulación de los sistemas mostrados a lo largo del Capítulo 3, sujetos a diversas condiciones de ruido y otros factores descritos en el Capítulo 2, se aplicará el Método de Montecarlo. Este método servirá para obtener un valor promedio y, por ende, más representativo, de SNR. En caso que el lector no recuerde la definición de SNR, puede recurrir al Capítulo 2 Ítem 2.4 principios de los canales de comunicación.

En general, los métodos de Montecarlo varían, pero tienden a seguir el siguiente patrón [9]:

- Definir un dominio de las posibles entradas.
- Generar entradas al azar de una distribución de probabilidad sobre el dominio.
- Realizar un cálculo determinista en las entradas.
- Agregación de los resultados.

Para efectos de este trabajo, el Método de Montecarlo consistirá en enviar a “*Workspace*” los vectores de las señales antes de pasar por los canales de comunicación y los vectores de los ruidos generados debido a la presencia de los canales de comunicación. Obtenidos estos valores, se procede a generar 100 repeticiones, mediante un ciclo FOR, en un M-file para distintos valores de la semilla del bloque “*Random Number*”. Esto se repite para un total de 12 valores distintos por parámetro de comunicación relevante, tales como el valor de umbral en el caso de simulación de pérdida de paquetes, los valores de máximo y mínimo en el bloque “*Uniform Random Number*” del efecto de un canal de comunicación con ganancia variable, etc. Esto implica un total de $12 \left[\frac{\text{iteraciones}}{\text{vectores}} \right] \cdot 100 [\text{vectores}] = 1200 [\text{iteraciones}]$. Hecho todo lo anterior, se procede a calcular las varianzas de los vectores de las señales y de los ruidos a través del comando Matlab® “*var*” y así se calculan los 100 valores para las SNRs dividiendo las varianzas de las señales entre las varianzas obtenidas para los ruidos. Entonces, se puede obtener el “*SNR promedio*” sumando los valores de SNRs dividido por el número de repeticiones como función del valor del parámetro de comunicación relevante.

4.2. Lazos cerrados de control para canales de regadío

Antes de empezar a tratar los temas referentes a los efectos de comunicación en tiempo continuo, será recordada la estructura asociada a la solución de control en lazo cerrado, la cual se muestra en el siguiente diagrama Simulink:

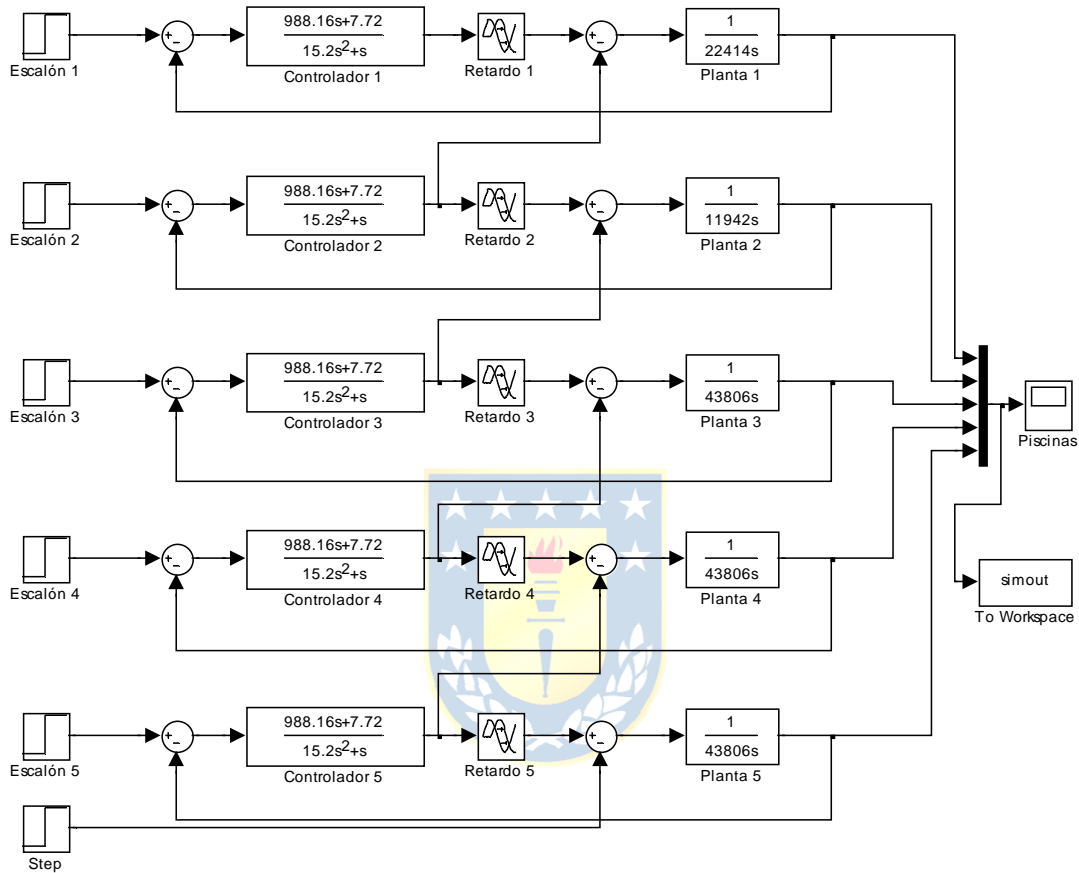


Fig. 4.1 Modelo Simulink del sistema de control en tiempo continuo para 5 piscinas

Para mayores detalles acerca del presente modelo ver Capítulo 3 Ítem 3.2.

4.3. Análisis de los efectos de comunicación

Los modelos en tiempo continuo, sujetos a los efectos de los canales de comunicación, que serán abordados en este capítulo, corresponden al canal de comunicación del tipo AWGN y al canal de comunicación con retardo. Estos dos casos serán analizados mediante el Método de Montecarlo.

Cabe destacar que, al tener un controlador y una planta en tiempo continuo, además de una representación simplificada de un canal AWGN, la cual opera con un tiempo de muestro de 0,1[min] y cuyo valor viene por defecto para este bloque de Simulink, en primera instancia sería necesario plantear estos elementos como un sistema híbrido. Sin embargo, esto último no será necesario debido a que la simulación en Matlab® tolera tiempo continuo y discreto simultáneamente.



4.4. Escenarios de canales de comunicación AWGN

4.4.1 Escenario con canal de comunicación Controlador – Planta (tipo CG)

El Modelo Simulink correspondiente se muestra a continuación:

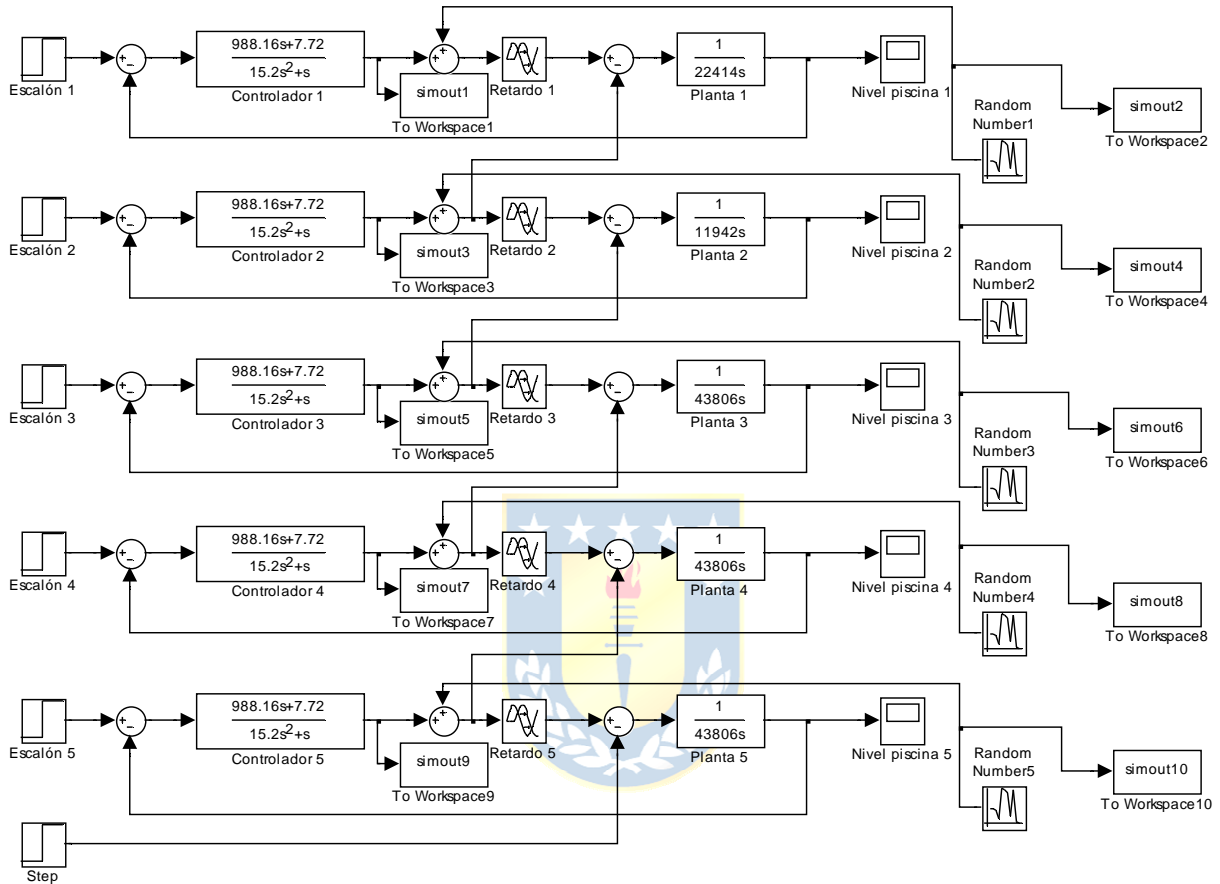


Fig. 4.2 Modelo de un canal de comunicación AWGN tipo CG en tiempo continuo para 5 piscinas

Luego, las gráficas correspondientes a las SNRs promedio de los canales de comunicación, para cada una de las 5 piscinas, son las siguientes:

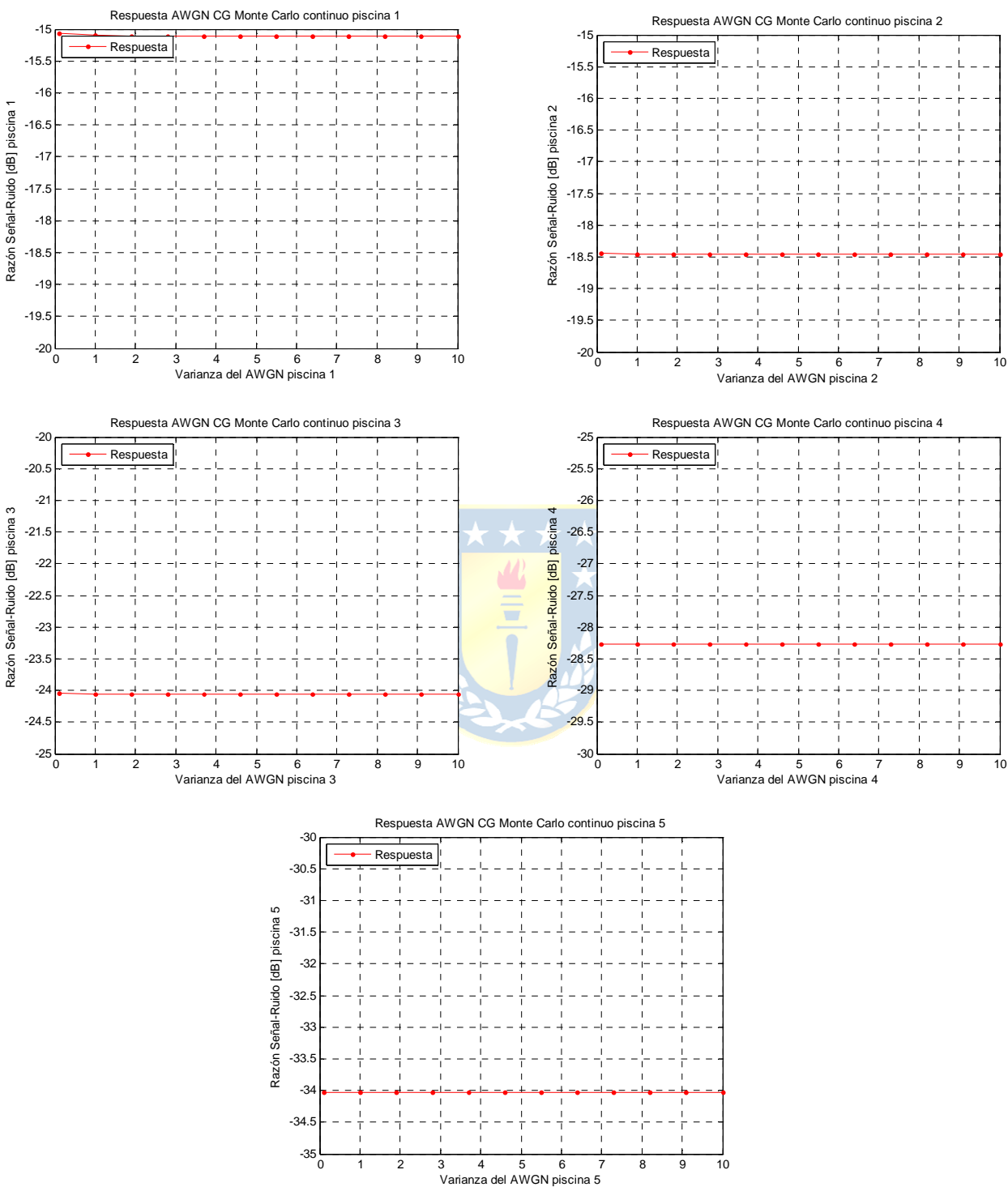


Fig. 4.3 SNR promedio de los canales de comunicación tipo CG como función de ν en tiempo continuo para 5 piscinas

Comentarios:

- La gráfica es interpolada, notando que cada punto es el promedio de 100 realizaciones del ruido distintas (Método de Montecarlo).
- Se aprecia que la SNR es constante en todos los casos.
- La SNR va disminuyendo según la piscina. El mayor valor de SNR es para la piscina 1 y el menor valor de SNR es para la piscina 5. Esto probablemente se relaciona con la presencia de inestabilidad de cuerda observada para el modelo en tiempo continuo.



4.4.2 Escenario con canal de comunicación Planta – Controlador (tipo GC)

El Modelo Simulink correspondiente se muestra a continuación:

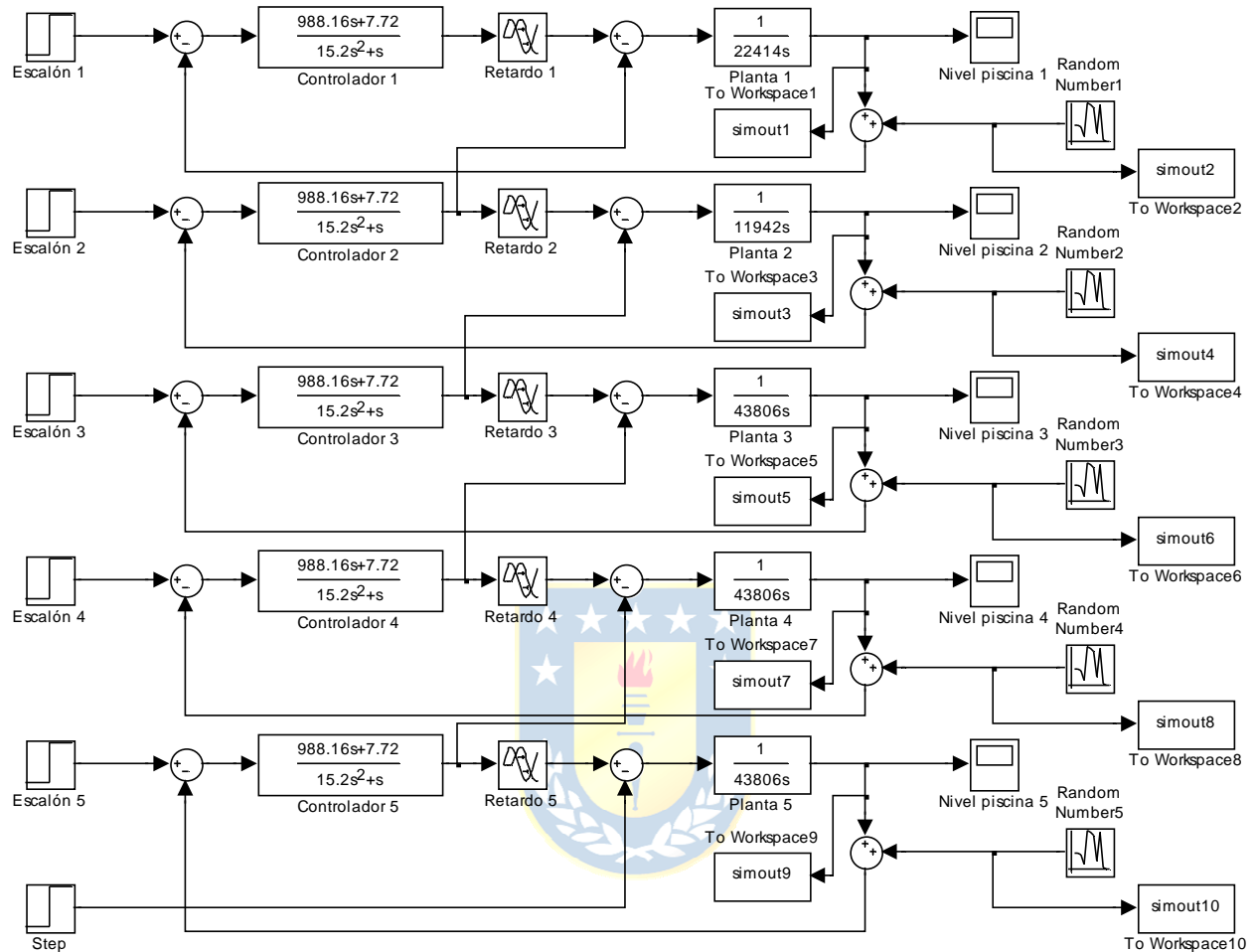


Fig. 4.4 Modelo de un canal de comunicación AWGN tipo GC en tiempo continuo para 5 piscinas

Luego, las gráficas correspondientes a las SNRs promedio de los canales de comunicación, para cada una de las 5 piscinas, son las siguientes:

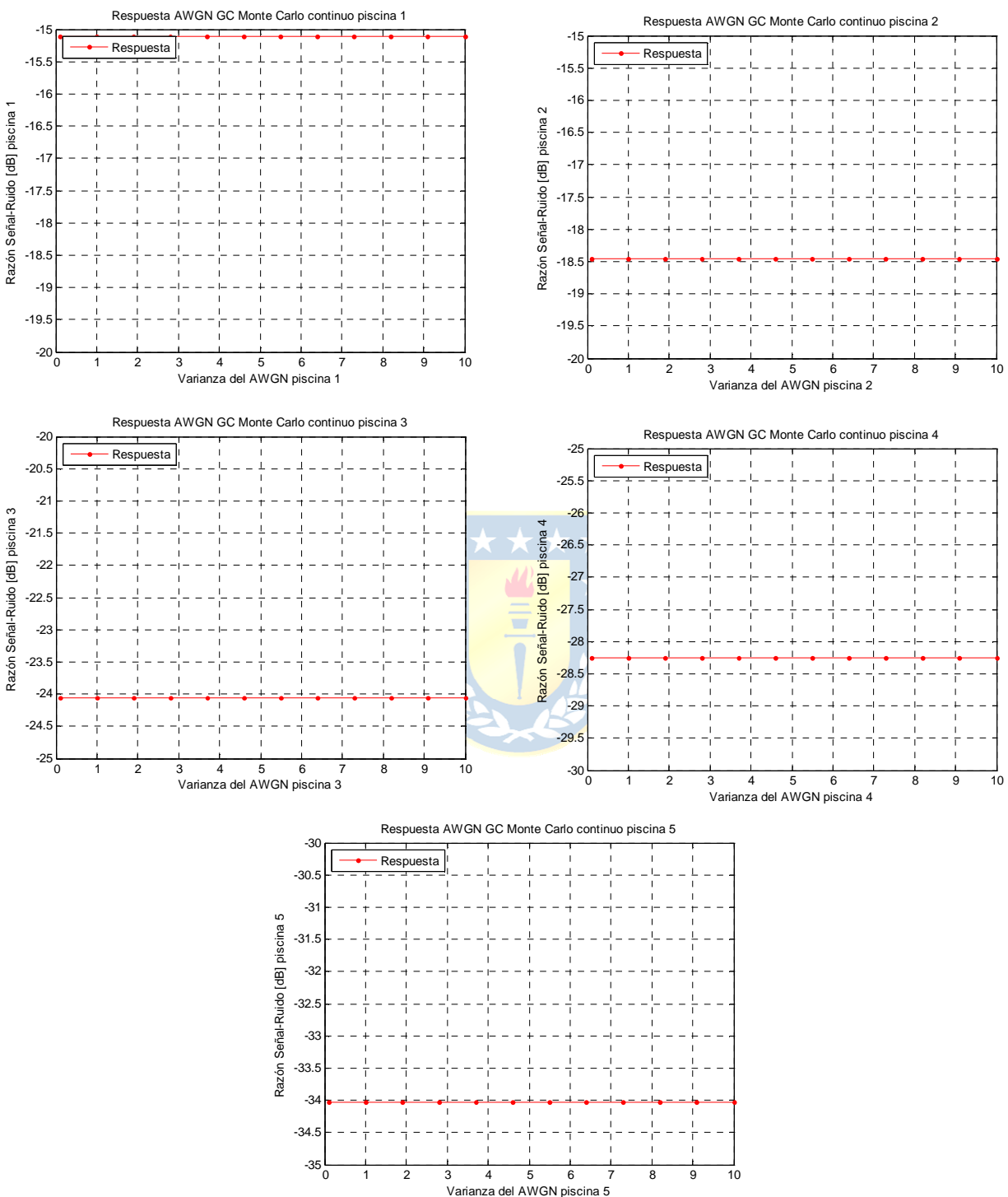


Fig. 4.5 SNR promedio de los canales de comunicación tipo GC como función de ν en tiempo continuo para 5 piscinas

Comentarios:

- Se aprecian resultados similares a los del caso CG.
- La SNR se mantiene constante para distintas varianzas del ruido.
- La SNR de las distintas piscinas disminuye con la ubicación, siendo la primera la que muestra una mayor SNR y la última la que muestra una menor SNR.
- La intuición sugiere que este resultado tiene sentido, porque la varianza de las entradas de los canales de comunicación es sólo función de las varianzas de los respectivos ruidos.

4.5. Escenarios de canales de comunicación con retardo

4.5.1 Escenario con canal de comunicación Controlador – Planta (tipo CG)

El Modelo Simulink correspondiente se muestra a continuación:

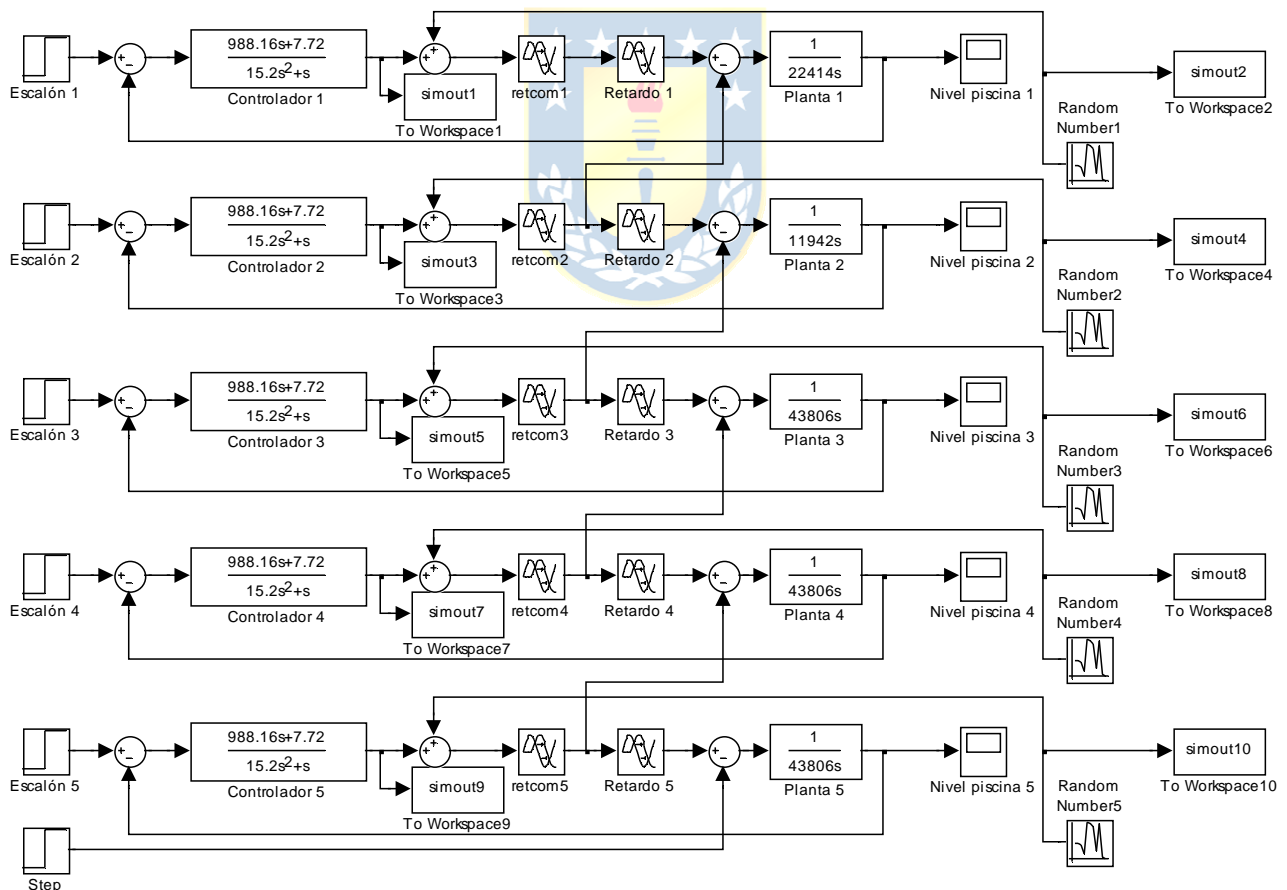


Fig. 4.6 Modelo de un canal de comunicación con retardo tipo CG en tiempo continuo para 5 piscinas

Luego, las gráficas correspondientes a las SNRs promedio de los canales de comunicación, para cada una de las 5 piscinas, son las siguientes:

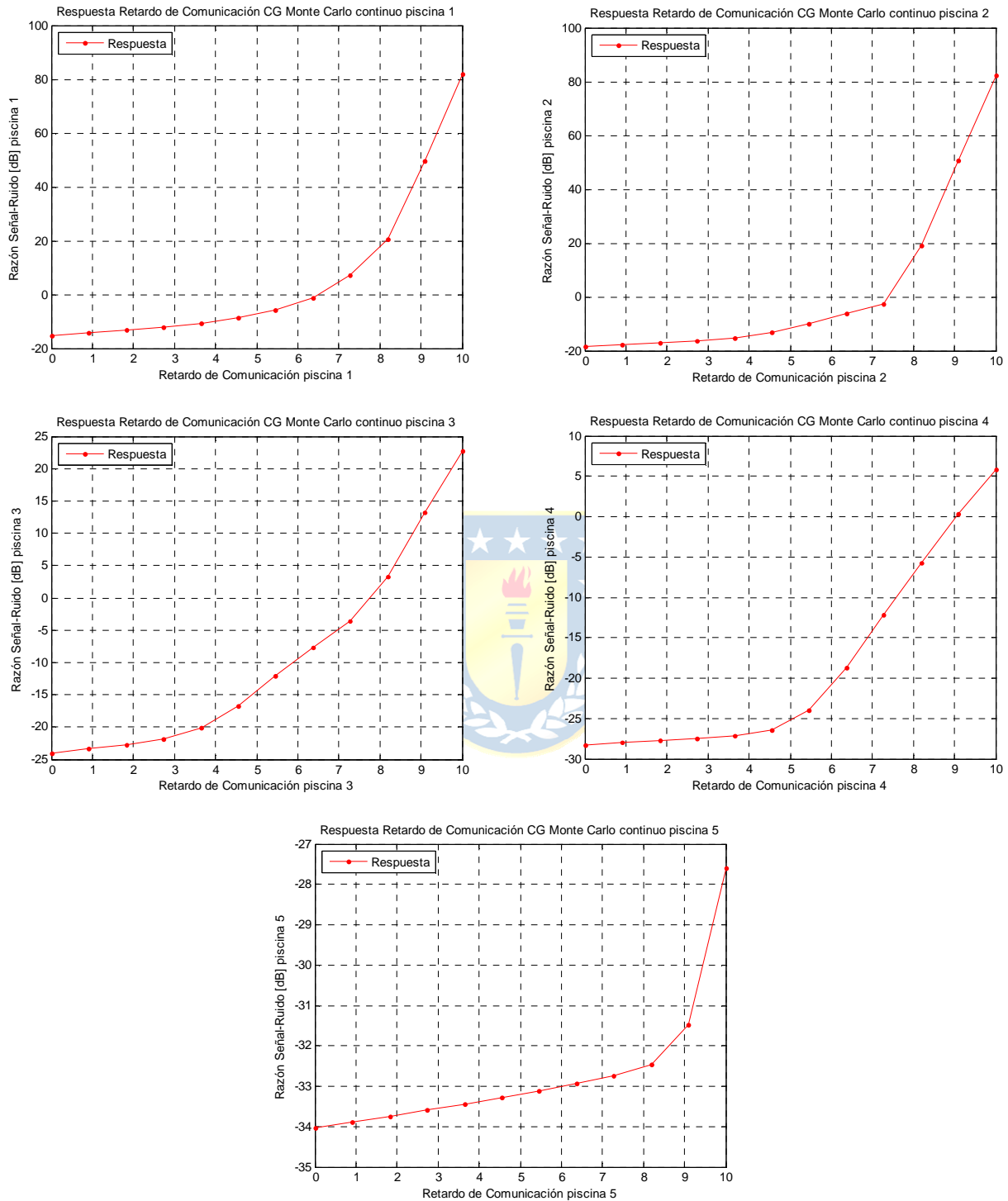


Fig. 4.7 SNR promedio de los canales de comunicación tipo CG como función de t en tiempo continuo para 5 piscinas

Comentarios:

- Las distintas SNR para el retardo de transmisión tendiendo a cero se muestran con una distribución como la observada anteriormente, es decir, la piscina 1 tiene mayor SNR inicial y la piscina 5 tiene menor SNR inicial (con retardo cero).
- La SNR para retardos cada vez mayores se incrementa en forma exponencial.
- Este aumento se puede interpretar como el surgimiento de inestabilidad de los distintos lazos cerrados.
- Se observa que el rango de SNR es menor para la piscina 5 que para la piscina 1, y aún más están en orden de mayor a menor (desde la primera piscina hasta la quinta piscina). Esto puede interpretarse como que el lazo cerrado de la primera piscina tiene un margen de fase menor que el de las piscinas siguientes. Alternativamente, la piscina 5 es la que tiene el mayor margen de fase.



4.5.2 Escenario con canal de comunicación Planta – Controlador (tipo GC)

El Modelo Simulink correspondiente se muestra a continuación:

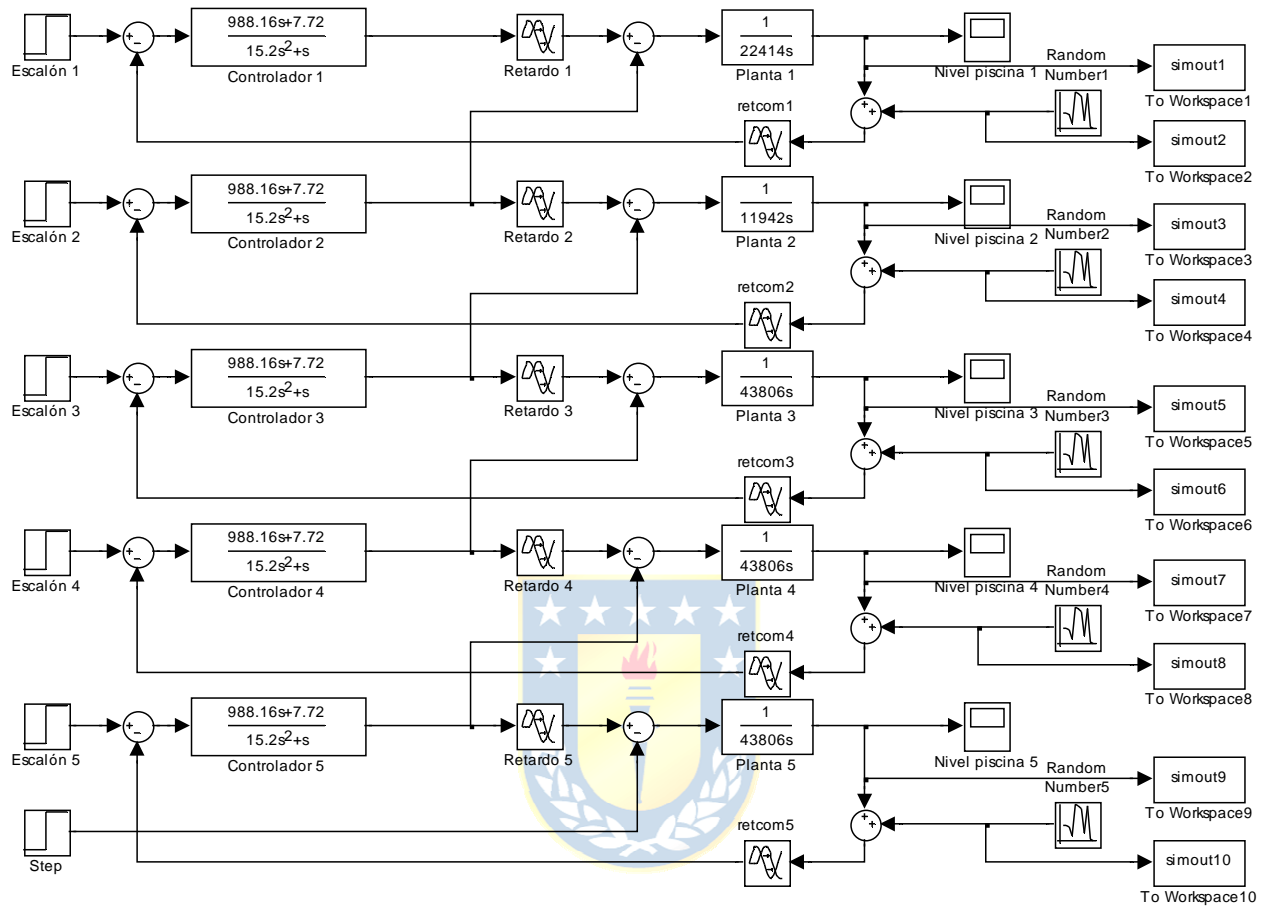


Fig. 4.8 Modelo de un canal de comunicación con retardo tipo GC en tiempo continuo para 5 piscinas

Luego, las gráficas correspondientes a las SNRs promedio de los canales de comunicación, para cada una de las 5 piscinas, son las siguientes:

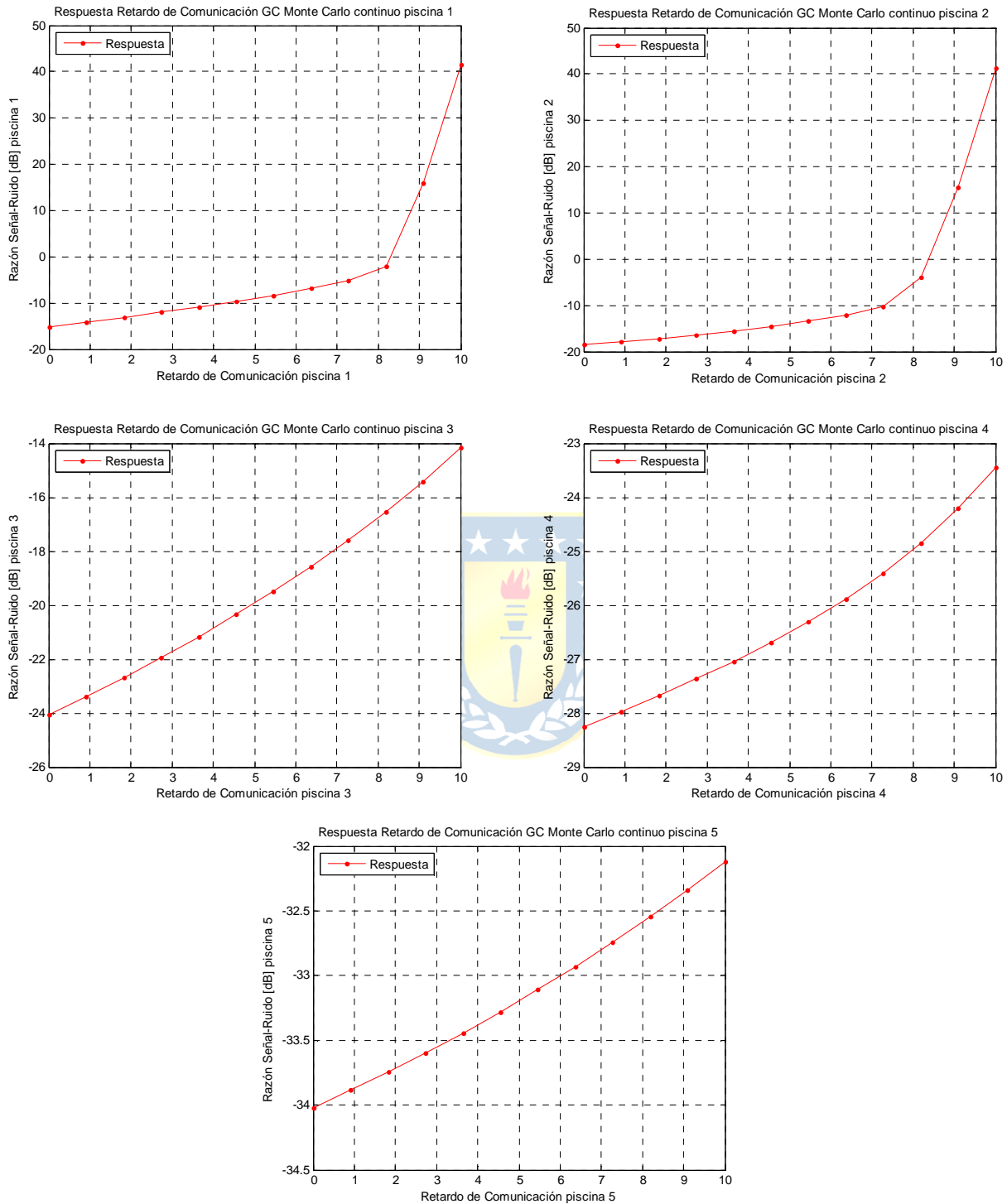


Fig. 4.9 SNR promedio de los canales de comunicación tipo GC como función de t en tiempo continuo para 5 piscinas

Comentarios:

- Nuevamente, las distintas SNR para retardo de transmisión tendiendo a cero se muestran con una distribución como la observada para AWGN, es decir, la piscina 1 tiene mayor SNR inicial y la piscina 5 tiene menor SNR inicial (con retardo cero).
- La SNR para retardos cada vez mayores se incrementa en forma exponencial para las primeras piscinas, mientras que para la piscina 5 es casi lineal.
- Nuevamente, este aumento se puede interpretar como el surgimiento de inestabilidad de los distintos lazos cerrados.
- Se observa que el rango de SNR es menor para la piscina 5 que para la piscina 1, y aún más están en orden de mayor a menor (desde la primera piscina hasta la quinta piscina), aunque la primera y la segunda piscina son de comportamiento muy similar. Esto puede interpretarse como que el lazo cerrado de la primera piscina tiene un margen de fase menor que el de las piscinas siguientes. Alternativamente, la piscina 5 es la que tiene el margen de fase mayor.
- A diferencia del caso CG, el comportamiento de las piscinas 1 y 2, en términos de SNR, es muy parecido en este caso.



4.5.3 Comparación de escenarios con canal de comunicación Controlador – Planta y Planta – Controlador (tipos CG y GC)

El Modelo Simulink corresponde a juntar los modelos propuestos en 4.5.1 y 4.5.2 en un mismo archivo mdl, destacando que estos modelos se encuentran desacoplados en dicho archivo.

Luego, las gráficas correspondientes a las SNRs promedio de los canales de comunicación, para cada una de las 5 piscinas, son las siguientes:

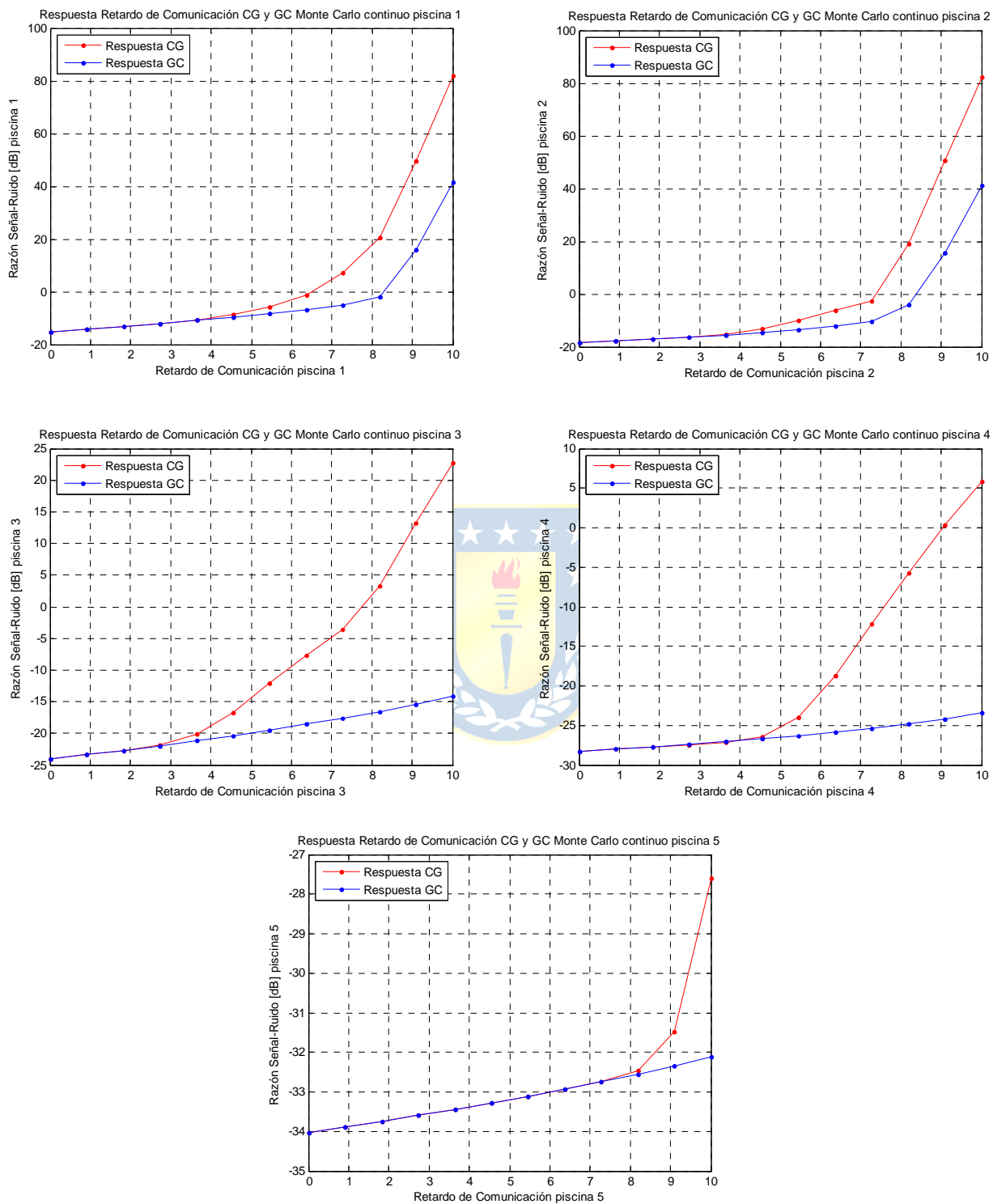


Fig. 4.10 SNR promedio de los canales de comunicación tipo CG y GC como función de t en tiempo continuo para 5 piscinas

Comentarios:

- Al comparar las curvas obtenidas del modelo de canal de comunicación con retardo de transmisión, se aprecia en ambos casos (CG y GC) el mismo valor de SNR inicial en todas las piscinas.
- El caso CG presenta una mayor variación de SNR en todas las piscinas, por ende, el canal de regadío en donde todos los canales de comunicación son CG, es más proclive a alcanzar la condición de inestabilidad.
- Se aprecia una disminución de la variación de SNR según la ubicación de la piscina, en donde la primera piscina presenta mayor variación de SNR y la quinta piscina presenta una menor variación de SNR.
- Dado lo observado, pareciese ser mejor opción ubicar el canal de comunicación entre la planta y el controlador en caso que el retardo de transmisión sea el efecto dominante.



Capítulo 5. Análisis de los efectos de comunicación para tiempo discreto

5.1. Introducción

El análisis estocástico correspondiente será llevado a cabo mediante el Método de Montecarlo, el cual se encuentra explicado en el Capítulo 4, donde nuevamente se considerarán 5 piscinas con sus respectivos modelos en tiempo discreto con $T = 1[\text{min}]$.

Similar al Capítulo anterior, serán estudiados el caso de AWGN y de retardo de transmisión, donde, la diferencia de este capítulo, respecto al anterior, radica en que serán estudiados, además de los casos de AWGN y retardo de transmisión, también se estudiarán canales de comunicación con pérdida de paquetes y de ganancia variable. Por último, todos los canales de comunicación estarán ubicados CG o GC.



5.2. Lazos cerrados de control para canales de regadío

Antes de empezar a tratar los temas referentes a los efectos de comunicación en tiempo discreto, sólo será recordada la estructura asociada a la solución de control en tiempo discreto con $T = 1[\text{min}]$, debido a lo expuesto en el Capítulo 2 Ítem 2.3 Control de los canales de regadío.

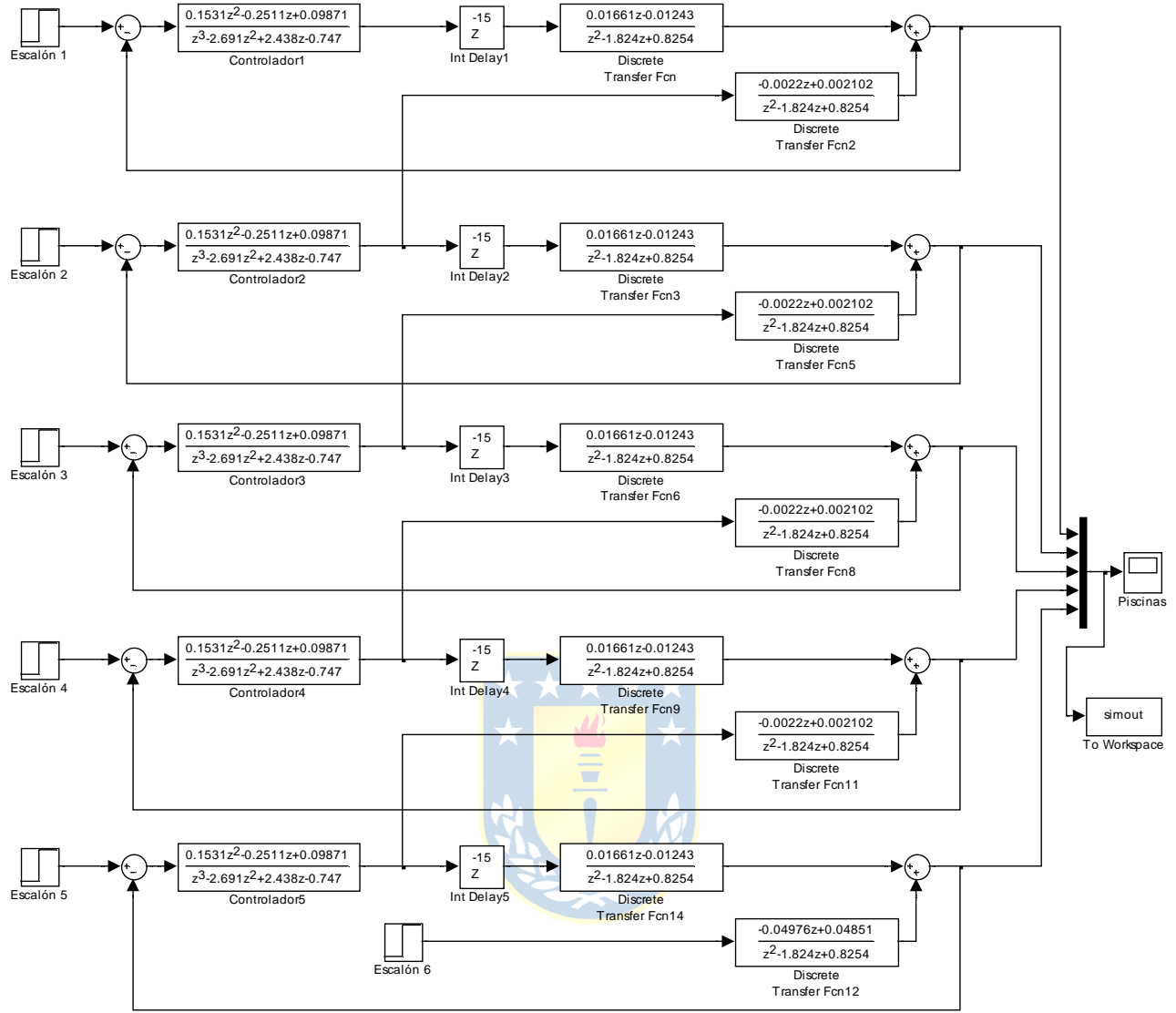


Fig. 5.1 Modelo Simulink del sistema de control en tiempo discreto para 5 piscinas con un tiempo de muestreo de 1[*min*]

5.3. Análisis de los efectos de comunicación

Los modelos en tiempo discreto, sujetos a los efectos de los canales de comunicación, que serán abordados en este capítulo, corresponden al canal de comunicación del tipo AWGN, al canal de comunicación con retardo, al canal de comunicación con pérdida de paquetes y al canal de comunicación de ganancia variable. Estos cuatro casos serán analizados mediante el Método de Montecarlo.

A diferencia del caso en tiempo continuo (Capítulo 4.3), acá se tiene que el controlador, la planta y la representación simplificada de un canal AWGN, operan en tiempo discreto. Donde el controlador y la planta operan con un tiempo de muestreo de 1[*min*], mientras que la representación simplificada de un canal AWGN opera con un tiempo de muestreo de 0,1[*min*]. Por lo tanto, el sistema en su totalidad opera con un $T = 1$ [*min*], lo cual implica que la representación simplificada de un canal AWGN, representada en el bloque Simulink “*Random Number*”, a pesar de operar con un $T = 0,1$ [*min*], se apreciará que en realidad operará con un tiempo de muestreo de 1[*min*], producto de que dicha representación formará parte del sistema en su totalidad.



5.4. Escenarios de canales de comunicación AWGN

5.4.1 Escenario con canal de comunicación Controlador – Planta (tipo CG)

El Modelo Simulink correspondiente se muestra a continuación:

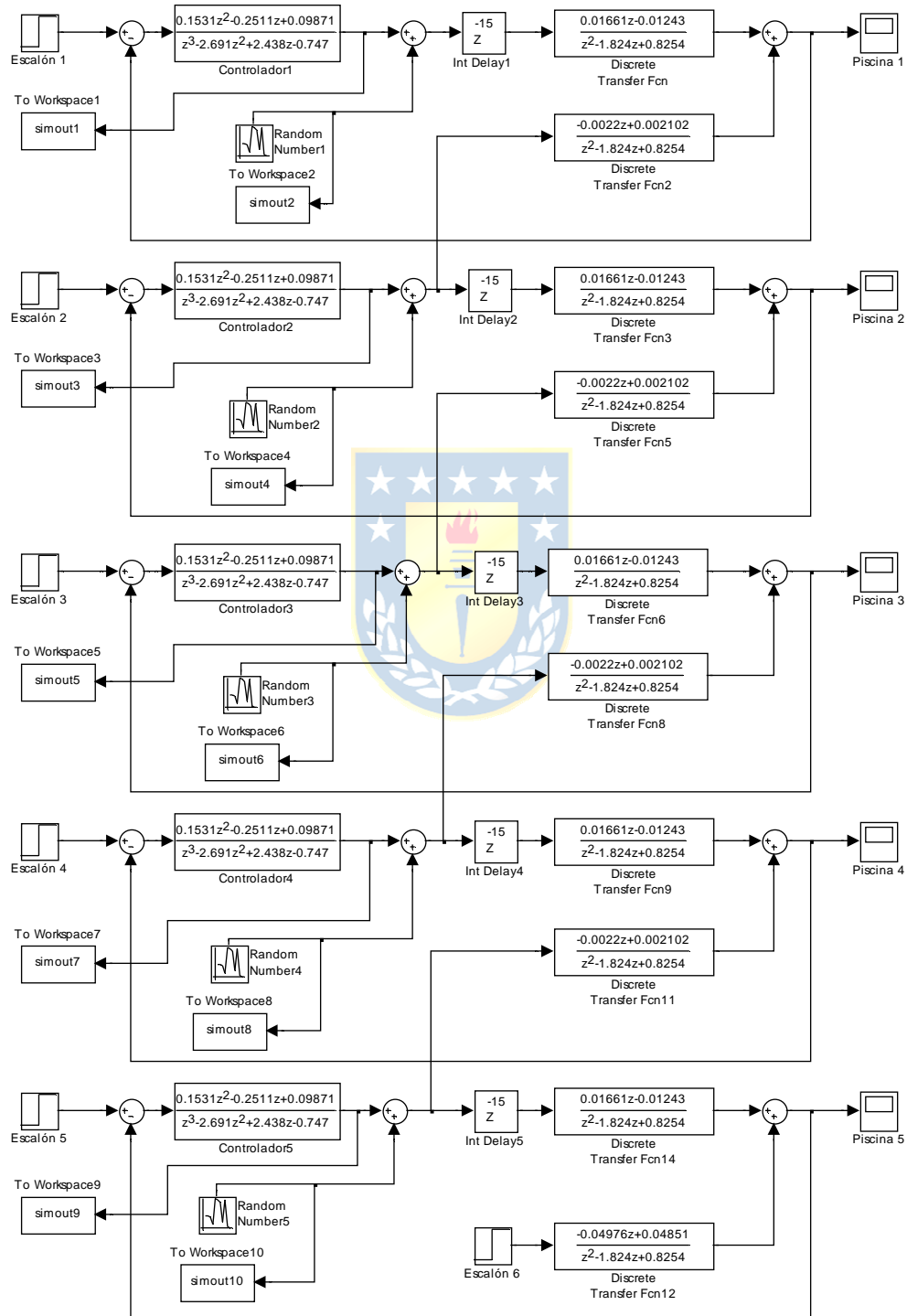


Fig. 5.2 Modelo de un canal de comunicación AWGN tipo CG en tiempo discreto para 5 piscinas

Luego, las gráficas correspondientes a las SNRs promedio de los canales de comunicación, para cada una de las 5 piscinas, son las siguientes:

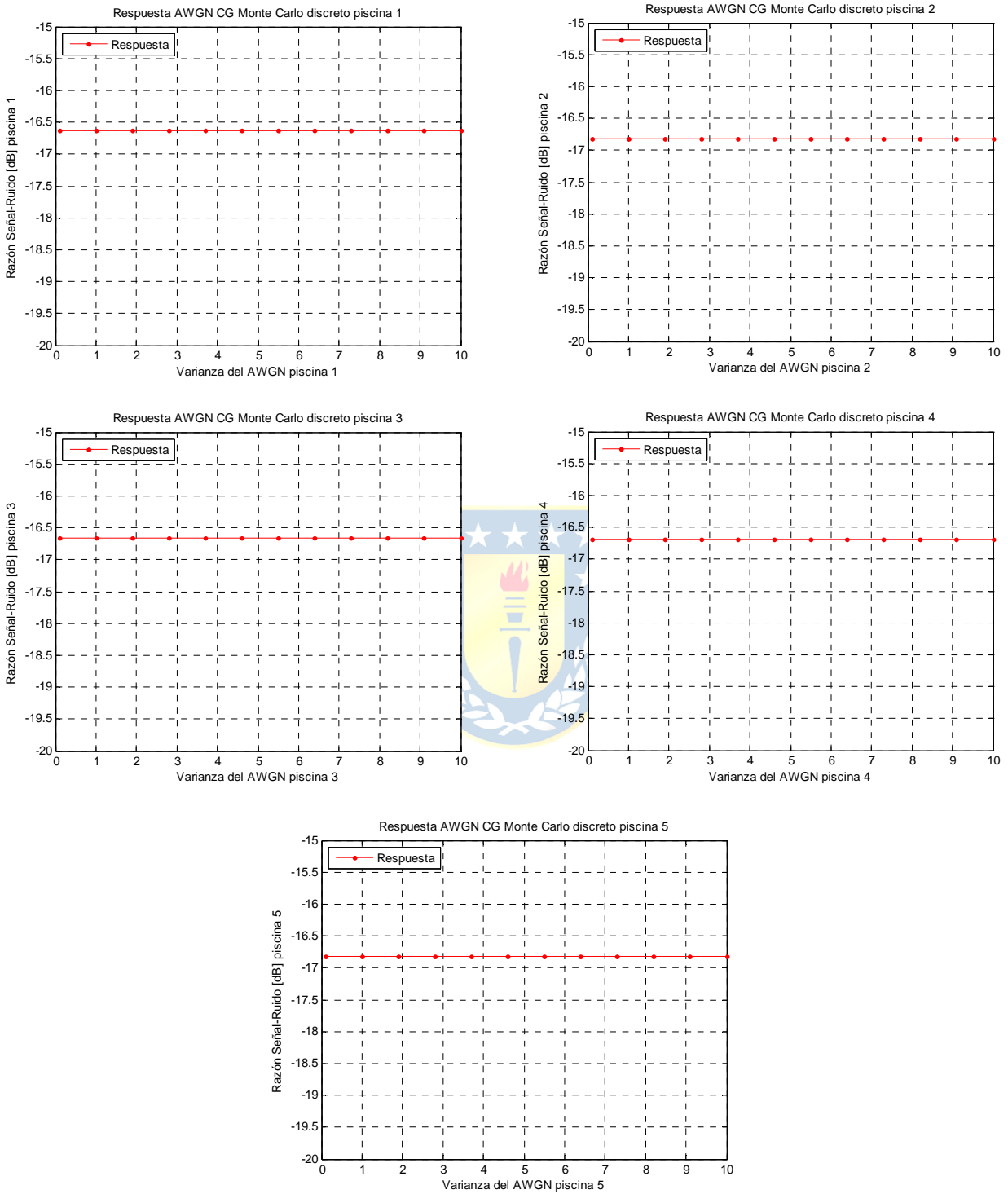


Fig. 5.3 SNR promedio de los canales de comunicación tipo CG como función de ν en tiempo discreto para 5 piscinas

Comentarios:

- Se comparó este resultado con lo observado en tiempo continuo, de los cuales se deduce que el comportamiento es similar, debido a que los valores son constantes, sin embargo, ya no se observa que vaya disminuyendo con la ubicación de la piscina, dado que todas las SNR se ubican cercanas al valor de $-17[\text{dB}]$.
- Probablemente, de considerar el modelo discreto con inestabilidad de cuerda, se observaría lo mismo que en tiempo continuo, en cuanto a que también se apreciaría una disminución de la SNR según la ubicación de la piscina considerada.



5.4.2 Escenario con canal de comunicación Planta – Controlador (tipo GC)

El Modelo Simulink correspondiente se muestra a continuación:

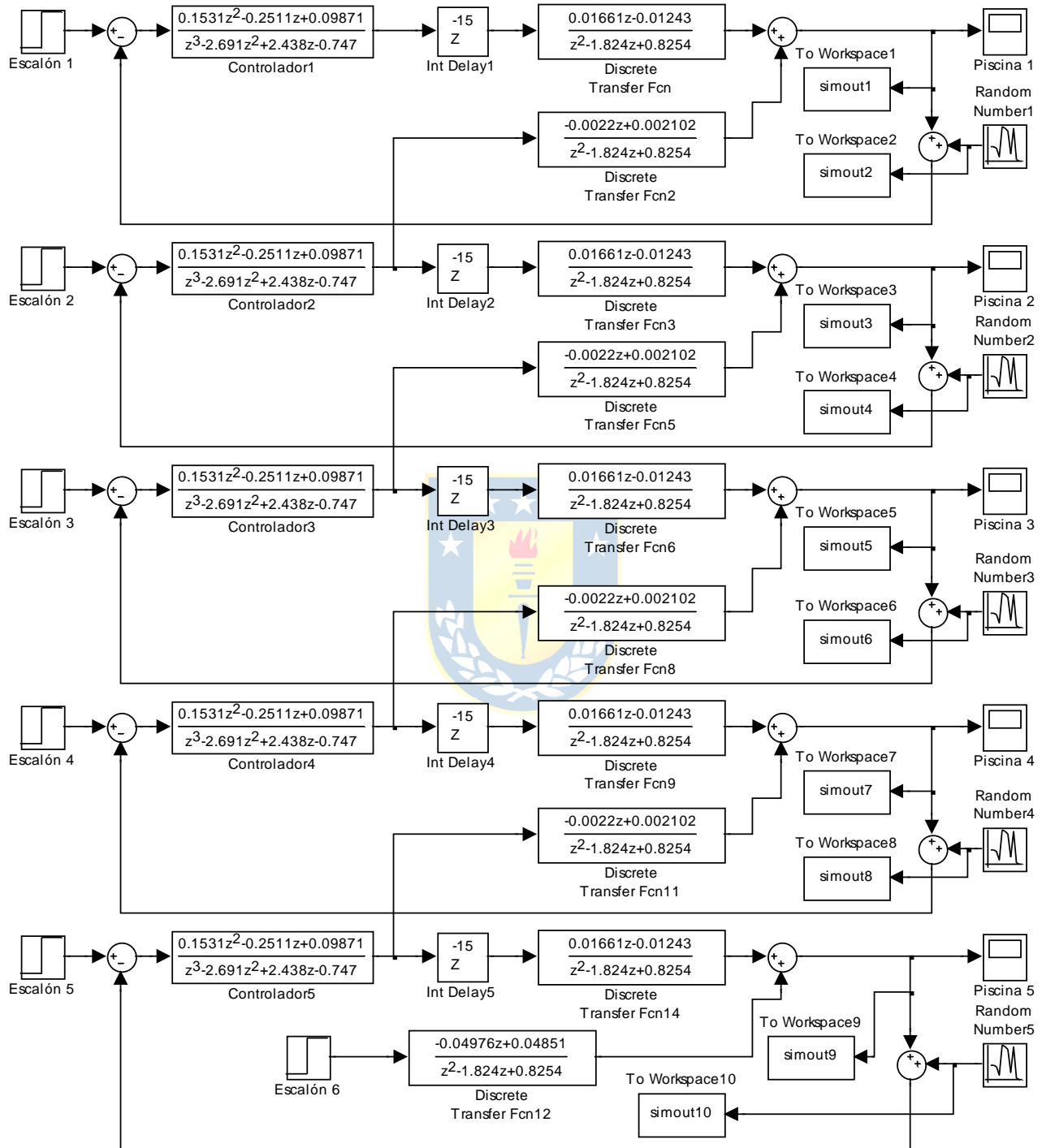


Fig. 5.4 Modelo de un canal de comunicación AWGN tipo GC en tiempo discreto para 5 piscinas

Luego, las gráficas correspondientes a las SNRs promedio de los canales de comunicación, para cada una de las 5 piscinas, son las siguientes:

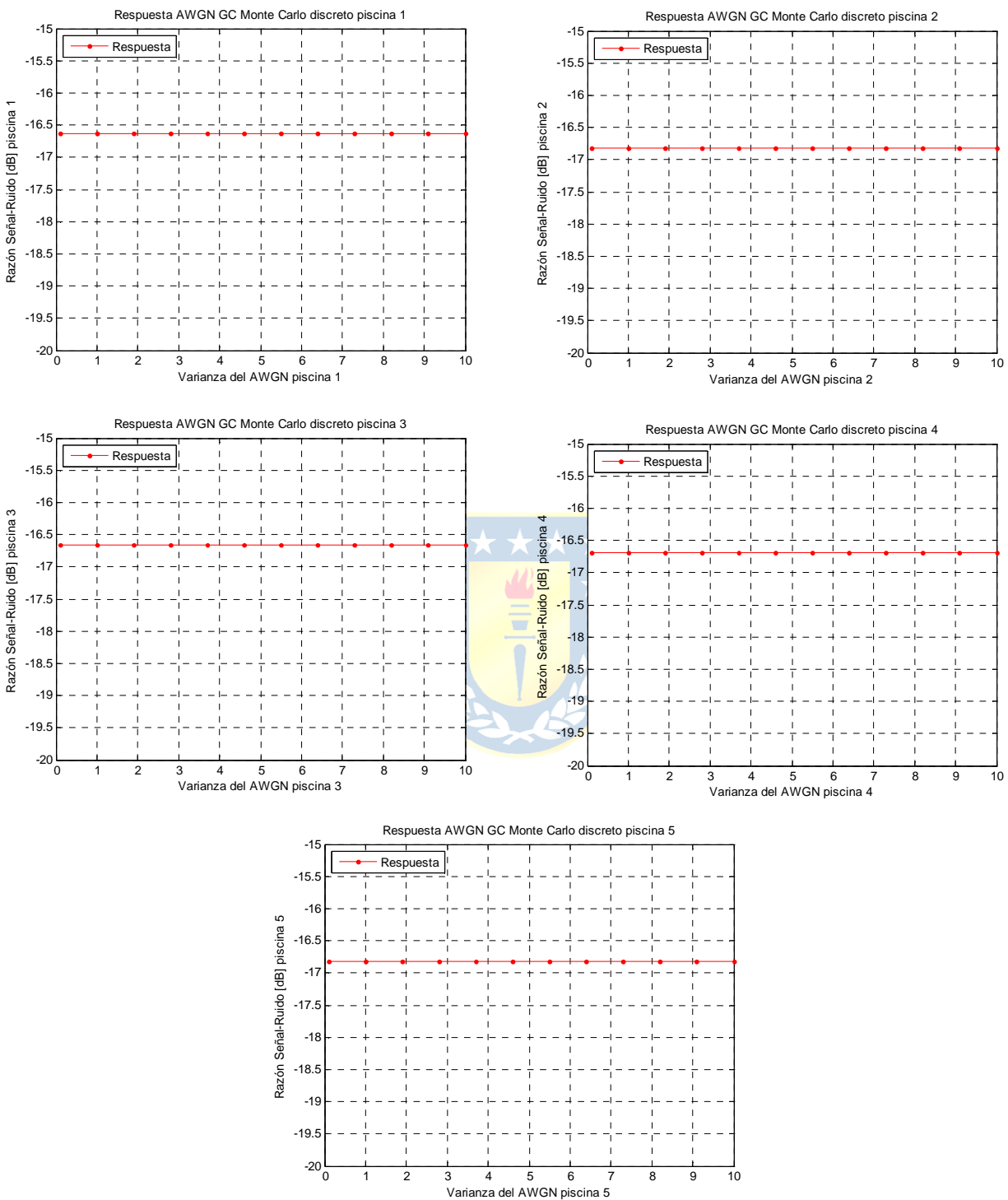


Fig. 5.5 SNR promedio de los canales de comunicación tipo GC como función de ν en tiempo discreto para 5 piscinas

Comentarios:

- Se observa que el resultado no es muy distinto al del caso CG.
- Nuevamente, los valores de SNR para cada piscina, son constantes en función de la varianza del ruido aditivo.
- De igual modo, no se observa una disminución de la SNR con la ubicación de la piscina.



5.5. Escenarios de canales de comunicación con retardo

5.5.1 Escenario con canal de comunicación Controlador – Planta (tipo CG)

El Modelo Simulink correspondiente se muestra a continuación:

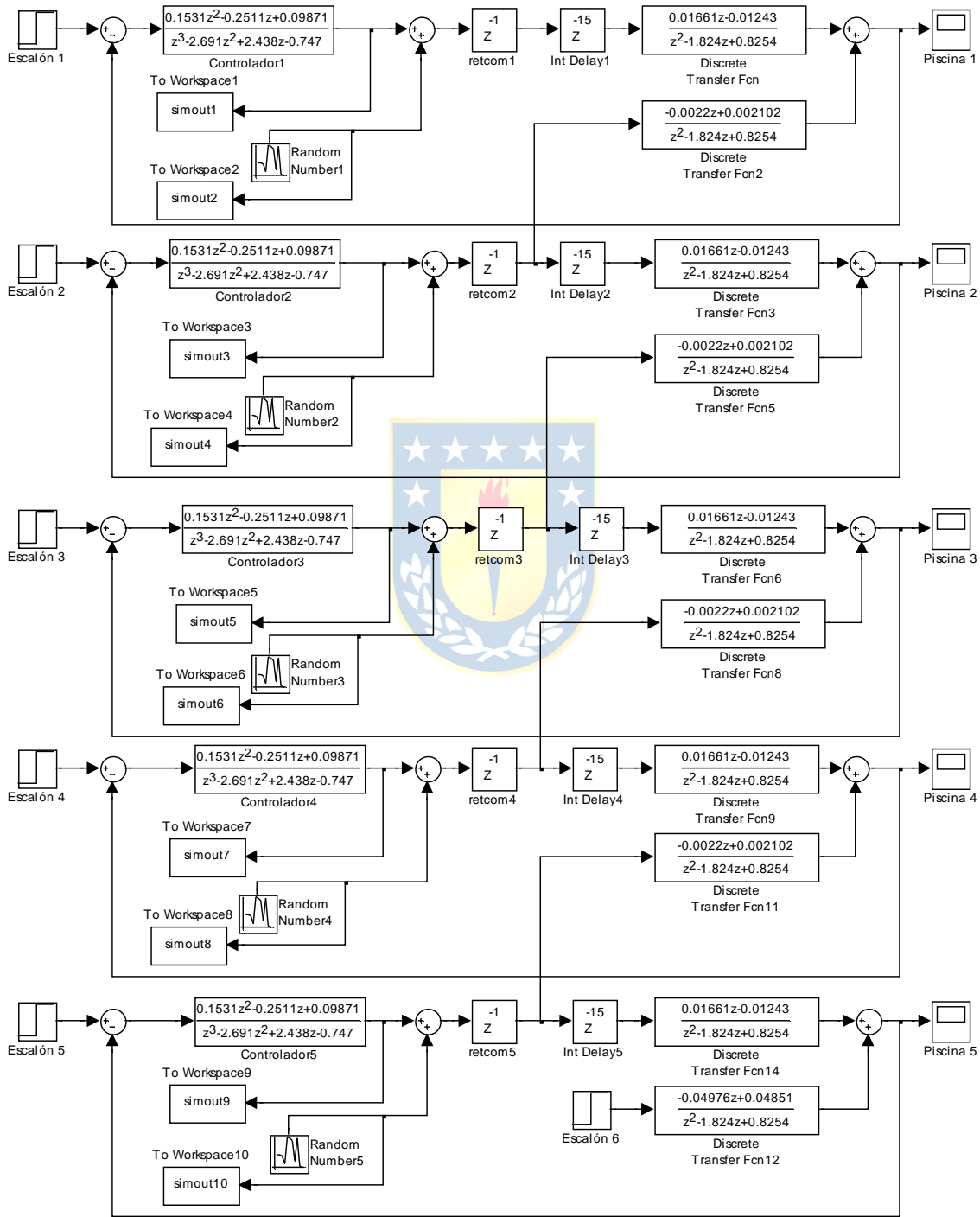


Fig. 5.6 Modelo de un canal de comunicación con retardo tipo CG en tiempo discreto para 5 piscinas

Luego, las gráficas correspondientes a las SNRs promedio de los canales de comunicación, para cada una de las 5 piscinas, son las siguientes:

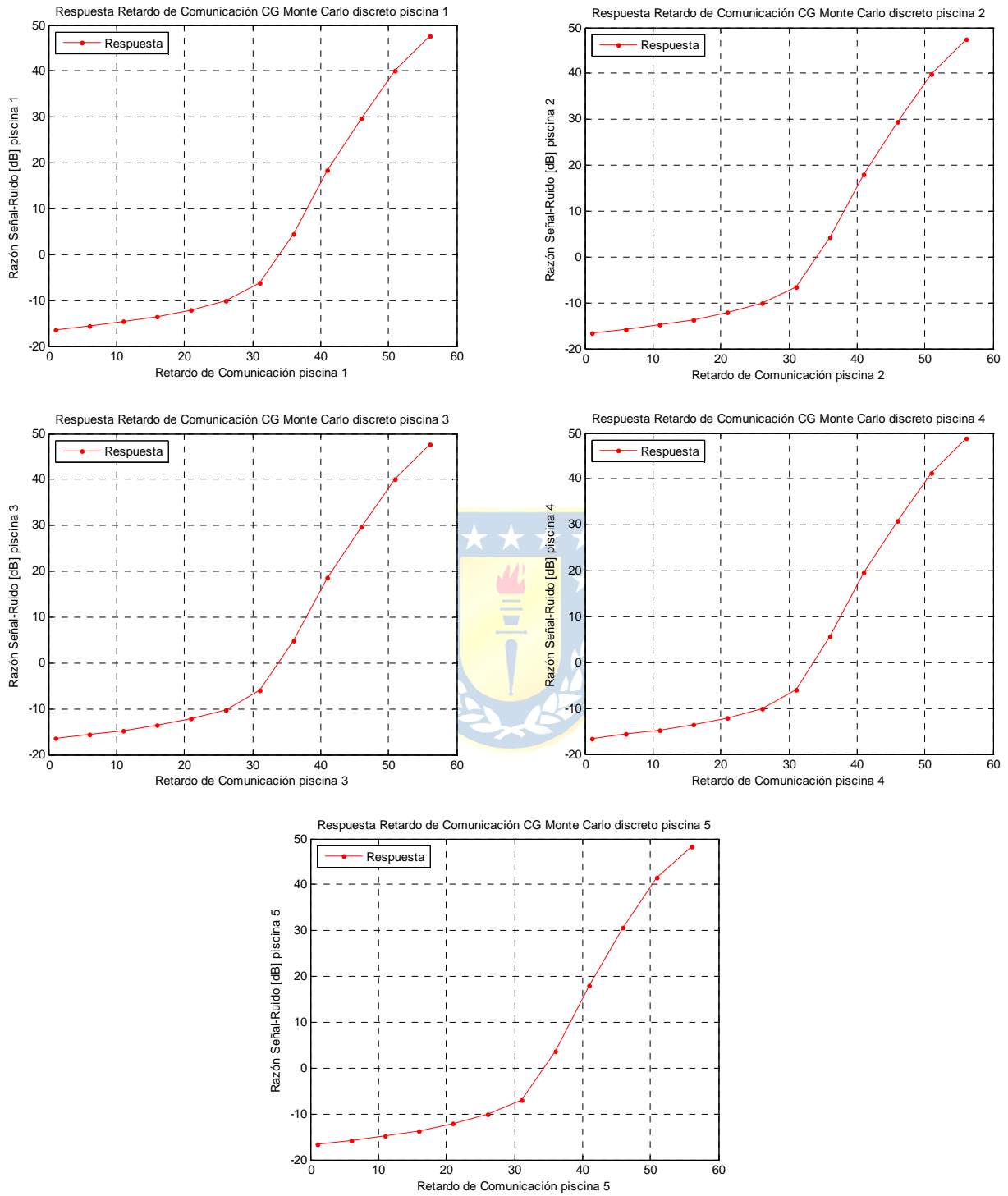


Fig. 5.7 SNR promedio de los canales de comunicación tipo CG como función de t en tiempo discreto para 5 piscinas

Comentarios:

- Se observan valores de inicio y finales muy similares.
- Se aprecia que no hay disminución de los valores de SNR según la ubicación de las piscinas, por lo tanto, los rangos de SNR son similares.
- Los lazos de control se hacen cada vez más inestables conforme va aumentando el retardo de transmisión.
- Probablemente, se puede asumir que el margen de fase es similar para las cinco piscinas.



5.5.2 Escenario con canal de comunicación Planta – Controlador (tipo GC)

El Modelo Simulink correspondiente se muestra a continuación:

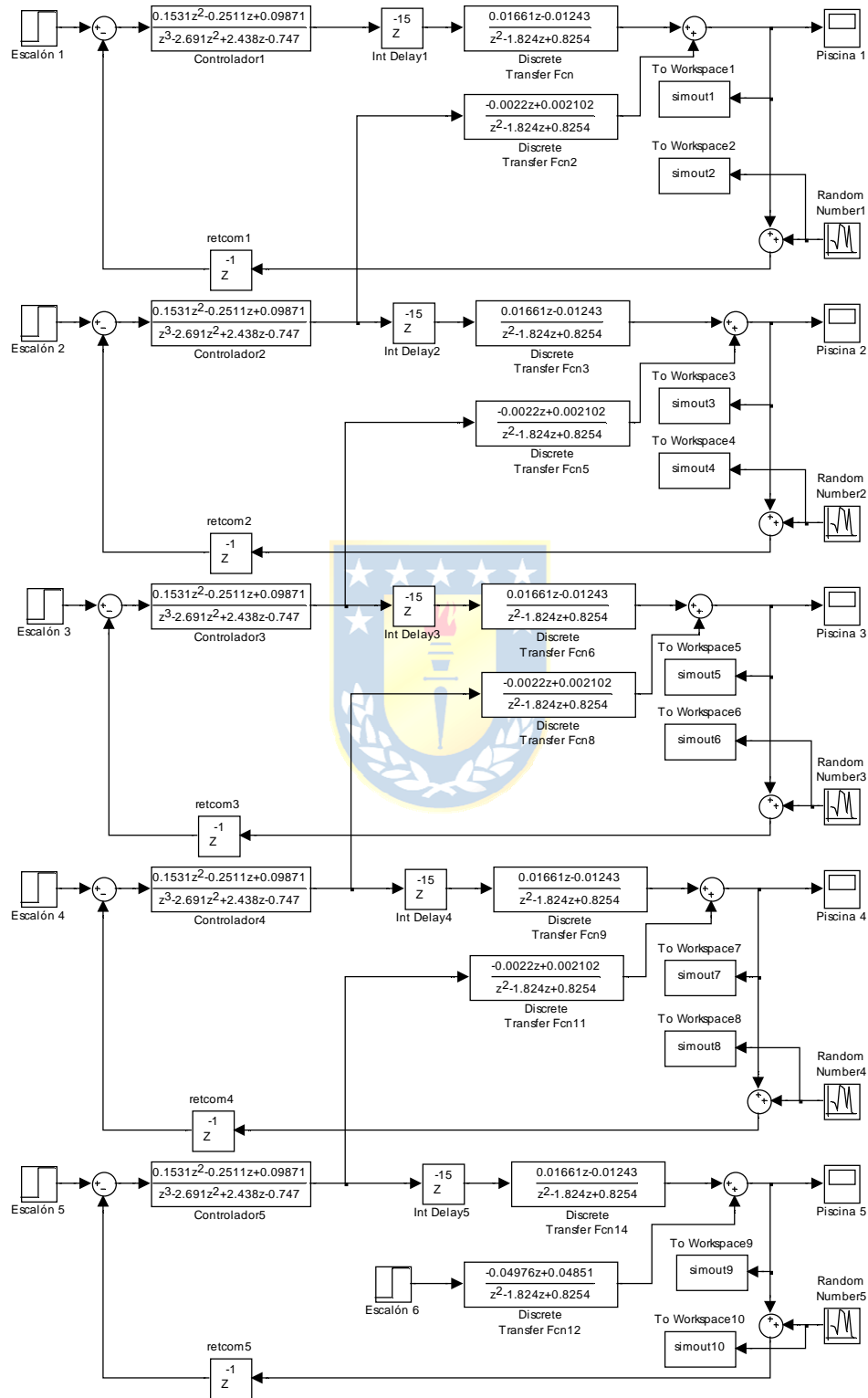


Fig. 5.8 Modelo de un canal de comunicación con retardo tipo GC en tiempo discreto para 5 piscinas

Luego, las gráficas correspondientes a las SNRs promedio de los canales de comunicación, para cada una de las 5 piscinas, son las siguientes:

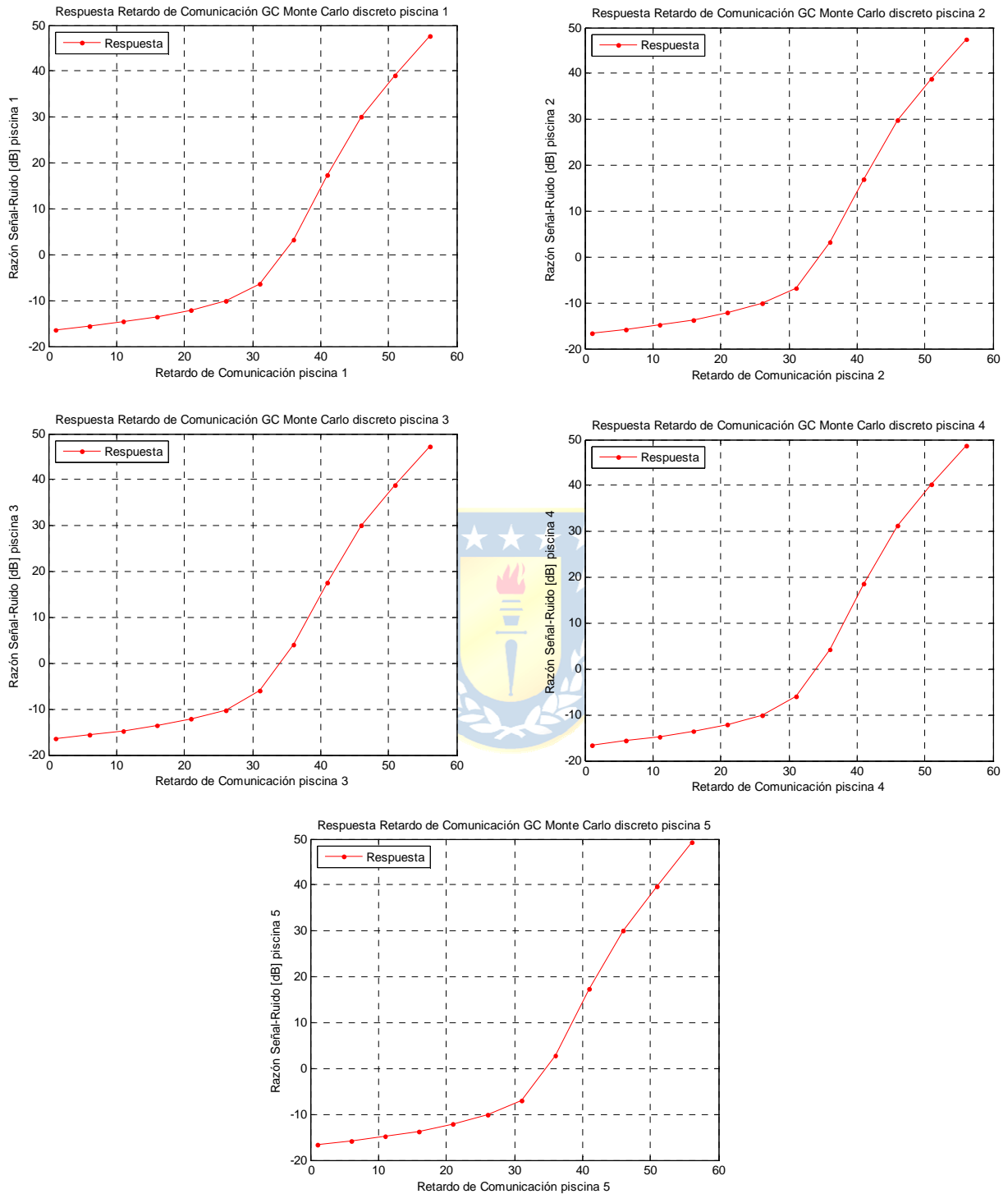


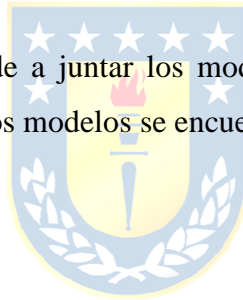
Fig. 5.9 SNR promedio de los canales de comunicación tipo GC como función de t en tiempo discreto para 5 piscinas

Comentarios:

- Los resultados obtenidos son similares al caso discreto de canales de comunicación CG con retardo de transmisión.
- El modelo discreto como tal, tiene mayor tolerancia al retardo de transmisión que el mostrado por el modelo de tiempo continuo.

5.5.3 Comparación de escenarios con canal de comunicación Controlador – Planta y Planta – Controlador (tipos CG y GC)

El Modelo Simulink corresponde a juntar los modelos propuestos en 5.5.1 y 5.5.2 en un mismo archivo mdl, destacando que estos modelos se encuentran desacoplados en dicho archivo.



Luego, las gráficas correspondientes a las SNRs promedio de los canales de comunicación, para cada una de las 5 piscinas, son las siguientes:

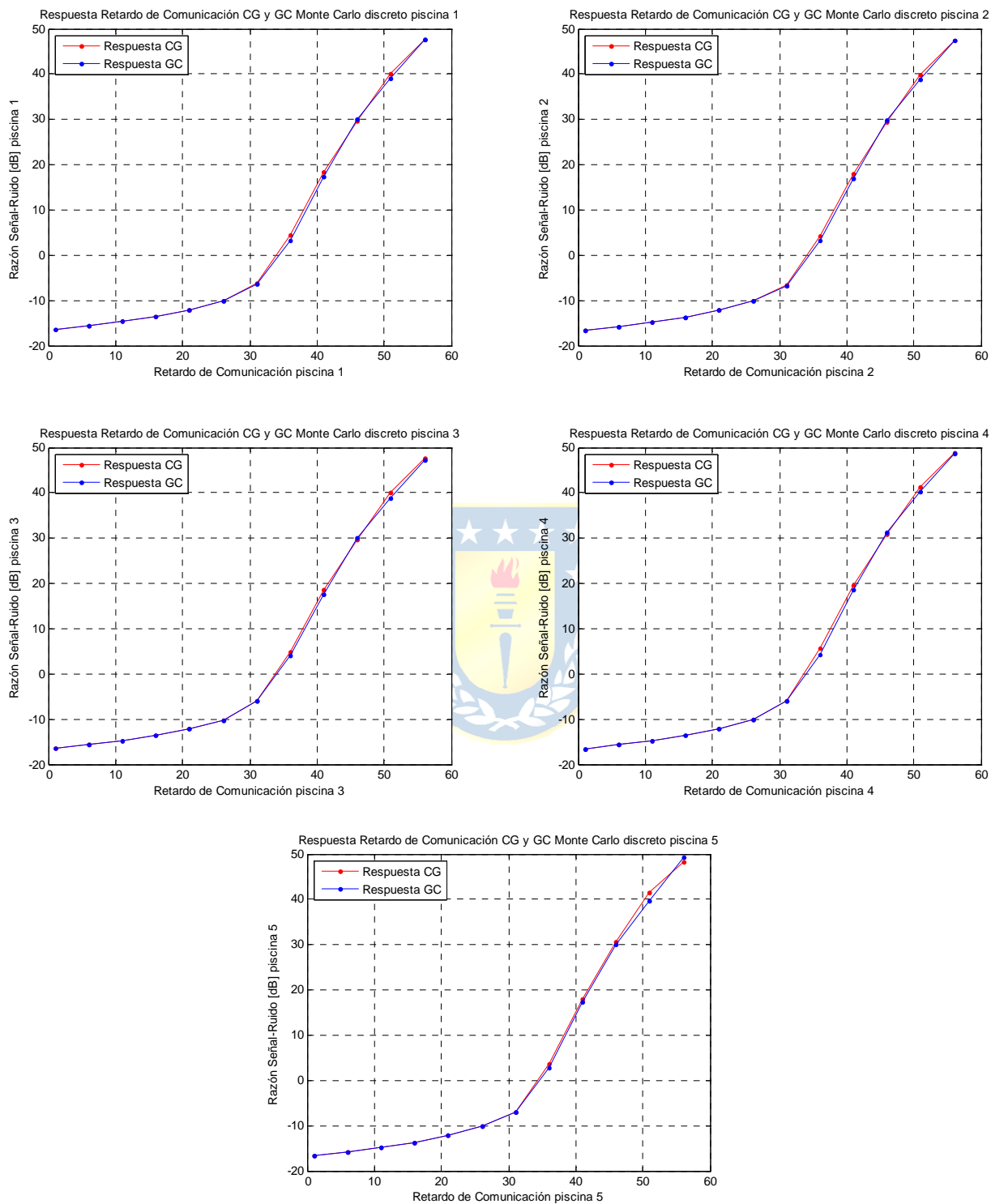


Fig. 5.10 SNR promedio de los canales de comunicación tipo CG y GC como función de t en tiempo discreto para 5 piscinas

Comentarios:

- A diferencia del caso continuo, se aprecian curvas similares para ambos casos (CG y GC) de canales de comunicación con retardo de transmisión.
- Las variaciones de SNR son similares en ambos casos y en todas las piscinas.
- Se aprecia que la variación de SNR para ambos casos y para todas las piscinas es prácticamente la misma, por lo que no hay una preferencia notoria entre las dos posibles ubicaciones estudiadas.



5.6. Escenarios de canales de comunicación con pérdida de paquetes

5.6.1 Escenario con canal de comunicación Controlador – Planta (tipo CG)

El Modelo Simulink correspondiente se muestra a continuación:

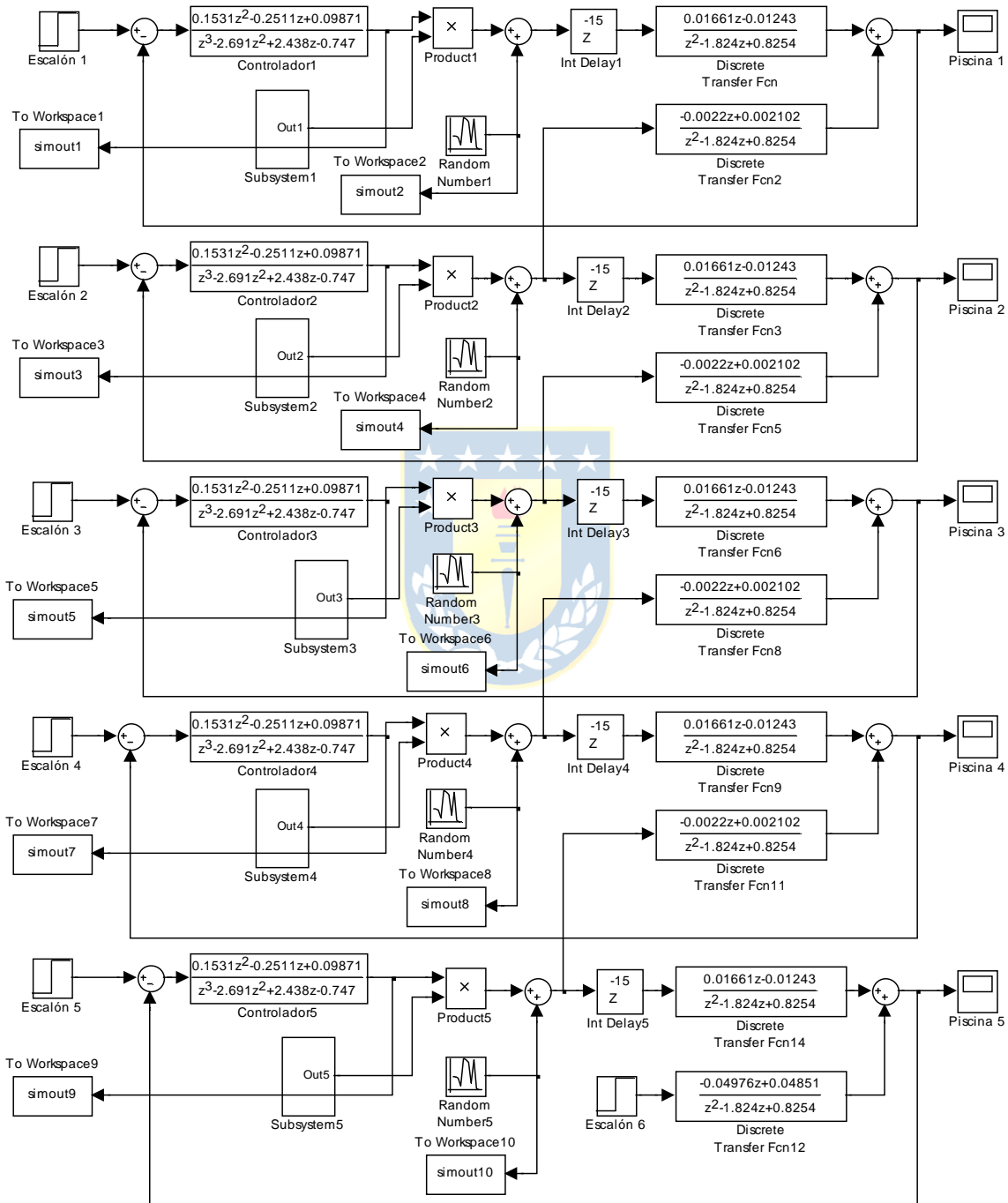


Fig. 5.11 Modelo de un canal de comunicación con pérdida de paquetes tipo CG en tiempo discreto para 5 piscinas

Luego, las gráficas correspondientes a las SNRs promedio de los canales de comunicación, para cada una de las 5 piscinas, son las siguientes:

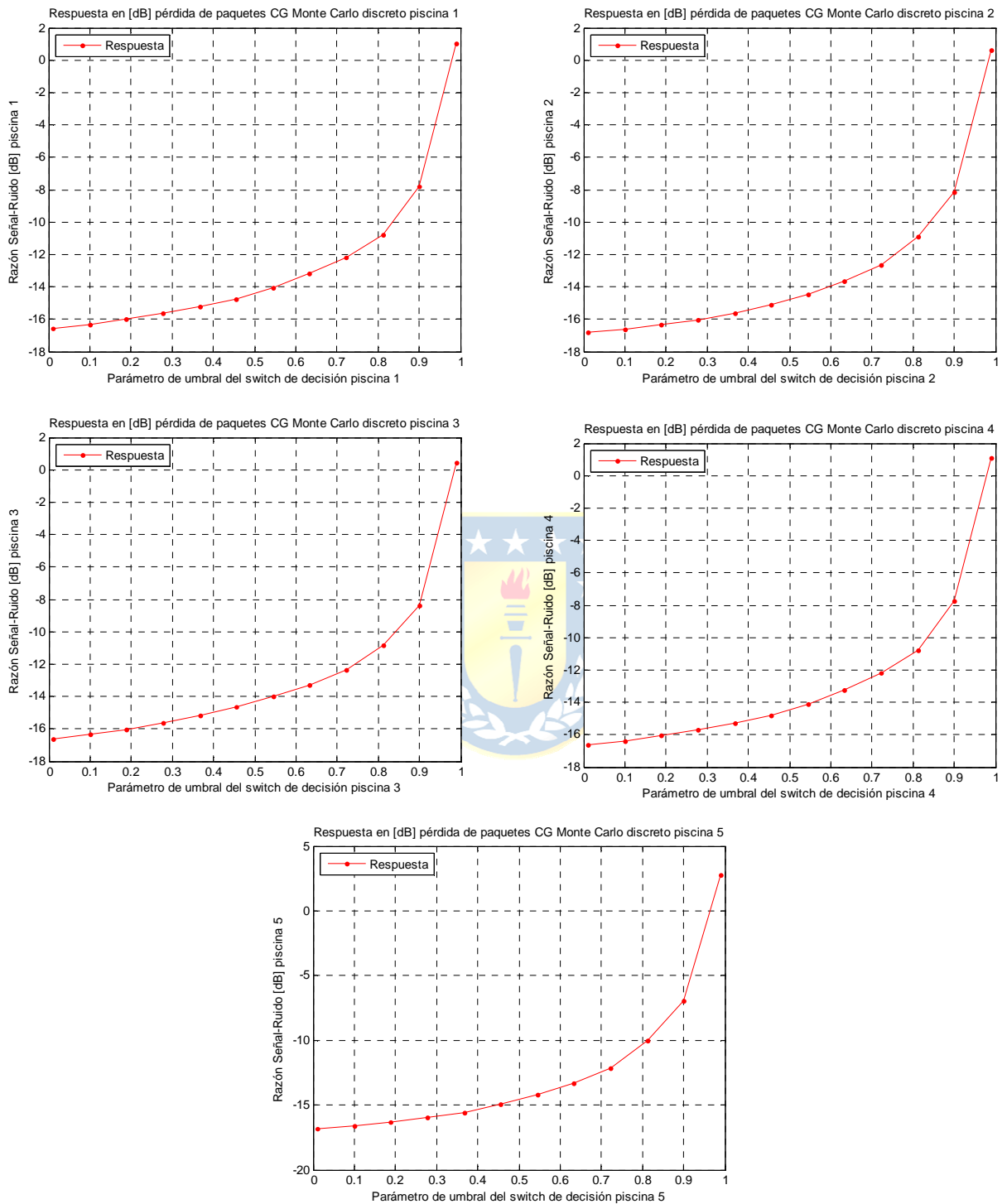


Fig. 5.12 SNR promedio de los canales de comunicación tipo CG como función de u en tiempo discreto para 5 piscinas

Comentarios:

- Este resultado muestra valores similares de SNR inicial.
- Se aprecia que todas las curvas muestran un comportamiento exponencial positivo.
- Todas las piscinas muestran una inestabilidad creciente al acercarse el valor del parámetro de comunicación a uno.
- El resultado obtenido es acorde a lo que la intuición sugiere, dado que al valer uno el parámetro de comunicación anteriormente mencionado, se abren los lazos de control y los modelos discretos se tornan inestables, debido a que los controladores en tiempo discreto y con $T = 1[\text{min}]$ contienen un integrador.



5.6.2 Escenario con canal de comunicación Planta – Controlador (tipo GC)

El Modelo Simulink correspondiente se muestra a continuación:

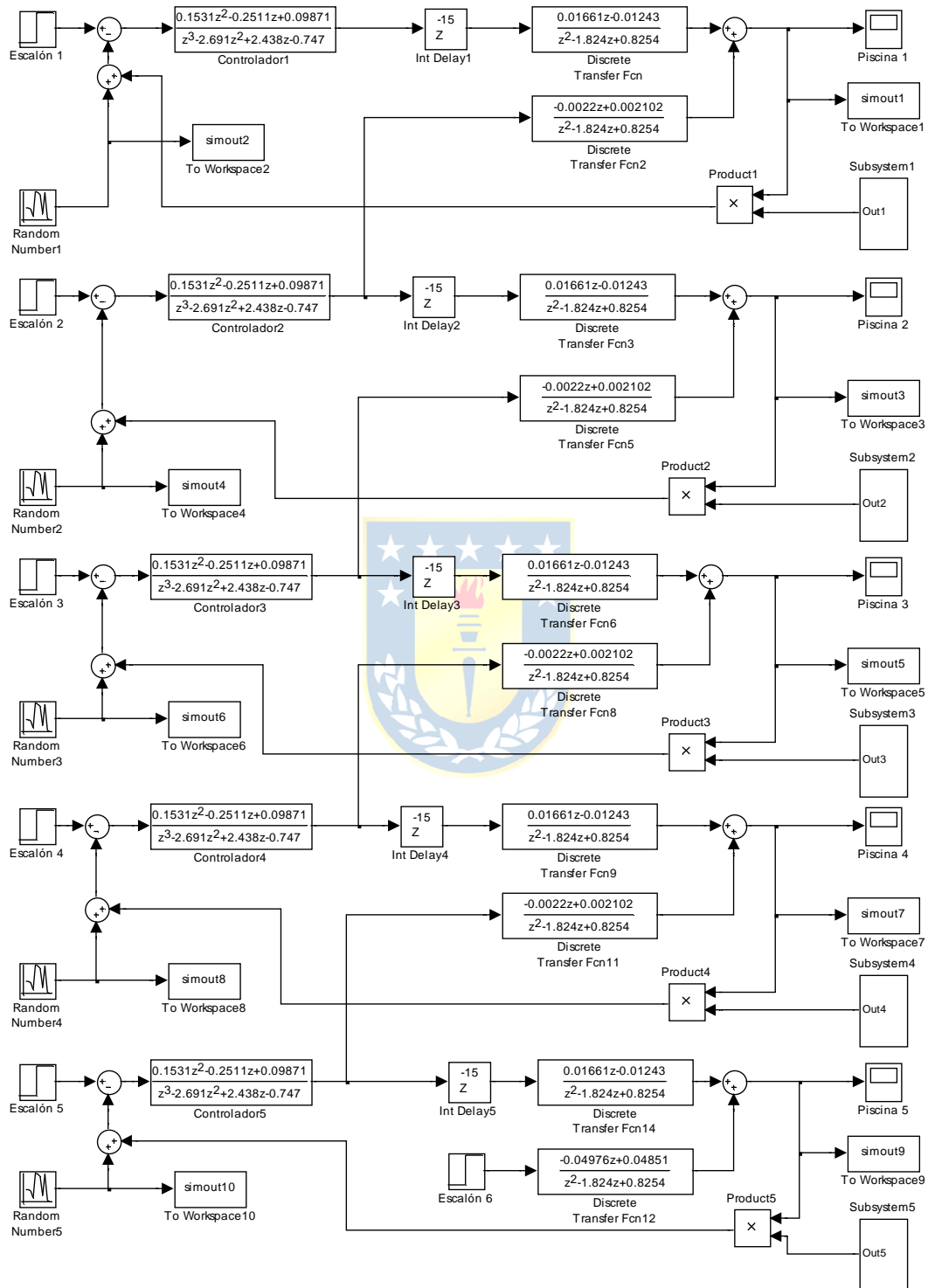


Fig. 5.13 Modelo de un canal de comunicación con pérdida de paquetes tipo GC en tiempo discreto para 5 piscinas

Luego, las gráficas correspondientes a las SNRs promedio de los canales de comunicación, para cada una de las 5 piscinas, son las siguientes:

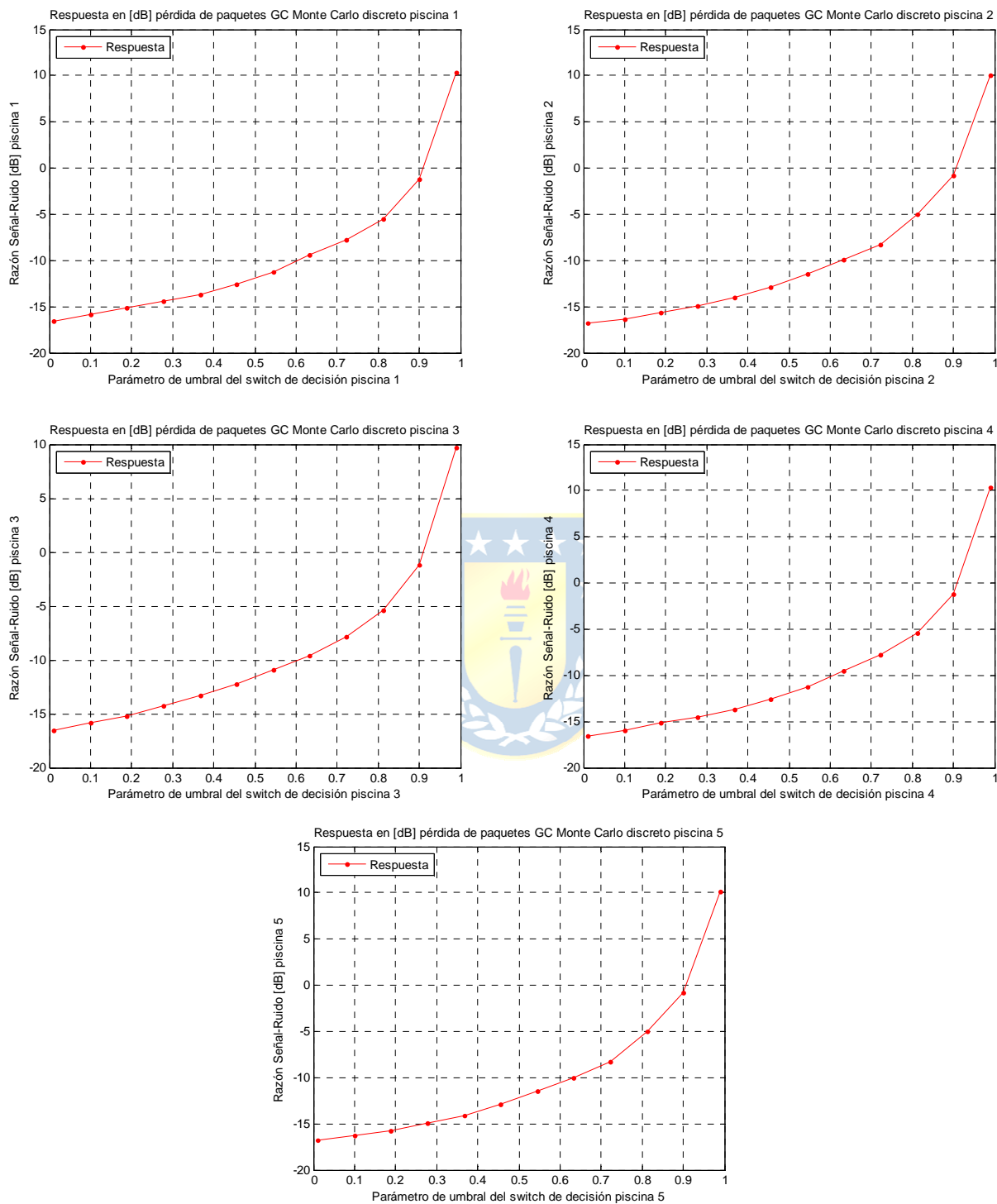


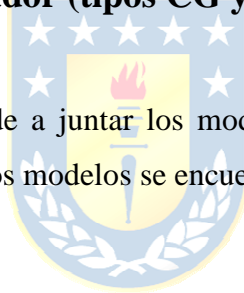
Fig. 5.14 SNR promedio de los canales de comunicación tipo GC como función de u en tiempo discreto para 5 piscinas

Comentarios:

- Este resultado muestra valores similares de SNR inicial al caso CG.
- Nuevamente, todas las curvas muestran un comportamiento exponencial positivo.
- Todas las piscinas muestran una inestabilidad creciente al acercarse el valor del parámetro de comunicación a uno, dado que se abren los lazos de control.
- Nuevamente, el resultado obtenido es acorde a lo que la intuición sugiere, ya que cada controlador contiene un integrador.

5.6.3 Comparación de escenarios con canal de comunicación Controlador – Planta y Planta – Controlador (tipos CG y GC)

El Modelo Simulink corresponde a juntar los modelos propuestos en 5.6.1 y 5.6.2 en un mismo archivo mdl, destacando que estos modelos se encuentran desacoplados en dicho archivo.



Luego, las gráficas correspondientes a las SNRs promedio de los canales de comunicación, para cada una de las 5 piscinas, son las siguientes:

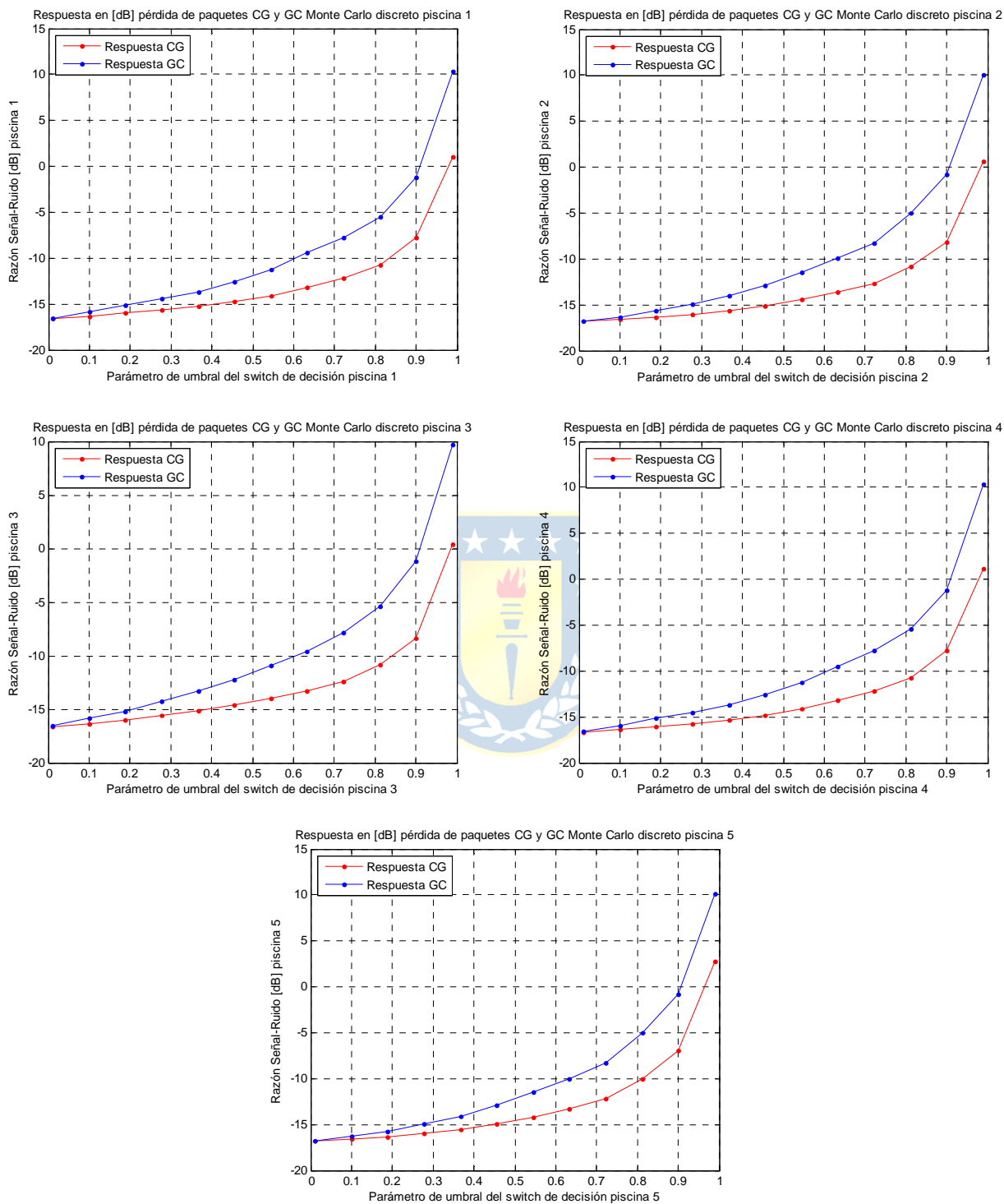


Fig. 5.15 SNR promedio de los canales de comunicación tipo CG y GC como función de u en tiempo discreto para 5 piscinas

Comentarios:

- Al comparar las curvas obtenidas del modelo de canal de comunicación con retardo de transmisión, se aprecia en ambos casos (CG y GC) el mismo valor de SNR inicial en todas las piscinas.
- El caso GC presenta una mayor variación de SNR en todas las piscinas, por ende, el canal de regadío en donde todos los canales de comunicación son GC, es más proclive a alcanzar la condición de inestabilidad al ir variando el parámetro de comunicación involucrado.
- Se aprecia que en todas las piscinas, los casos CG presentan una variación de SNR casi constante en todas las piscinas. Los casos GC también presentan el mismo valor de variación de SNR, a pesar que el valor de SNR de los 5 casos GC sea mayor que el valor visualizado para los 5 casos CG.



5.7. Escenarios de canales de comunicación de ganancia variable

5.7.1 Escenario con canal de comunicación Controlador – Planta (tipo CG)

El Modelo Simulink correspondiente se muestra a continuación:

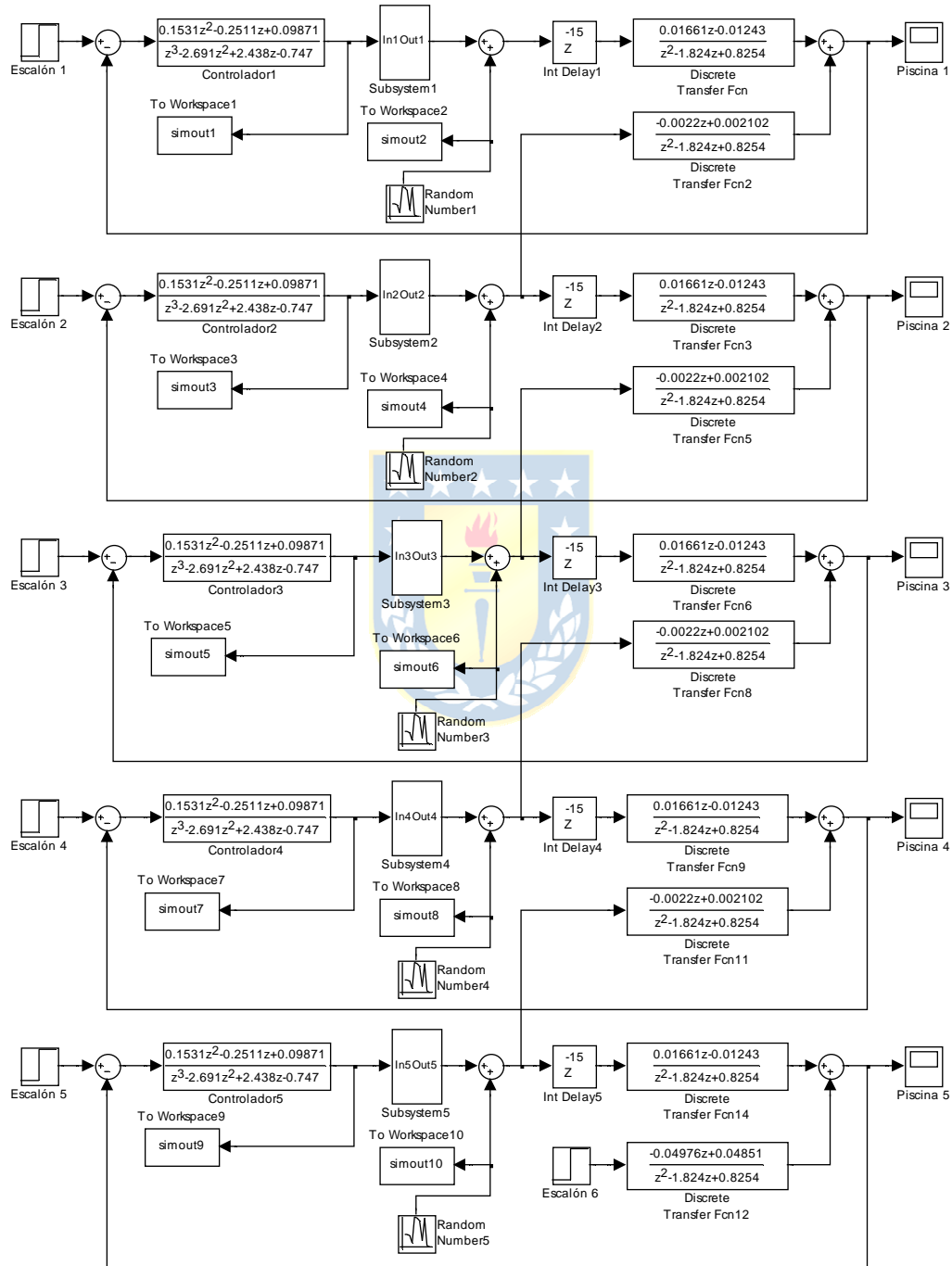


Fig. 5.16 Modelo de un canal de comunicación de ganancia variable tipo CG en tiempo discreto para 5 piscinas

Luego, las gráficas correspondientes a las SNRs promedio de los canales de comunicación, para cada una de las 5 piscinas, son las siguientes:

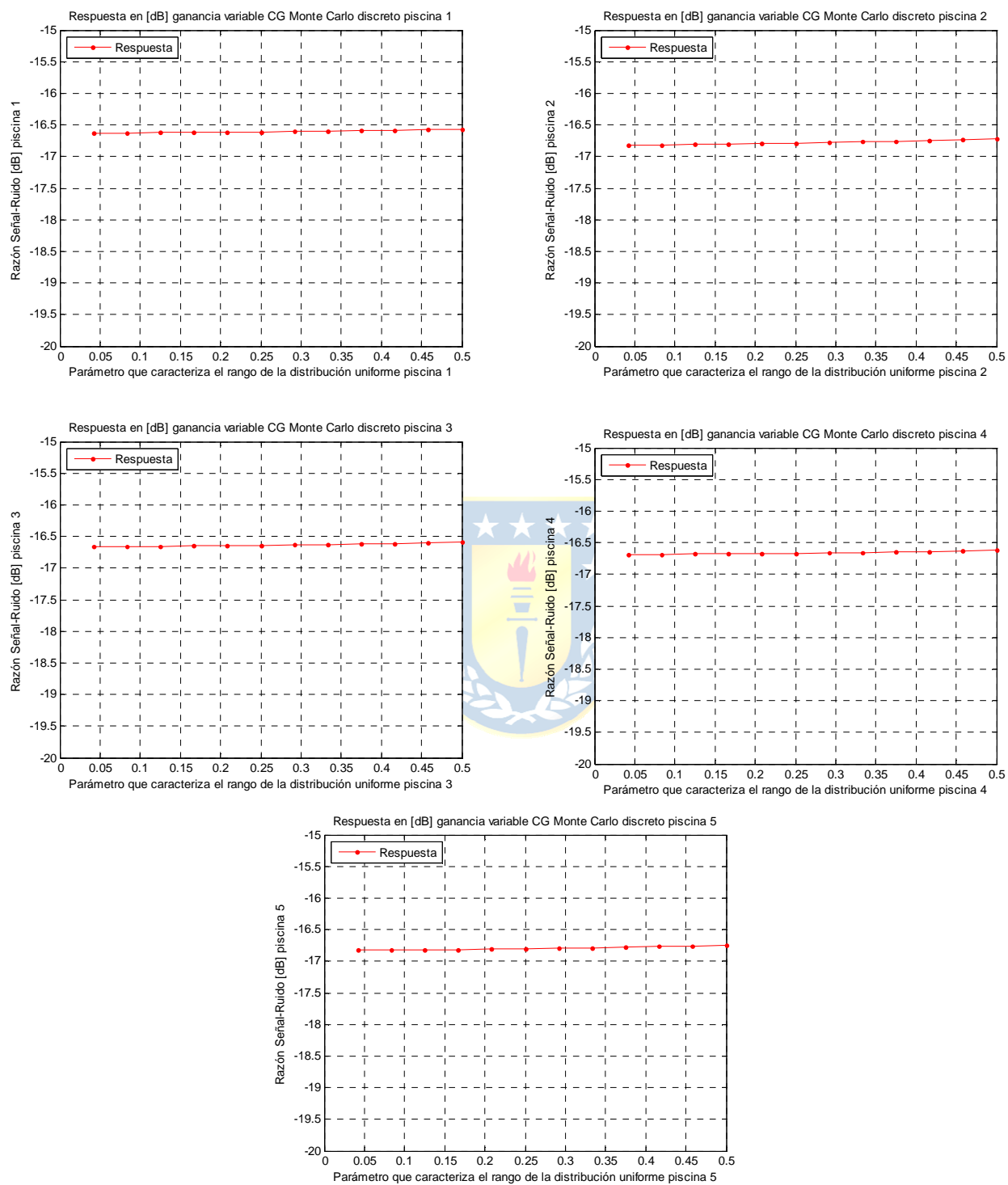


Fig. 5.17 SNR promedio de los canales de comunicación tipo CG como función de α en tiempo discreto para 5 piscinas

Comentarios:

- Este ejemplo sólo es válido en tiempo discreto.
- Este caso es poco sensible al valor de la ganancia variable máxima α .
- Todas las piscinas presentan un valor inicial de SNR muy similar.
- El resultado obtenido, si bien es cierto, es poco sensible a la variación del parámetro de comunicación aquí involucrado, no es una línea totalmente horizontal.
- Esto sugiere que los lazos de las cinco piscinas, son capaces de manejar en forma adecuada, la presencia de este aspecto idealizado de un canal de comunicación.



5.7.2 Escenario con canal de comunicación Planta – Controlador (tipo GC)

El Modelo Simulink correspondiente se muestra a continuación:

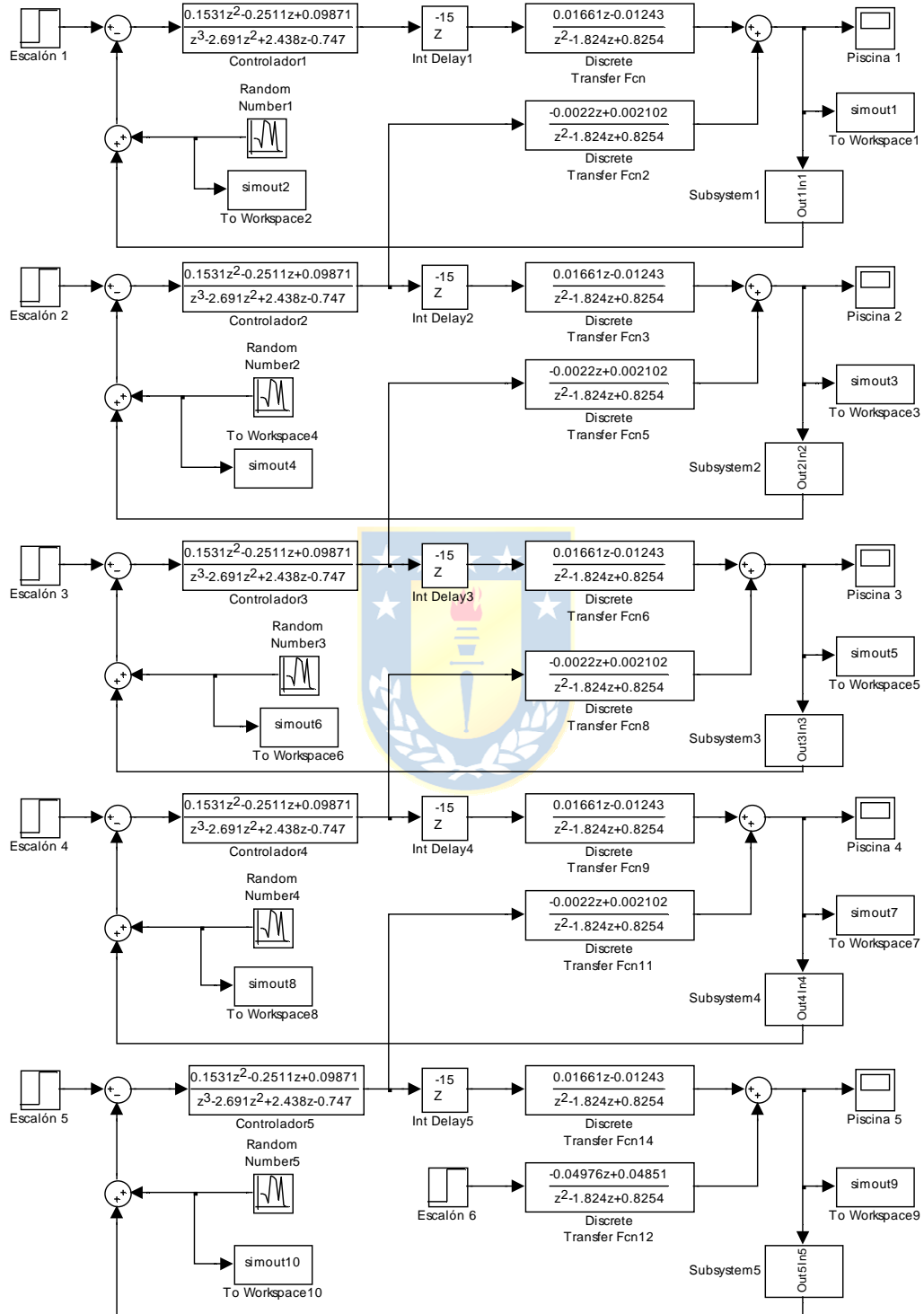


Fig. 5.18 Modelo de un canal de comunicación de ganancia variable tipo GC en tiempo discreto para 5 piscinas

Luego, las gráficas correspondientes a las SNRs promedio de los canales de comunicación, para cada una de las 5 piscinas, son las siguientes:

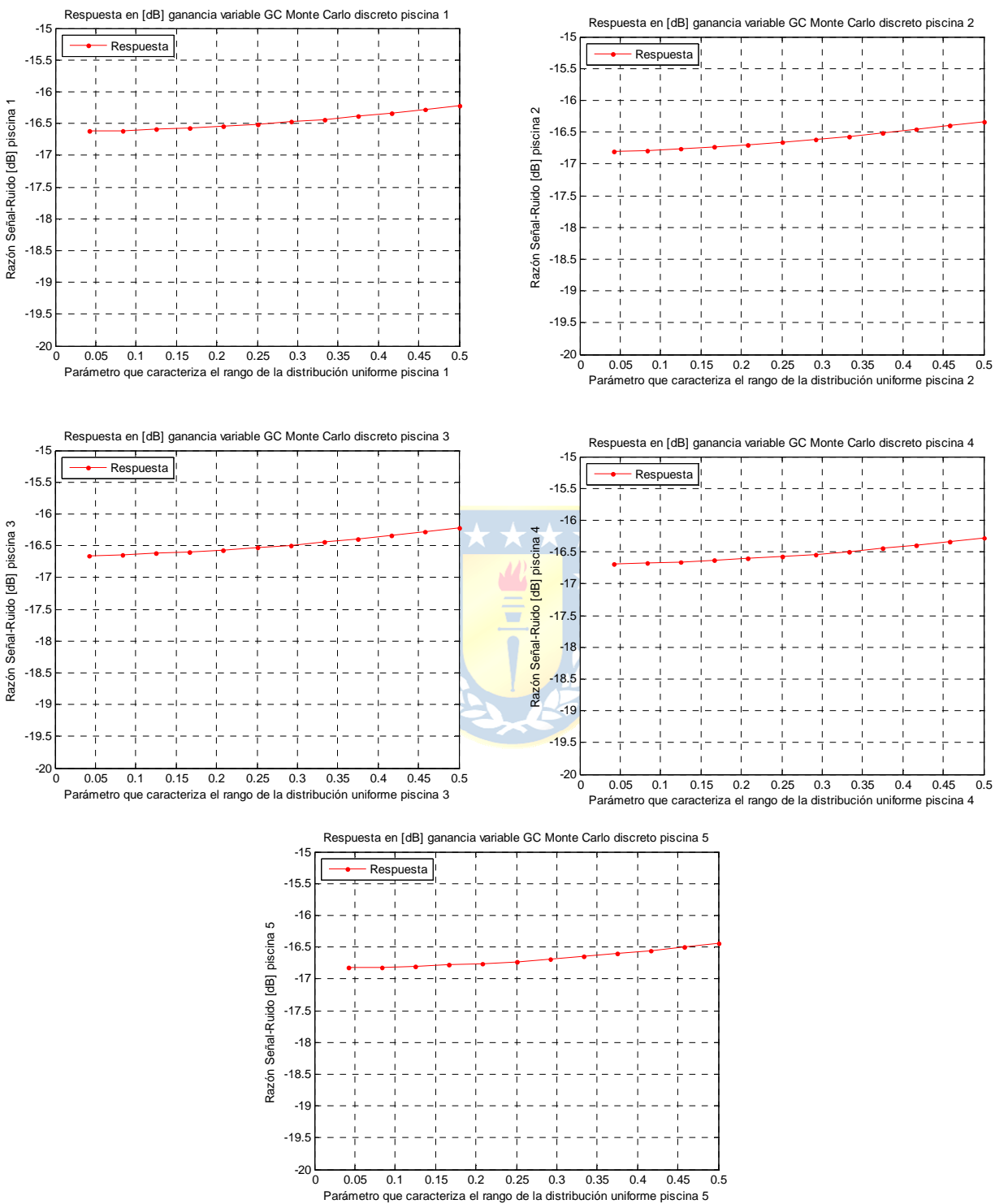


Fig. 5.19 SNR promedio de los canales de comunicación tipo GC como función de α en tiempo discreto para 5 piscinas

Comentarios:

- Este ejemplo sólo aplica en tiempo discreto y se parece al caso anterior.
- Este caso es poco sensible al valor de la ganancia variable máxima α .
- Todas las piscinas presentan un valor inicial de SNR muy similar.
- El resultado obtenido es poco sensible a la variación del parámetro de comunicación, pero no es una línea totalmente horizontal. Por otro lado, el rango de SNR es mayor para esta configuración que para el caso de la ubicación CG.
- Esto sugiere que los lazos de las cinco piscinas, son capaces de manejar en forma adecuada, la presencia de este aspecto idealizado de un canal de comunicación.

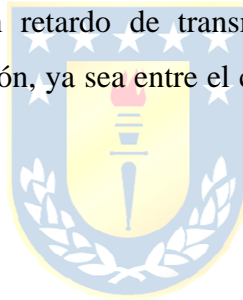


Capítulo 6. Conclusiones

6.1. Resumen

En un principio, se logró establecer las bases para lograr un entendimiento cabal de cada uno de los elementos aludidos a lo largo del trabajo (modelos de las plantas, controladores y modelos de canales de comunicación). Luego, estos elementos fueron interconectados para modelar un canal de regadío como la interacción entrada-salida de 5 piscinas conectadas físicamente en cascada.

Ahora bien, teniendo esto último en consideración, se procedió a realizar el análisis que es la esencia de este trabajo, el cual consiste en la aplicación del Método de Montecarlo a un canal de regadío tal como el mencionado anteriormente, sujeto a 4 tipos de canales de comunicación (2 de los 4 tipos de canales de comunicación en tiempo continuo y sujeto a los 4 tipos de canales de comunicación en tiempo discreto). Obteniéndose diversos resultados, acordes al tipo de canal de comunicación estudiado (AWGN, con retardo de transmisión, con pérdida de paquetes o de ganancia variable) y su modo de conexión, ya sea entre el controlador y la planta o entre la planta y el controlador.



6.2. Conclusiones

- La estrategia de control propuesta en el presente trabajo puede ser mejorada, por ende, se propone como alternativa diseñar en base a alguna de las estrategias de control más sofisticadas tales como: LQR, MPC o FLC.
- El fenómeno de comunicación tipo ruido aditivo (AWGN) tiene poco efecto en el desempeño cuantificado a través de SNR tanto para tiempo continuo como para el caso de tiempo discreto.
- En el caso del canal de comunicación con retardo de transmisión se concluye que, como la intuición lo sugiere, que al aumentar éste, se hace cada vez más difícil asegurar el control adecuado de los distintos niveles. Esto se observó claramente en el hecho que las SNR de cada piscina tendían a incrementarse en forma exponencial al aumentar el retardo. Nuevamente, esto fue visualizado en forma consistente, independientemente de la ubicación de los canales de comunicación, como del dominio del tiempo estudiado.

- El estudio del fenómeno de pérdidas de paquetes se relaciona con el uso de herramientas como la Internet para el control. Se concluye que a niveles bajos de pérdida de paquetes, la exigencia de SNR es pequeña, mientras que al tender a una pérdida de paquetes con probabilidad uno, entonces nuevamente se hace más difícil asegurar el control adecuado de los distintos niveles, dada la presencia de integración en los controladores.
- El fenómeno de ganancia variable resultó ser, después del caso de AWGN, el de menor exigencia en términos de SNR para los distintos canales de comunicación. Esto es positivo dado que este tipo de fenómeno se relaciona con transmisiones inalámbricas.
- Dependiendo de cual característica de comunicación sea la predominante, existe la posibilidad que una ubicación de los canales de comunicación (CG o GC) sea preferible.
- La ubicación de canales AWGN, junto con los modelos de canales de regadío aquí estudiados, resulta en valores de SNR muy similares (en torno a los -17[dB] en el caso discreto).
- En el caso de dominancia de retardo de transmisión resulta preferible, en tiempo continuo, ubicar los canales de comunicación entre la planta y el controlador (GC). Por otro lado, en tiempo discreto las ubicaciones CG o GC resultan en SNRs casi idénticas.
- Para el caso de pérdida de paquetes, se da la situación opuesta, es decir, que la ubicación de los canales de comunicación preferible es entre el controlador y la planta (CG).
- Finalmente, al considerar canales de comunicación con ganancia variable, se aprecia una diferencia mínima de SNR entre las ubicaciones CG y GC (en torno a los -16,5[dB]).

6.3. Trabajo Futuro

En lo referente a investigación, se propone realizar este mismo análisis, pero considerando un escenario de análisis más realista en el ámbito hidrológico, el cual se logra en gran parte modelando el transporte de agua a través de las ecuaciones de Saint-Venant. Además, sería un gran aporte a esta senda investigativa, abordar distintos tipos de compuertas con sus respectivas características, para así obtener representaciones cada vez más realistas de los canales de regadío automatizados. Luego, en el ámbito de la representación de modelos de canales de comunicación, se propone el considerar la presencia de un canal de comunicación con un determinado ancho de banda, junto con su respectiva cuantificación del desempeño en el control del sistema de regadío mediante la SNR.

En lo referente a desarrollo, es de suma importancia verificar los resultados obtenidos en este trabajo a través de una planta piloto ubicada en el Laboratorio de Control de Procesos del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción. Esta planta piloto debe ser implementada mediante sensores inalámbricos y controladores cableados a los motores que efectúen el movimiento de las compuertas.



Bibliografía

- [1] Michael Cantoni, Erik Weyer, Yuping Li, Su Ki Ooi, Iven Mareels and Matthew Ryan “*Control of Large-Scale Irrigation Networks*”, Proceedings of the IEEE. Vol. 95, No. 1, January 2007.
- [2] Carlos A. Sepúlveda T., “*Modelación Dinámica y Control con restricciones de sistemas de Canales de Regadío*”, Memoria de Título, Ingeniero Civil Electrónico, Abril 2002, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción.
- [3] Apuntes de la asignatura de pregrado “*Sistemas de Control - 543244*”, disponibles en la página personal del Profesor José R. Espinoza C. Sección Asignaturas, <http://www2.udec.cl/jose.espinoza/asignaturas.html>. Departamento de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción.
- [4] João P. Hespanha, Payam Naghshtabrizi and Yonggang Xu “*A Survey of Recent Results in Networked Control Systems*”, Proceedings of the IEEE. Vol. 95, No 1, January 2007.
- [5] J. Schuurmans, A. J. Clemmens, S. Dijkstra, A. Hof and R. Brouwer “*Modelling of Irrigation and Drainage Canals for Controller Design*”, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, November/December 1999.
- [6] Julio H. Braslavsky, Richard H. Middleton, James S. Freudenberg “*Feedback Stabilization Over Signal-to-Noise Ratio Constrained Channels*”, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 52, No 8, August 2007.
- [7] Richard H. Middleton & Julio H. Braslavsky “*String Instability in Classes of Linear Time Invariant Formation Control With Limited Communication Range*”, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 55, No 7, July 2010.
- [8] Cover, T.M. and Thomas, J.A., “*Elements of Information Theory*”, Second Edition. John Wiley and Sons, 1991.
- [9] Fishman, G. S. (1995). “*Monte Carlo: Concepts, Algorithms, and Applications*”, New York: Springer.
- [10] Apuntes Sistemas Digitales de Comunicaciones Capítulos 1, 2, 3 y 4. Jorge Agüero. Departamento de Ingeniería Electrónica, Vicerrectorado Barquisimeto de Venezuela, Universidad Nacional Experimental Politécnica “Antonio José de Sucre”.
<http://www.el.bqto.unexpo.edu.ve/jaguero/docs/commII/capitulo1.pdf>
<http://www.el.bqto.unexpo.edu.ve/jaguero/docs/commII/capitulo2.pdf>

<http://www.el.bqto.unexpo.edu.ve/jaguero/docs/commII/capitulo3.pdf>

<http://www.el.bqto.unexpo.edu.ve/jaguero/docs/commII/capitulo4.pdf>.

- [11] Apuntes Sistemas de Comunicaciones Cod. 549164, Primera Edición 13 de septiembre de 2010, disponibles en la página personal del profesor Sebastián E. Godoy M. Sección Teaching (in spanish), <http://www2.udec.cl/~segodoy/teaching.html>. Departamento de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción.
- [12] Apuntes Comunicaciones Digitales Cod. 549175, Tercera Edición 23 de julio de 2010, disponibles en la página personal del profesor Sebastián E. Godoy M. Sección Teaching (in spanish), <http://www2.udec.cl/~segodoy/teaching.html>. Departamento de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción.
- [13] Yuping Li, Michael Cantoni, Erik Weyer “*On Water-Level Error Propagation in Controlled Irrigation Channels*”, Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control, and the European Control Conference 2005. Seville, Spain, December 12-15, 2005.
- [14] Xavier Litrico, Vincent Fromion, “*Modeling and Control of Hydrosystems*”, First Edition. Springer, 2009.
- [15] Apuntes de “*Teoría de la Comunicación*”, pertenecientes a la página web personal de Carles Xavier Munyoz Baldó, www.ctv.es/USERS/carles/PROYECTO/cap1/cap1.html. Ingeniero Superior en Informática de la Universidad Politécnica de Alicante.
- [16] Apuntes de la asignatura de pregrado “*Sistemas Lineales Dinámicos - 543214*”, disponibles en la página personal del Profesor José R. Espinoza C. Sección Asignaturas, <http://www2.udec.cl/jose.espinoza/asignaturas.html>. Departamento de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción.

Anexo A. Códigos Fuente

A.1. Script discreto_correcto_d2d.m

```

%discreto_correcto_d2d

%Inicialización de variables
clear all; close all; clc

k=10; % Valor escogido arbitrariamente
alpha=1.191/k;
beta=-0.9994/k;
gamma=-0.1122;

C15=tf(conv(k,[alpha beta]),conv([1 -1],[1 -gamma]),15)
C1=d2d(C15,1)
polosLC=zpk(tf(1,conv([1 -1.1 0.3],[1 -0.7]),15)) %Polos deseados
en L.C. en 0.5, 0.6 y 0.7

g1_15min=tf([0.31253 0.020021],[1 -0.97386 0.056245],15) %B/A
g1_15min_zpk=zpk(g1_15min)
g1_15min_dc=evalfr(g1_15min,1) %g1_15min_dc =
4.0365

g1_1min=d2d(g1_15min,1)
g1_1min_zpk=zpk(g1_1min)
glaprox_15min=tf(0.31253,[1 -0.9122],15) %o bien
glaprox_15min=minreal(g1_15min,0.1182)
glaprox_15min_dc=evalfr(glaprox_15min,1) %glaprox_15min_dc
= 3.5596

glaprox_1min=d2d(glaprox_15min,1)
glaprox_ajustado_15min=tf(g1_15min_dc/glaprox_15min_dc*0.31253,[1 -0.9122],15)
glaprox_ajustado_1min=d2d(glaprox_ajustado_15min,1)

%Realimentación, polos en L.C. y gráficos
Taprox15=feedback(C15*glaprox_15min,1)
temp=pole(Taprox15)
Tp=abs(temp)
Taprox1=feedback(C1*glaprox_1min,1)
temp1=pole(Taprox1)
Tp1=abs(temp1)
[Y1,T1]=step(glaprox_ajustado_15min);
[Y2,T2]=step(g1_15min);
[Y3,T3]=step(glaprox_15min);
figure(1); stairs(T1,Y1,'b'); hold on; stairs(T2,Y2,'g'); hold on;
stairs(T3,Y3,'r'); grid on
title('Respuesta a escalón unitario y ajuste de ganancia del controlador
discreto con T=15 [min]')
xlabel('Tiempo [min]')
ylabel('Altura de la piscina [m]')
legend('glaprox ajustado 15min','g1 15min','glaprox
15min','Location','NorthEast')
[Y4,T4]=step(glaprox_ajustado_1min);

```

```
[Y5,T5]=step(g1_lmin);
[Y6,T6]=step(glaprox_lmin);
figure(2); stairs(T4,Y4,'b'); hold on; stairs(T5,Y5,'g'); hold on;
stairs(T6,Y6,'r'); grid on
title('Respuesta a escalón unitario y ajuste de ganancia del controlador
discreto con T=1 [min]')
xlabel('Tiempo [min]')
ylabel('Altura de la piscina [m]')
legend('glaprox ajustado lmin','g1 lmin','glaprox lmin','Location','NorthEast')
[Y7,T7]=step(Taprox15);
[Y8,T8]=step(Taprox1);
figure(3); stairs(T7,Y7,'b'); hold on; stairs(T8,Y8,'g'); grid on
title('Respuesta del nivel de la piscina operando en L.C. para T=15 [min] y T=1
[min]')
xlabel('Tiempo [min]')
ylabel('Altura de la piscina [m]')
legend('Respuesta a escalón para T=15 [min]','Respuesta a escalón para T=1
[min]','Location','NorthEast')
```



A.2. Script continuo_AWGN_CG_SNR.m

```

%continuo_AWGN_CG_SNR

%Inicialización de variables
clear all; close all; clc

open_system('continuo_AWGN_CG_SNR.mdl')
for m=1:100,
    m
    for v=1:12,
        v
        set_param('continuo_AWGN_CG_SNR/Random Number1','Seed','15*(m-1)')
        set_param('continuo_AWGN_CG_SNR/Random Number2','Seed','15*(m-1)+10')
        set_param('continuo_AWGN_CG_SNR/Random Number3','Seed','15*(m-1)+20')
        set_param('continuo_AWGN_CG_SNR/Random Number4','Seed','15*(m-1)+30')
        set_param('continuo_AWGN_CG_SNR/Random Number5','Seed','15*(m-1)+40')
        set_param('continuo_AWGN_CG_SNR/Random Number1','Variance','0.1+(10-
0.1)/(12-1)*(v-1)')
        set_param('continuo_AWGN_CG_SNR/Random Number2','Variance','0.1+(10-
0.1)/(12-1)*(v-1)')
        set_param('continuo_AWGN_CG_SNR/Random Number3','Variance','0.1+(10-
0.1)/(12-1)*(v-1)')
        set_param('continuo_AWGN_CG_SNR/Random Number4','Variance','0.1+(10-
0.1)/(12-1)*(v-1)')
        set_param('continuo_AWGN_CG_SNR/Random Number5','Variance','0.1+(10-
0.1)/(12-1)*(v-1)')
        sim('continuo_AWGN_CG_SNR.mdl')
        S1=var(simout1);
        N1=var(simout2);
        S2=var(simout3);
        N2=var(simout4);
        S3=var(simout5);
        N3=var(simout6);
        S4=var(simout7);
        N4=var(simout8);
        S5=var(simout9);
        N5=var(simout10);
        SNR1(m,v)=S1/N1;
        SNR2(m,v)=S2/N2;
        SNR3(m,v)=S3/N3;
        SNR4(m,v)=S4/N4;
        SNR5(m,v)=S5/N5;
    end
end
save_system('continuo_AWGN_CG_SNR.mdl')
close_system('continuo_AWGN_CG_SNR.mdl')
SNRprod1=sum(SNR1,1)/m;
SNRprod2=sum(SNR2,1)/m;
SNRprod3=sum(SNR3,1)/m;
SNRprod4=sum(SNR4,1)/m;
SNRprod5=sum(SNR5,1)/m;
SNRprod1_dB=10*log10(SNRprod1);
SNRprod2_dB=10*log10(SNRprod2);
SNRprod3_dB=10*log10(SNRprod3);
SNRprod4_dB=10*log10(SNRprod4);

```

```

SNRprod5_dB=10*log10(SNRprod5);
v_aux1=0.1:(10-0.1)/(12-1):0.1+(10-0.1)/(12-1)*(v-1);
v_aux2=0.1:(10-0.1)/(12-1):0.1+(10-0.1)/(12-1)*(v-1);
v_aux3=0.1:(10-0.1)/(12-1):0.1+(10-0.1)/(12-1)*(v-1);
v_aux4=0.1:(10-0.1)/(12-1):0.1+(10-0.1)/(12-1)*(v-1);
v_aux5=0.1:(10-0.1)/(12-1):0.1+(10-0.1)/(12-1)*(v-1);
figure(1); plot(v_aux1,SNRprod1_dB,'r.-'); grid on
title('Respuesta AWGN CG Monte Carlo continuo piscina 1')
xlabel('Varianza del AWGN piscina 1')
ylabel('Razón Señal-Ruido [dB] piscina 1')
legend('Respuesta','Location','NorthWest')
axis([0 10 -20 -15])
figure(2); plot(v_aux2,SNRprod2_dB,'r.-'); grid on
title('Respuesta AWGN CG Monte Carlo continuo piscina 2')
xlabel('Varianza del AWGN piscina 2')
ylabel('Razón Señal-Ruido [dB] piscina 2')
legend('Respuesta','Location','NorthWest')
axis([0 10 -20 -15])
figure(3); plot(v_aux3,SNRprod3_dB,'r.-'); grid on
title('Respuesta AWGN CG Monte Carlo continuo piscina 3')
xlabel('Varianza del AWGN piscina 3')
ylabel('Razón Señal-Ruido [dB] piscina 3')
legend('Respuesta','Location','NorthWest')
axis([0 10 -25 -20])
figure(4); plot(v_aux4,SNRprod4_dB,'r.-'); grid on
title('Respuesta AWGN CG Monte Carlo continuo piscina 4')
xlabel('Varianza del AWGN piscina 4')
ylabel('Razón Señal-Ruido [dB] piscina 4')
legend('Respuesta','Location','NorthWest')
axis([0 10 -30 -25])
figure(5); plot(v_aux5,SNRprod5_dB,'r.-'); grid on
title('Respuesta AWGN CG Monte Carlo continuo piscina 5')
xlabel('Varianza del AWGN piscina 5')
ylabel('Razón Señal-Ruido [dB] piscina 5')
legend('Respuesta','Location','NorthWest')
axis([0 10 -35 -30])

```

A.3. Script continuo_AWGN_GC_SNR.m

```

%continuo_AWGN_GC_SNR

%Inicialización de variables
clear all; close all; clc

open_system('continuo_AWGN_GC_SNR.mdl')
for m=1:100,
    m
    for v=1:12,
        v
        set_param('continuo_AWGN_GC_SNR/Random Number1','Seed','15*(m-1)')
        set_param('continuo_AWGN_GC_SNR/Random Number2','Seed','15*(m-1)+10')
        set_param('continuo_AWGN_GC_SNR/Random Number3','Seed','15*(m-1)+20')
        set_param('continuo_AWGN_GC_SNR/Random Number4','Seed','15*(m-1)+30')
        set_param('continuo_AWGN_GC_SNR/Random Number5','Seed','15*(m-1)+40')
        set_param('continuo_AWGN_GC_SNR/Random Number1','Variance','0.1+(10-
0.1)/(12-1)*(v-1)')
        set_param('continuo_AWGN_GC_SNR/Random Number2','Variance','0.1+(10-
0.1)/(12-1)*(v-1)')
        set_param('continuo_AWGN_GC_SNR/Random Number3','Variance','0.1+(10-
0.1)/(12-1)*(v-1)')
        set_param('continuo_AWGN_GC_SNR/Random Number4','Variance','0.1+(10-
0.1)/(12-1)*(v-1)')
        set_param('continuo_AWGN_GC_SNR/Random Number5','Variance','0.1+(10-
0.1)/(12-1)*(v-1)')
        sim('continuo_AWGN_GC_SNR.mdl')
        S1=var(simout1);
        N1=var(simout2);
        S2=var(simout3);
        N2=var(simout4);
        S3=var(simout5);
        N3=var(simout6);
        S4=var(simout7);
        N4=var(simout8);
        S5=var(simout9);
        N5=var(simout10);
        SNR1(m,v)=S1/N1;
        SNR2(m,v)=S2/N2;
        SNR3(m,v)=S3/N3;
        SNR4(m,v)=S4/N4;
        SNR5(m,v)=S5/N5;
    end
end
save_system('continuo_AWGN_GC_SNR.mdl')
close_system('continuo_AWGN_GC_SNR.mdl')
SNRprod1=sum(SNR1,1)/m;
SNRprod2=sum(SNR2,1)/m;
SNRprod3=sum(SNR3,1)/m;
SNRprod4=sum(SNR4,1)/m;
SNRprod5=sum(SNR5,1)/m;
SNRprod1_dB=10*log10(SNRprod1);
SNRprod2_dB=10*log10(SNRprod2);
SNRprod3_dB=10*log10(SNRprod3);
SNRprod4_dB=10*log10(SNRprod4);

```



```

SNRprod5_dB=10*log10(SNRprod5);
v_aux1=0.1:(10-0.1)/(12-1):0.1+(10-0.1)/(12-1)*(v-1);
v_aux2=0.1:(10-0.1)/(12-1):0.1+(10-0.1)/(12-1)*(v-1);
v_aux3=0.1:(10-0.1)/(12-1):0.1+(10-0.1)/(12-1)*(v-1);
v_aux4=0.1:(10-0.1)/(12-1):0.1+(10-0.1)/(12-1)*(v-1);
v_aux5=0.1:(10-0.1)/(12-1):0.1+(10-0.1)/(12-1)*(v-1);
figure(1); plot(v_aux1,SNRprod1_dB,'r.-'); grid on
title('Respuesta AWGN GC Monte Carlo continuo piscina 1')
xlabel('Varianza del AWGN piscina 1')
ylabel('Razón Señal-Ruido [dB] piscina 1')
legend('Respuesta','Location','NorthWest')
axis([0 10 -20 -15])
figure(2); plot(v_aux2,SNRprod2_dB,'r.-'); grid on
title('Respuesta AWGN GC Monte Carlo continuo piscina 2')
xlabel('Varianza del AWGN piscina 2')
ylabel('Razón Señal-Ruido [dB] piscina 2')
legend('Respuesta','Location','NorthWest')
axis([0 10 -20 -15])
figure(3); plot(v_aux3,SNRprod3_dB,'r.-'); grid on
title('Respuesta AWGN GC Monte Carlo continuo piscina 3')
xlabel('Varianza del AWGN piscina 3')
ylabel('Razón Señal-Ruido [dB] piscina 3')
legend('Respuesta','Location','NorthWest')
axis([0 10 -25 -20])
figure(4); plot(v_aux4,SNRprod4_dB,'r.-'); grid on
title('Respuesta AWGN GC Monte Carlo continuo piscina 4')
xlabel('Varianza del AWGN piscina 4')
ylabel('Razón Señal-Ruido [dB] piscina 4')
legend('Respuesta','Location','NorthWest')
axis([0 10 -30 -25])
figure(5); plot(v_aux5,SNRprod5_dB,'r.-'); grid on
title('Respuesta AWGN GC Monte Carlo continuo piscina 5')
xlabel('Varianza del AWGN piscina 5')
ylabel('Razón Señal-Ruido [dB] piscina 5')
legend('Respuesta','Location','NorthWest')
axis([0 10 -35 -30])

```

A.4. Script continuo_ret_com_CG_SNR.m

```

%continuo_ret_com_CG_SNR

%Inicialización de variables
clear all; close all; clc

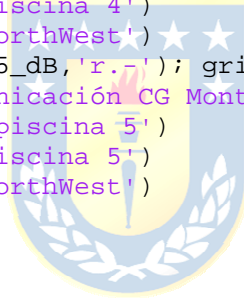
open_system('continuo_ret_com_CG_SNR.mdl')
for m=1:100,
    m
    for t=1:12,
        t
        set_param('continuo_ret_com_CG_SNR/retcom1','Delay','0.01+(10-0.01)/(12-1)*(t-1)')
        set_param('continuo_ret_com_CG_SNR/retcom2','Delay','0.01+(10-0.01)/(12-1)*(t-1)')
        set_param('continuo_ret_com_CG_SNR/retcom3','Delay','0.01+(10-0.01)/(12-1)*(t-1)')
        set_param('continuo_ret_com_CG_SNR/retcom4','Delay','0.01+(10-0.01)/(12-1)*(t-1)')
        set_param('continuo_ret_com_CG_SNR/retcom5','Delay','0.01+(10-0.01)/(12-1)*(t-1)')
        set_param('continuo_ret_com_CG_SNR/Random Number1','Seed','15*(m-1)')
        set_param('continuo_ret_com_CG_SNR/Random Number2','Seed','15*(m-1)+10')
        set_param('continuo_ret_com_CG_SNR/Random Number3','Seed','15*(m-1)+20')
        set_param('continuo_ret_com_CG_SNR/Random Number4','Seed','15*(m-1)+30')
        set_param('continuo_ret_com_CG_SNR/Random Number5','Seed','15*(m-1)+40')
        sim('continuo_ret_com_CG_SNR.mdl')
        S1=var(simout1);
        N1=var(simout2);
        S2=var(simout3);
        N2=var(simout4);
        S3=var(simout5);
        N3=var(simout6);
        S4=var(simout7);
        N4=var(simout8);
        S5=var(simout9);
        N5=var(simout10);
        SNR1(m,t)=S1/N1;
        SNR2(m,t)=S2/N2;
        SNR3(m,t)=S3/N3;
        SNR4(m,t)=S4/N4;
        SNR5(m,t)=S5/N5;
    end
end
save_system('continuo_ret_com_CG_SNR.mdl')
close_system('continuo_ret_com_CG_SNR.mdl')
SNRprod1=sum(SNR1,1)/m;
SNRprod2=sum(SNR2,1)/m;
SNRprod3=sum(SNR3,1)/m;
SNRprod4=sum(SNR4,1)/m;
SNRprod5=sum(SNR5,1)/m;
SNRprod1_dB=10*log10(SNRprod1);
SNRprod2_dB=10*log10(SNRprod2);
SNRprod3_dB=10*log10(SNRprod3);
SNRprod4_dB=10*log10(SNRprod4);

```

```

SNRprod5_dB=10*log10(SNRprod5);
tau_aux1=0.01:(10-0.01)/(12-1):0.01+(10-0.01)/(12-1)*(t-1);
tau_aux2=0.01:(10-0.01)/(12-1):0.01+(10-0.01)/(12-1)*(t-1);
tau_aux3=0.01:(10-0.01)/(12-1):0.01+(10-0.01)/(12-1)*(t-1);
tau_aux4=0.01:(10-0.01)/(12-1):0.01+(10-0.01)/(12-1)*(t-1);
tau_aux5=0.01:(10-0.01)/(12-1):0.01+(10-0.01)/(12-1)*(t-1);
figure(1); plot(tau_aux1,SNRprod1_dB,'r.-'); grid on
title('Respuesta Retardo de Comunicación CG Monte Carlo continuo piscina 1')
xlabel('Retardo de Comunicación piscina 1')
ylabel('Razón Señal-Ruido [dB] piscina 1')
legend('Respuesta','Location','NorthWest')
figure(2); plot(tau_aux2,SNRprod2_dB,'r.-'); grid on
title('Respuesta Retardo de Comunicación CG Monte Carlo continuo piscina 2')
xlabel('Retardo de Comunicación piscina 2')
ylabel('Razón Señal-Ruido [dB] piscina 2')
legend('Respuesta','Location','NorthWest')
figure(3); plot(tau_aux3,SNRprod3_dB,'r.-'); grid on
title('Respuesta Retardo de Comunicación CG Monte Carlo continuo piscina 3')
xlabel('Retardo de Comunicación piscina 3')
ylabel('Razón Señal-Ruido [dB] piscina 3')
legend('Respuesta','Location','NorthWest')
figure(4); plot(tau_aux4,SNRprod4_dB,'r.-'); grid on
title('Respuesta Retardo de Comunicación CG Monte Carlo continuo piscina 4')
xlabel('Retardo de Comunicación piscina 4')
ylabel('Razón Señal-Ruido [dB] piscina 4')
legend('Respuesta','Location','NorthWest')
figure(5); plot(tau_aux5,SNRprod5_dB,'r.-'); grid on
title('Respuesta Retardo de Comunicación CG Monte Carlo continuo piscina 5')
xlabel('Retardo de Comunicación piscina 5')
ylabel('Razón Señal-Ruido [dB] piscina 5')
legend('Respuesta','Location','NorthWest')

```



A.5. Script continuo_ret_com_GC_SNR.m

```

%continuo_ret_com_GC_SNR

%Inicialización de variables
clear all; close all; clc

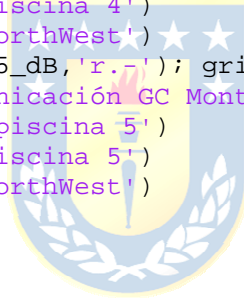
open_system('continuo_ret_com_GC_SNR.mdl')
for m=1:100,
    m
    for t=1:12,
        t
        set_param('continuo_ret_com_GC_SNR/retcom1','Delay','0.01+(10-0.01)/(12-1)*(t-1)')
        set_param('continuo_ret_com_GC_SNR/retcom2','Delay','0.01+(10-0.01)/(12-1)*(t-1)')
        set_param('continuo_ret_com_GC_SNR/retcom3','Delay','0.01+(10-0.01)/(12-1)*(t-1)')
        set_param('continuo_ret_com_GC_SNR/retcom4','Delay','0.01+(10-0.01)/(12-1)*(t-1)')
        set_param('continuo_ret_com_GC_SNR/retcom5','Delay','0.01+(10-0.01)/(12-1)*(t-1)')
        set_param('continuo_ret_com_GC_SNR/Random Number1','Seed','15*(m-1)')
        set_param('continuo_ret_com_GC_SNR/Random Number2','Seed','15*(m-1)+10')
        set_param('continuo_ret_com_GC_SNR/Random Number3','Seed','15*(m-1)+20')
        set_param('continuo_ret_com_GC_SNR/Random Number4','Seed','15*(m-1)+30')
        set_param('continuo_ret_com_GC_SNR/Random Number5','Seed','15*(m-1)+40')
        sim('continuo_ret_com_GC_SNR.mdl')
        S1=var(simout1);
        N1=var(simout2);
        S2=var(simout3);
        N2=var(simout4);
        S3=var(simout5);
        N3=var(simout6);
        S4=var(simout7);
        N4=var(simout8);
        S5=var(simout9);
        N5=var(simout10);
        SNR1(m,t)=S1/N1;
        SNR2(m,t)=S2/N2;
        SNR3(m,t)=S3/N3;
        SNR4(m,t)=S4/N4;
        SNR5(m,t)=S5/N5;
    end
end
save_system('continuo_ret_com_GC_SNR.mdl')
close_system('continuo_ret_com_GC_SNR.mdl')
SNRprod1=sum(SNR1,1)/m;
SNRprod2=sum(SNR2,1)/m;
SNRprod3=sum(SNR3,1)/m;
SNRprod4=sum(SNR4,1)/m;
SNRprod5=sum(SNR5,1)/m;
SNRprod1_dB=10*log10(SNRprod1);
SNRprod2_dB=10*log10(SNRprod2);
SNRprod3_dB=10*log10(SNRprod3);
SNRprod4_dB=10*log10(SNRprod4);

```

```

SNRprod5_dB=10*log10(SNRprod5);
tau_aux1=0.01:(10-0.01)/(12-1):0.01+(10-0.01)/(12-1)*(t-1);
tau_aux2=0.01:(10-0.01)/(12-1):0.01+(10-0.01)/(12-1)*(t-1);
tau_aux3=0.01:(10-0.01)/(12-1):0.01+(10-0.01)/(12-1)*(t-1);
tau_aux4=0.01:(10-0.01)/(12-1):0.01+(10-0.01)/(12-1)*(t-1);
tau_aux5=0.01:(10-0.01)/(12-1):0.01+(10-0.01)/(12-1)*(t-1);
figure(1); plot(tau_aux1,SNRprod1_dB,'r.-'); grid on
title('Respuesta Retardo de Comunicación GC Monte Carlo continuo piscina 1')
xlabel('Retardo de Comunicación piscina 1')
ylabel('Razón Señal-Ruido [dB] piscina 1')
legend('Respuesta','Location','NorthWest')
figure(2); plot(tau_aux2,SNRprod2_dB,'r.-'); grid on
title('Respuesta Retardo de Comunicación GC Monte Carlo continuo piscina 2')
xlabel('Retardo de Comunicación piscina 2')
ylabel('Razón Señal-Ruido [dB] piscina 2')
legend('Respuesta','Location','NorthWest')
figure(3); plot(tau_aux3,SNRprod3_dB,'r.-'); grid on
title('Respuesta Retardo de Comunicación GC Monte Carlo continuo piscina 3')
xlabel('Retardo de Comunicación piscina 3')
ylabel('Razón Señal-Ruido [dB] piscina 3')
legend('Respuesta','Location','NorthWest')
figure(4); plot(tau_aux4,SNRprod4_dB,'r.-'); grid on
title('Respuesta Retardo de Comunicación GC Monte Carlo continuo piscina 4')
xlabel('Retardo de Comunicación piscina 4')
ylabel('Razón Señal-Ruido [dB] piscina 4')
legend('Respuesta','Location','NorthWest')
figure(5); plot(tau_aux5,SNRprod5_dB,'r.-'); grid on
title('Respuesta Retardo de Comunicación GC Monte Carlo continuo piscina 5')
xlabel('Retardo de Comunicación piscina 5')
ylabel('Razón Señal-Ruido [dB] piscina 5')
legend('Respuesta','Location','NorthWest')

```



A.6. Script continuo_ret_com_CG_y_GC_SNR.m

```

%continuo_ret_com_CG_y_GC_SNR

%Inicialización de variables
clear all; close all; clc

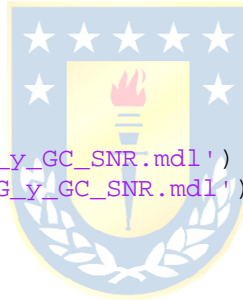
open_system('continuo_ret_com_CG_y_GC_SNR.mdl')
for m=1:100,
    m
    for t=1:12,
        t
            set_param('continuo_ret_com_CG_y_GC_SNR/retcom1','Delay','0.01+(10-
0.01)/(12-1)*(t-1)')
            set_param('continuo_ret_com_CG_y_GC_SNR/retcom2','Delay','0.01+(10-
0.01)/(12-1)*(t-1)')
            set_param('continuo_ret_com_CG_y_GC_SNR/retcom3','Delay','0.01+(10-
0.01)/(12-1)*(t-1)')
            set_param('continuo_ret_com_CG_y_GC_SNR/retcom4','Delay','0.01+(10-
0.01)/(12-1)*(t-1)')
            set_param('continuo_ret_com_CG_y_GC_SNR/retcom5','Delay','0.01+(10-
0.01)/(12-1)*(t-1)')
            set_param('continuo_ret_com_CG_y_GC_SNR/retcom6','Delay','0.01+(10-
0.01)/(12-1)*(t-1)')
            set_param('continuo_ret_com_CG_y_GC_SNR/retcom7','Delay','0.01+(10-
0.01)/(12-1)*(t-1)')
            set_param('continuo_ret_com_CG_y_GC_SNR/retcom8','Delay','0.01+(10-
0.01)/(12-1)*(t-1)')
            set_param('continuo_ret_com_CG_y_GC_SNR/retcom9','Delay','0.01+(10-
0.01)/(12-1)*(t-1)')
            set_param('continuo_ret_com_CG_y_GC_SNR/retcom10','Delay','0.01+(10-
0.01)/(12-1)*(t-1)')
            set_param('continuo_ret_com_CG_y_GC_SNR/Random Number1','Seed','15*(m-
1)')
            set_param('continuo_ret_com_CG_y_GC_SNR/Random Number2','Seed','15*(m-
1)+10')
            set_param('continuo_ret_com_CG_y_GC_SNR/Random Number3','Seed','15*(m-
1)+20')
            set_param('continuo_ret_com_CG_y_GC_SNR/Random Number4','Seed','15*(m-
1)+30')
            set_param('continuo_ret_com_CG_y_GC_SNR/Random Number5','Seed','15*(m-
1)+40')
            set_param('continuo_ret_com_CG_y_GC_SNR/Random Number6','Seed','15*(m-
1)')
            set_param('continuo_ret_com_CG_y_GC_SNR/Random Number7','Seed','15*(m-
1)+10')
            set_param('continuo_ret_com_CG_y_GC_SNR/Random Number8','Seed','15*(m-
1)+20')
            set_param('continuo_ret_com_CG_y_GC_SNR/Random Number9','Seed','15*(m-
1)+30')
            set_param('continuo_ret_com_CG_y_GC_SNR/Random Number10','Seed','15*(m-
1)+40')
            sim('continuo_ret_com_CG_y_GC_SNR.mdl')
            S1=var(simout1);
            N1=var(simout2);
            S2=var(simout3);
        end
    end
end

```

```

N2=var(simout4);
S3=var(simout5);
N3=var(simout6);
S4=var(simout7);
N4=var(simout8);
S5=var(simout9);
N5=var(simout10);
S6=var(simout11);
N6=var(simout12);
S7=var(simout13);
N7=var(simout14);
S8=var(simout15);
N8=var(simout16);
S9=var(simout17);
N9=var(simout18);
S10=var(simout19);
N10=var(simout20);
SNR1(m,t)=S1/N1;
SNR2(m,t)=S2/N2;
SNR3(m,t)=S3/N3;
SNR4(m,t)=S4/N4;
SNR5(m,t)=S5/N5;
SNR6(m,t)=S6/N6;
SNR7(m,t)=S7/N7;
SNR8(m,t)=S8/N8;
SNR9(m,t)=S9/N9;
SNR10(m,t)=S10/N10;
end
end
save_system('continuo_ret_com_CG_y_GC_SNR.mdl')
close_system('continuo_ret_com_CG_y_GC_SNR.mdl')
SNRprod1=sum(SNR1,1)/m;
SNRprod2=sum(SNR2,1)/m;
SNRprod3=sum(SNR3,1)/m;
SNRprod4=sum(SNR4,1)/m;
SNRprod5=sum(SNR5,1)/m;
SNRprod6=sum(SNR6,1)/m;
SNRprod7=sum(SNR7,1)/m;
SNRprod8=sum(SNR8,1)/m;
SNRprod9=sum(SNR9,1)/m;
SNRprod10=sum(SNR10,1)/m;
SNRprod1_dB=10*log10(SNRprod1);
SNRprod2_dB=10*log10(SNRprod2);
SNRprod3_dB=10*log10(SNRprod3);
SNRprod4_dB=10*log10(SNRprod4);
SNRprod5_dB=10*log10(SNRprod5);
SNRprod6_dB=10*log10(SNRprod6);
SNRprod7_dB=10*log10(SNRprod7);
SNRprod8_dB=10*log10(SNRprod8);
SNRprod9_dB=10*log10(SNRprod9);
SNRprod10_dB=10*log10(SNRprod10);
tau_aux1=0.01:(10-0.01)/(12-1):0.01+(10-0.01)/(12-1)*(t-1);
tau_aux2=0.01:(10-0.01)/(12-1):0.01+(10-0.01)/(12-1)*(t-1);
tau_aux3=0.01:(10-0.01)/(12-1):0.01+(10-0.01)/(12-1)*(t-1);
tau_aux4=0.01:(10-0.01)/(12-1):0.01+(10-0.01)/(12-1)*(t-1);
tau_aux5=0.01:(10-0.01)/(12-1):0.01+(10-0.01)/(12-1)*(t-1);
tau_aux6=0.01:(10-0.01)/(12-1):0.01+(10-0.01)/(12-1)*(t-1);
tau_aux7=0.01:(10-0.01)/(12-1):0.01+(10-0.01)/(12-1)*(t-1);

```



```

tau_aux8=0.01:(10-0.01)/(12-1):0.01+(10-0.01)/(12-1)*(t-1);
tau_aux9=0.01:(10-0.01)/(12-1):0.01+(10-0.01)/(12-1)*(t-1);
tau_aux10=0.01:(10-0.01)/(12-1):0.01+(10-0.01)/(12-1)*(t-1);
figure(1); plot(tau_aux1,SNRprod1_dB,'r.-'); hold on;
plot(tau_aux6,SNRprod6_dB,'b.-'); grid on
title('Respuesta Retardo de Comunicación CG y GC Monte Carlo continuo piscina
1')
xlabel('Retardo de Comunicación piscina 1')
ylabel('Razón Señal-Ruido [dB] piscina 1')
legend('Respuesta CG','Respuesta GC','Location','NorthWest')
figure(2); plot(tau_aux2,SNRprod2_dB,'r.-'); hold on;
plot(tau_aux7,SNRprod7_dB,'b.-'); grid on
title('Respuesta Retardo de Comunicación CG y GC Monte Carlo continuo piscina
2')
xlabel('Retardo de Comunicación piscina 2')
ylabel('Razón Señal-Ruido [dB] piscina 2')
legend('Respuesta CG','Respuesta GC','Location','NorthWest')
figure(3); plot(tau_aux3,SNRprod3_dB,'r.-'); hold on;
plot(tau_aux8,SNRprod8_dB,'b.-'); grid on
title('Respuesta Retardo de Comunicación CG y GC Monte Carlo continuo piscina
3')
xlabel('Retardo de Comunicación piscina 3')
ylabel('Razón Señal-Ruido [dB] piscina 3')
legend('Respuesta CG','Respuesta GC','Location','NorthWest')
figure(4); plot(tau_aux4,SNRprod4_dB,'r.-'); hold on;
plot(tau_aux9,SNRprod9_dB,'b.-'); grid on
title('Respuesta Retardo de Comunicación CG y GC Monte Carlo continuo piscina
4')
xlabel('Retardo de Comunicación piscina 4')
ylabel('Razón Señal-Ruido [dB] piscina 4')
legend('Respuesta CG','Respuesta GC','Location','NorthWest')
figure(5); plot(tau_aux5,SNRprod5_dB,'r.-'); hold on;
plot(tau_aux10,SNRprod10_dB,'b.-'); grid on
title('Respuesta Retardo de Comunicación CG y GC Monte Carlo continuo piscina
5')
xlabel('Retardo de Comunicación piscina 5')
ylabel('Razón Señal-Ruido [dB] piscina 5')
legend('Respuesta CG','Respuesta GC','Location','NorthWest')

```


A.7. Script `discreto_equiv_AWGN_CG_1min_SNR.m`

```

%discreto_equiv_AWGN_CG_1min_SNR

%Inicialización de variables
clear all; close all; clc

open_system('discreto_equiv_AWGN_CG_1min_SNR.mdl')
for m=1:100,
    m
    for v=1:12,
        v
        set_param('discreto_equiv_AWGN_CG_1min_SNR/Random
Number1','Seed','15*(m-1)')
        set_param('discreto_equiv_AWGN_CG_1min_SNR/Random
Number2','Seed','15*(m-1)+10')
        set_param('discreto_equiv_AWGN_CG_1min_SNR/Random
Number3','Seed','15*(m-1)+20')
        set_param('discreto_equiv_AWGN_CG_1min_SNR/Random
Number4','Seed','15*(m-1)+30')
        set_param('discreto_equiv_AWGN_CG_1min_SNR/Random
Number5','Seed','15*(m-1)+40')
        set_param('discreto_equiv_AWGN_CG_1min_SNR/Random
Number1','Variance','0.1+(10-0.1)/(12-1)*(v-1)')
        set_param('discreto_equiv_AWGN_CG_1min_SNR/Random
Number2','Variance','0.1+(10-0.1)/(12-1)*(v-1)')
        set_param('discreto_equiv_AWGN_CG_1min_SNR/Random
Number3','Variance','0.1+(10-0.1)/(12-1)*(v-1)')
        set_param('discreto_equiv_AWGN_CG_1min_SNR/Random
Number4','Variance','0.1+(10-0.1)/(12-1)*(v-1)')
        set_param('discreto_equiv_AWGN_CG_1min_SNR/Random
Number5','Variance','0.1+(10-0.1)/(12-1)*(v-1)')
        sim('discreto_equiv_AWGN_CG_1min_SNR.mdl')
        S1=var(simout1);
        N1=var(simout2);
        S2=var(simout3);
        N2=var(simout4);
        S3=var(simout5);
        N3=var(simout6);
        S4=var(simout7);
        N4=var(simout8);
        S5=var(simout9);
        N5=var(simout10);
        SNR1(m,v)=S1/N1;
        SNR2(m,v)=S2/N2;
        SNR3(m,v)=S3/N3;
        SNR4(m,v)=S4/N4;
        SNR5(m,v)=S5/N5;
    end
end
save_system('discreto_equiv_AWGN_CG_1min_SNR.mdl')
close_system('discreto_equiv_AWGN_CG_1min_SNR.mdl')
SNRprod1=sum(SNR1)/m;
SNRprod2=sum(SNR2)/m;
SNRprod3=sum(SNR3)/m;
SNRprod4=sum(SNR4)/m;

```

```

SNRprod5=sum(SNR5)/m;
SNRprod1_dB=10*log10(SNRprod1);
SNRprod2_dB=10*log10(SNRprod2);
SNRprod3_dB=10*log10(SNRprod3);
SNRprod4_dB=10*log10(SNRprod4);
SNRprod5_dB=10*log10(SNRprod5);
v_aux1=0.1:(10-0.1)/(12-1):0.1+(10-0.1)/(12-1)*(v-1);
v_aux2=0.1:(10-0.1)/(12-1):0.1+(10-0.1)/(12-1)*(v-1);
v_aux3=0.1:(10-0.1)/(12-1):0.1+(10-0.1)/(12-1)*(v-1);
v_aux4=0.1:(10-0.1)/(12-1):0.1+(10-0.1)/(12-1)*(v-1);
v_aux5=0.1:(10-0.1)/(12-1):0.1+(10-0.1)/(12-1)*(v-1);
figure(1); plot(v_aux1,SNRprod1_dB,'r.-'); grid on
title('Respuesta AWGN CG Monte Carlo discreto piscina 1')
xlabel('Varianza del AWGN piscina 1')
ylabel('Razón Señal-Ruido [dB] piscina 1')
legend('Respuesta','Location','NorthWest')
axis([0 10 -20 -15])
figure(2); plot(v_aux2,SNRprod2_dB,'r.-'); grid on
title('Respuesta AWGN CG Monte Carlo discreto piscina 2')
xlabel('Varianza del AWGN piscina 2')
ylabel('Razón Señal-Ruido [dB] piscina 2')
legend('Respuesta','Location','NorthWest')
axis([0 10 -20 -15])
figure(3); plot(v_aux3,SNRprod3_dB,'r.-'); grid on
title('Respuesta AWGN CG Monte Carlo discreto piscina 3')
xlabel('Varianza del AWGN piscina 3')
ylabel('Razón Señal-Ruido [dB] piscina 3')
legend('Respuesta','Location','NorthWest')
axis([0 10 -20 -15])
figure(4); plot(v_aux4,SNRprod4_dB,'r.-'); grid on
title('Respuesta AWGN CG Monte Carlo discreto piscina 4')
xlabel('Varianza del AWGN piscina 4')
ylabel('Razón Señal-Ruido [dB] piscina 4')
legend('Respuesta','Location','NorthWest')
axis([0 10 -20 -15])
figure(5); plot(v_aux5,SNRprod5_dB,'r.-'); grid on
title('Respuesta AWGN CG Monte Carlo discreto piscina 5')
xlabel('Varianza del AWGN piscina 5')
ylabel('Razón Señal-Ruido [dB] piscina 5')
legend('Respuesta','Location','NorthWest')
axis([0 10 -20 -15])

```

A.8. Script `discreto_equiv_AWGN_GC_1min_SNR.m`

```

%discreto_equiv_AWGN_GC_1min_SNR

%Inicialización de variables
clear all; close all; clc

open_system('discreto_equiv_AWGN_GC_1min_SNR.mdl')
for m=1:100,
    m
    for v=1:12,
        v
        set_param('discreto_equiv_AWGN_GC_1min_SNR/Random
Number1','Seed','15*(m-1)')
        set_param('discreto_equiv_AWGN_GC_1min_SNR/Random
Number2','Seed','15*(m-1)+10')
        set_param('discreto_equiv_AWGN_GC_1min_SNR/Random
Number3','Seed','15*(m-1)+20')
        set_param('discreto_equiv_AWGN_GC_1min_SNR/Random
Number4','Seed','15*(m-1)+30')
        set_param('discreto_equiv_AWGN_GC_1min_SNR/Random
Number5','Seed','15*(m-1)+40')
        set_param('discreto_equiv_AWGN_GC_1min_SNR/Random
Number1','Variance','0.1+(10-0.1)/(12-1)*(v-1)')
        set_param('discreto_equiv_AWGN_GC_1min_SNR/Random
Number2','Variance','0.1+(10-0.1)/(12-1)*(v-1)')
        set_param('discreto_equiv_AWGN_GC_1min_SNR/Random
Number3','Variance','0.1+(10-0.1)/(12-1)*(v-1)')
        set_param('discreto_equiv_AWGN_GC_1min_SNR/Random
Number4','Variance','0.1+(10-0.1)/(12-1)*(v-1)')
        set_param('discreto_equiv_AWGN_GC_1min_SNR/Random
Number5','Variance','0.1+(10-0.1)/(12-1)*(v-1)')
        sim('discreto_equiv_AWGN_GC_1min_SNR.mdl')
        S1=var(simout1);
        N1=var(simout2);
        S2=var(simout3);
        N2=var(simout4);
        S3=var(simout5);
        N3=var(simout6);
        S4=var(simout7);
        N4=var(simout8);
        S5=var(simout9);
        N5=var(simout10);
        SNR1(m,v)=S1/N1;
        SNR2(m,v)=S2/N2;
        SNR3(m,v)=S3/N3;
        SNR4(m,v)=S4/N4;
        SNR5(m,v)=S5/N5;
    end
end
save_system('discreto_equiv_AWGN_GC_1min_SNR.mdl')
close_system('discreto_equiv_AWGN_GC_1min_SNR.mdl')
SNRprod1=sum(SNR1)/m;
SNRprod2=sum(SNR2)/m;
SNRprod3=sum(SNR3)/m;
SNRprod4=sum(SNR4)/m;

```

```

SNRprod5=sum(SNR5)/m;
SNRprod1_dB=10*log10(SNRprod1);
SNRprod2_dB=10*log10(SNRprod2);
SNRprod3_dB=10*log10(SNRprod3);
SNRprod4_dB=10*log10(SNRprod4);
SNRprod5_dB=10*log10(SNRprod5);
v_aux1=0.1:(10-0.1)/(12-1):0.1+(10-0.1)/(12-1)*(v-1);
v_aux2=0.1:(10-0.1)/(12-1):0.1+(10-0.1)/(12-1)*(v-1);
v_aux3=0.1:(10-0.1)/(12-1):0.1+(10-0.1)/(12-1)*(v-1);
v_aux4=0.1:(10-0.1)/(12-1):0.1+(10-0.1)/(12-1)*(v-1);
v_aux5=0.1:(10-0.1)/(12-1):0.1+(10-0.1)/(12-1)*(v-1);
figure(1); plot(v_aux1,SNRprod1_dB,'r.-'); grid on
title('Respuesta AWGN GC Monte Carlo discreto piscina 1')
xlabel('Varianza del AWGN piscina 1')
ylabel('Razón Señal-Ruido [dB] piscina 1')
legend('Respuesta','Location','NorthWest')
axis([0 10 -20 -15])
figure(2); plot(v_aux2,SNRprod2_dB,'r.-'); grid on
title('Respuesta AWGN GC Monte Carlo discreto piscina 2')
xlabel('Varianza del AWGN piscina 2')
ylabel('Razón Señal-Ruido [dB] piscina 2')
legend('Respuesta','Location','NorthWest')
axis([0 10 -20 -15])
figure(3); plot(v_aux3,SNRprod3_dB,'r.-'); grid on
title('Respuesta AWGN GC Monte Carlo discreto piscina 3')
xlabel('Varianza del AWGN piscina 3')
ylabel('Razón Señal-Ruido [dB] piscina 3')
legend('Respuesta','Location','NorthWest')
axis([0 10 -20 -15])
figure(4); plot(v_aux4,SNRprod4_dB,'r.-'); grid on
title('Respuesta AWGN GC Monte Carlo discreto piscina 4')
xlabel('Varianza del AWGN piscina 4')
ylabel('Razón Señal-Ruido [dB] piscina 4')
legend('Respuesta','Location','NorthWest')
axis([0 10 -20 -15])
figure(5); plot(v_aux5,SNRprod5_dB,'r.-'); grid on
title('Respuesta AWGN GC Monte Carlo discreto piscina 5')
xlabel('Varianza del AWGN piscina 5')
ylabel('Razón Señal-Ruido [dB] piscina 5')
legend('Respuesta','Location','NorthWest')
axis([0 10 -20 -15])

```

A.9. Script `discreto_equiv_ret_com_CG_1min_SNR.m`

```

%discreto_equiv_ret_com_CG_1min_SNR

%Inicialización de variables
clear all; close all; clc

open_system('discreto_equiv_ret_com_CG_1min_SNR.mdl')
for m=1:100,
    m
    for t=1:12,
        t

set_param('discreto_equiv_ret_com_CG_1min_SNR/retcom1','NumDelays','55/(12-1)*(t-1)+1')

set_param('discreto_equiv_ret_com_CG_1min_SNR/retcom2','NumDelays','55/(12-1)*(t-1)+1')

set_param('discreto_equiv_ret_com_CG_1min_SNR/retcom3','NumDelays','55/(12-1)*(t-1)+1')

set_param('discreto_equiv_ret_com_CG_1min_SNR/retcom4','NumDelays','55/(12-1)*(t-1)+1')

set_param('discreto_equiv_ret_com_CG_1min_SNR/retcom5','NumDelays','55/(12-1)*(t-1)+1')
        set_param('discreto_equiv_ret_com_CG_1min_SNR/Random
Number1','Seed','15*(m-1)')
        set_param('discreto_equiv_ret_com_CG_1min_SNR/Random
Number2','Seed','15*(m-1)+10')
        set_param('discreto_equiv_ret_com_CG_1min_SNR/Random
Number3','Seed','15*(m-1)+20')
        set_param('discreto_equiv_ret_com_CG_1min_SNR/Random
Number4','Seed','15*(m-1)+30')
        set_param('discreto_equiv_ret_com_CG_1min_SNR/Random
Number5','Seed','15*(m-1)+40')
        sim('discreto_equiv_ret_com_CG_1min_SNR.mdl')
        S1=var(simout1);
        N1=var(simout2);
        S2=var(simout3);
        N2=var(simout4);
        S3=var(simout5);
        N3=var(simout6);
        S4=var(simout7);
        N4=var(simout8);
        S5=var(simout9);
        N5=var(simout10);
        SNR1(m,t)=S1/N1;
        SNR2(m,t)=S2/N2;
        SNR3(m,t)=S3/N3;
        SNR4(m,t)=S4/N4;
        SNR5(m,t)=S5/N5;
    end
end
save_system('discreto_equiv_ret_com_CG_1min_SNR.mdl')

```

```

close_system('discreto_equiv_ret_com_CG_lmin_SNR.mdl')
SNRprod1=sum(SNR1,1)/m;
SNRprod2=sum(SNR2,1)/m;
SNRprod3=sum(SNR3,1)/m;
SNRprod4=sum(SNR4,1)/m;
SNRprod5=sum(SNR5,1)/m;
SNRprod1_dB=10*log10(SNRprod1);
SNRprod2_dB=10*log10(SNRprod2);
SNRprod3_dB=10*log10(SNRprod3);
SNRprod4_dB=10*log10(SNRprod4);
SNRprod5_dB=10*log10(SNRprod5);
tau_aux1=1:55/(12-1):55/(12-1)*(t-1)+1;
tau_aux2=1:55/(12-1):55/(12-1)*(t-1)+1;
tau_aux3=1:55/(12-1):55/(12-1)*(t-1)+1;
tau_aux4=1:55/(12-1):55/(12-1)*(t-1)+1;
tau_aux5=1:55/(12-1):55/(12-1)*(t-1)+1;
figure(1); plot(tau_aux1,SNRprod1_dB,'r.-'); grid on
title('Respuesta Retardo de Comunicación CG Monte Carlo discreto piscina 1')
xlabel('Retardo de Comunicación piscina 1')
ylabel('Razón Señal-Ruido [dB] piscina 1')
legend('Respuesta','Location','NorthWest')
axis([0 60 -20 50])
figure(2); plot(tau_aux2,SNRprod2_dB,'r.-'); grid on
title('Respuesta Retardo de Comunicación CG Monte Carlo discreto piscina 2')
xlabel('Retardo de Comunicación piscina 2')
ylabel('Razón Señal-Ruido [dB] piscina 2')
legend('Respuesta','Location','NorthWest')
axis([0 60 -20 50])
figure(3); plot(tau_aux3,SNRprod3_dB,'r.-'); grid on
title('Respuesta Retardo de Comunicación CG Monte Carlo discreto piscina 3')
xlabel('Retardo de Comunicación piscina 3')
ylabel('Razón Señal-Ruido [dB] piscina 3')
legend('Respuesta','Location','NorthWest')
axis([0 60 -20 50])
figure(4); plot(tau_aux4,SNRprod4_dB,'r.-'); grid on
title('Respuesta Retardo de Comunicación CG Monte Carlo discreto piscina 4')
xlabel('Retardo de Comunicación piscina 4')
ylabel('Razón Señal-Ruido [dB] piscina 4')
legend('Respuesta','Location','NorthWest')
axis([0 60 -20 50])
figure(5); plot(tau_aux5,SNRprod5_dB,'r.-'); grid on
title('Respuesta Retardo de Comunicación CG Monte Carlo discreto piscina 5')
xlabel('Retardo de Comunicación piscina 5')
ylabel('Razón Señal-Ruido [dB] piscina 5')
legend('Respuesta','Location','NorthWest')
axis([0 60 -20 50])

```

A.10. Script `discreto_equiv_ret_com_GC_1min_SNR.m`

```

%discreto_equiv_ret_com_GC_1min_SNR

%Inicialización de variables
clear all; close all; clc

open_system('discreto_equiv_ret_com_GC_1min_SNR.mdl')
for m=1:100,
    m
    for t=1:12,
        t

set_param('discreto_equiv_ret_com_GC_1min_SNR/retcom1','NumDelays','55/(12-1)*(t-1)+1')

set_param('discreto_equiv_ret_com_GC_1min_SNR/retcom2','NumDelays','55/(12-1)*(t-1)+1')

set_param('discreto_equiv_ret_com_GC_1min_SNR/retcom3','NumDelays','55/(12-1)*(t-1)+1')

set_param('discreto_equiv_ret_com_GC_1min_SNR/retcom4','NumDelays','55/(12-1)*(t-1)+1')

set_param('discreto_equiv_ret_com_GC_1min_SNR/retcom5','NumDelays','55/(12-1)*(t-1)+1')
        set_param('discreto_equiv_ret_com_GC_1min_SNR/Random
Number1','Seed','15*(m-1)')
        set_param('discreto_equiv_ret_com_GC_1min_SNR/Random
Number2','Seed','15*(m-1)+10')
        set_param('discreto_equiv_ret_com_GC_1min_SNR/Random
Number3','Seed','15*(m-1)+20')
        set_param('discreto_equiv_ret_com_GC_1min_SNR/Random
Number4','Seed','15*(m-1)+30')
        set_param('discreto_equiv_ret_com_GC_1min_SNR/Random
Number5','Seed','15*(m-1)+40')
        sim('discreto_equiv_ret_com_GC_1min_SNR.mdl')
        S1=var(simout1);
        N1=var(simout2);
        S2=var(simout3);
        N2=var(simout4);
        S3=var(simout5);
        N3=var(simout6);
        S4=var(simout7);
        N4=var(simout8);
        S5=var(simout9);
        N5=var(simout10);
        SNR1(m,t)=S1/N1;
        SNR2(m,t)=S2/N2;
        SNR3(m,t)=S3/N3;
        SNR4(m,t)=S4/N4;
        SNR5(m,t)=S5/N5;
    end
end
save_system('discreto_equiv_ret_com_GC_1min_SNR.mdl')

```

```

close_system('discreto_equiv_ret_com_GC_lmin_SNR.mdl')
SNRprod1=sum(SNR1,1)/m;
SNRprod2=sum(SNR2,1)/m;
SNRprod3=sum(SNR3,1)/m;
SNRprod4=sum(SNR4,1)/m;
SNRprod5=sum(SNR5,1)/m;
SNRprod1_dB=10*log10(SNRprod1);
SNRprod2_dB=10*log10(SNRprod2);
SNRprod3_dB=10*log10(SNRprod3);
SNRprod4_dB=10*log10(SNRprod4);
SNRprod5_dB=10*log10(SNRprod5);
tau_aux1=1:55/(12-1):55/(12-1)*(t-1)+1;
tau_aux2=1:55/(12-1):55/(12-1)*(t-1)+1;
tau_aux3=1:55/(12-1):55/(12-1)*(t-1)+1;
tau_aux4=1:55/(12-1):55/(12-1)*(t-1)+1;
tau_aux5=1:55/(12-1):55/(12-1)*(t-1)+1;
figure(1); plot(tau_aux1,SNRprod1_dB,'r.-'); grid on
title('Respuesta Retardo de Comunicación GC Monte Carlo discreto piscina 1')
xlabel('Retardo de Comunicación piscina 1')
ylabel('Razón Señal-Ruido [dB] piscina 1')
legend('Respuesta','Location','NorthWest')
axis([0 60 -20 50])
figure(2); plot(tau_aux2,SNRprod2_dB,'r.-'); grid on
title('Respuesta Retardo de Comunicación GC Monte Carlo discreto piscina 2')
xlabel('Retardo de Comunicación piscina 2')
ylabel('Razón Señal-Ruido [dB] piscina 2')
legend('Respuesta','Location','NorthWest')
axis([0 60 -20 50])
figure(3); plot(tau_aux3,SNRprod3_dB,'r.-'); grid on
title('Respuesta Retardo de Comunicación GC Monte Carlo discreto piscina 3')
xlabel('Retardo de Comunicación piscina 3')
ylabel('Razón Señal-Ruido [dB] piscina 3')
legend('Respuesta','Location','NorthWest')
axis([0 60 -20 50])
figure(4); plot(tau_aux4,SNRprod4_dB,'r.-'); grid on
title('Respuesta Retardo de Comunicación GC Monte Carlo discreto piscina 4')
xlabel('Retardo de Comunicación piscina 4')
ylabel('Razón Señal-Ruido [dB] piscina 4')
legend('Respuesta','Location','NorthWest')
axis([0 60 -20 50])
figure(5); plot(tau_aux5,SNRprod5_dB,'r.-'); grid on
title('Respuesta Retardo de Comunicación GC Monte Carlo discreto piscina 5')
xlabel('Retardo de Comunicación piscina 5')
ylabel('Razón Señal-Ruido [dB] piscina 5')
legend('Respuesta','Location','NorthWest')
axis([0 60 -20 50])

```


A.11. Script `discreto_equiv_ret_com_CG_y_GC_1min_SNR.m`

```

%discreto_equiv_ret_com_CG_y_GC_1min_SNR

%Inicialización de variables
clear all; close all; clc

open_system('discreto_equiv_ret_com_CG_y_GC_1min_SNR.mdl')
for m=1:100,
    m
    for t=1:12,
        t

set_param('discreto_equiv_ret_com_CG_y_GC_1min_SNR/retcom1','NumDelays','55/(12-1)*(t-1)+1')

set_param('discreto_equiv_ret_com_CG_y_GC_1min_SNR/retcom2','NumDelays','55/(12-1)*(t-1)+1')

set_param('discreto_equiv_ret_com_CG_y_GC_1min_SNR/retcom3','NumDelays','55/(12-1)*(t-1)+1')

set_param('discreto_equiv_ret_com_CG_y_GC_1min_SNR/retcom4','NumDelays','55/(12-1)*(t-1)+1')

set_param('discreto_equiv_ret_com_CG_y_GC_1min_SNR/retcom5','NumDelays','55/(12-1)*(t-1)+1')

set_param('discreto_equiv_ret_com_CG_y_GC_1min_SNR/retcom6','NumDelays','55/(12-1)*(t-1)+1')

set_param('discreto_equiv_ret_com_CG_y_GC_1min_SNR/retcom7','NumDelays','55/(12-1)*(t-1)+1')

set_param('discreto_equiv_ret_com_CG_y_GC_1min_SNR/retcom8','NumDelays','55/(12-1)*(t-1)+1')

set_param('discreto_equiv_ret_com_CG_y_GC_1min_SNR/retcom9','NumDelays','55/(12-1)*(t-1)+1')

set_param('discreto_equiv_ret_com_CG_y_GC_1min_SNR/retcom10','NumDelays','55/(12-1)*(t-1)+1')
        set_param('discreto_equiv_ret_com_CG_y_GC_1min_SNR/Random
Number1','Seed','15*(m-1)')
        set_param('discreto_equiv_ret_com_CG_y_GC_1min_SNR/Random
Number2','Seed','15*(m-1)+10')
        set_param('discreto_equiv_ret_com_CG_y_GC_1min_SNR/Random
Number3','Seed','15*(m-1)+20')
        set_param('discreto_equiv_ret_com_CG_y_GC_1min_SNR/Random
Number4','Seed','15*(m-1)+30')
        set_param('discreto_equiv_ret_com_CG_y_GC_1min_SNR/Random
Number5','Seed','15*(m-1)+40')
        set_param('discreto_equiv_ret_com_CG_y_GC_1min_SNR/Random
Number6','Seed','15*(m-1)')
        set_param('discreto_equiv_ret_com_CG_y_GC_1min_SNR/Random
Number7','Seed','15*(m-1)+10')
    end
end

```

```

        set_param('discreto_equiv_ret_com_CG_y_GC_lmin_SNR/Random
Number8', 'Seed', '15*(m-1)+20')
        set_param('discreto_equiv_ret_com_CG_y_GC_lmin_SNR/Random
Number9', 'Seed', '15*(m-1)+30')
        set_param('discreto_equiv_ret_com_CG_y_GC_lmin_SNR/Random
Number10', 'Seed', '15*(m-1)+40')
        sim('discreto_equiv_ret_com_CG_y_GC_lmin_SNR.mdl')
        S1=var(simout1);
        N1=var(simout2);
        S2=var(simout3);
        N2=var(simout4);
        S3=var(simout5);
        N3=var(simout6);
        S4=var(simout7);
        N4=var(simout8);
        S5=var(simout9);
        N5=var(simout10);
        S6=var(simout11);
        N6=var(simout12);
        S7=var(simout13);
        N7=var(simout14);
        S8=var(simout15);
        N8=var(simout16);
        S9=var(simout17);
        N9=var(simout18);
        S10=var(simout19);
        N10=var(simout20);
        SNR1(m,t)=S1/N1;
        SNR2(m,t)=S2/N2;
        SNR3(m,t)=S3/N3;
        SNR4(m,t)=S4/N4;
        SNR5(m,t)=S5/N5;
        SNR6(m,t)=S6/N6;
        SNR7(m,t)=S7/N7;
        SNR8(m,t)=S8/N8;
        SNR9(m,t)=S9/N9;
        SNR10(m,t)=S10/N10;
    end
end
save_system('discreto_equiv_ret_com_CG_y_GC_lmin_SNR.mdl')
close_system('discreto_equiv_ret_com_CG_y_GC_lmin_SNR.mdl')
SNRprod1=sum(SNR1,1)/m;
SNRprod2=sum(SNR2,1)/m;
SNRprod3=sum(SNR3,1)/m;
SNRprod4=sum(SNR4,1)/m;
SNRprod5=sum(SNR5,1)/m;
SNRprod6=sum(SNR6,1)/m;
SNRprod7=sum(SNR7,1)/m;
SNRprod8=sum(SNR8,1)/m;
SNRprod9=sum(SNR9,1)/m;
SNRprod10=sum(SNR10,1)/m;
SNRprod1_dB=10*log10(SNRprod1);
SNRprod2_dB=10*log10(SNRprod2);
SNRprod3_dB=10*log10(SNRprod3);
SNRprod4_dB=10*log10(SNRprod4);
SNRprod5_dB=10*log10(SNRprod5);
SNRprod6_dB=10*log10(SNRprod6);
SNRprod7_dB=10*log10(SNRprod7);

```



```

SNRprod8_dB=10*log10(SNRprod8);
SNRprod9_dB=10*log10(SNRprod9);
SNRprod10_dB=10*log10(SNRprod10);
tau_aux1=1:55/(12-1):55/(12-1)*(t-1)+1;
tau_aux2=1:55/(12-1):55/(12-1)*(t-1)+1;
tau_aux3=1:55/(12-1):55/(12-1)*(t-1)+1;
tau_aux4=1:55/(12-1):55/(12-1)*(t-1)+1;
tau_aux5=1:55/(12-1):55/(12-1)*(t-1)+1;
tau_aux6=1:55/(12-1):55/(12-1)*(t-1)+1;
tau_aux7=1:55/(12-1):55/(12-1)*(t-1)+1;
tau_aux8=1:55/(12-1):55/(12-1)*(t-1)+1;
tau_aux9=1:55/(12-1):55/(12-1)*(t-1)+1;
tau_aux10=1:55/(12-1):55/(12-1)*(t-1)+1;
figure(1); plot(tau_aux1,SNRprod1_dB,'r.-'); hold on;
plot(tau_aux6,SNRprod6_dB,'b.-'); grid on
title('Respuesta Retardo de Comunicación CG y GC Monte Carlo discreto piscina
1')
xlabel('Retardo de Comunicación piscina 1')
ylabel('Razón Señal-Ruido [dB] piscina 1')
legend('Respuesta CG','Respuesta GC','Location','NorthWest')
axis([0 60 -20 50])
figure(2); plot(tau_aux2,SNRprod2_dB,'r.-'); hold on;
plot(tau_aux7,SNRprod7_dB,'b.-'); grid on
title('Respuesta Retardo de Comunicación CG y GC Monte Carlo discreto piscina
2')
xlabel('Retardo de Comunicación piscina 2')
ylabel('Razón Señal-Ruido [dB] piscina 2')
legend('Respuesta CG','Respuesta GC','Location','NorthWest')
axis([0 60 -20 50])
figure(3); plot(tau_aux3,SNRprod3_dB,'r.-'); hold on;
plot(tau_aux8,SNRprod8_dB,'b.-'); grid on
title('Respuesta Retardo de Comunicación CG y GC Monte Carlo discreto piscina
3')
xlabel('Retardo de Comunicación piscina 3')
ylabel('Razón Señal-Ruido [dB] piscina 3')
legend('Respuesta CG','Respuesta GC','Location','NorthWest')
axis([0 60 -20 50])
figure(4); plot(tau_aux4,SNRprod4_dB,'r.-'); hold on;
plot(tau_aux9,SNRprod9_dB,'b.-'); grid on
title('Respuesta Retardo de Comunicación CG y GC Monte Carlo discreto piscina
4')
xlabel('Retardo de Comunicación piscina 4')
ylabel('Razón Señal-Ruido [dB] piscina 4')
legend('Respuesta CG','Respuesta GC','Location','NorthWest')
axis([0 60 -20 50])
figure(5); plot(tau_aux5,SNRprod5_dB,'r.-'); hold on;
plot(tau_aux10,SNRprod10_dB,'b.-'); grid on
title('Respuesta Retardo de Comunicación CG y GC Monte Carlo discreto piscina
5')
xlabel('Retardo de Comunicación piscina 5')
ylabel('Razón Señal-Ruido [dB] piscina 5')
legend('Respuesta CG','Respuesta GC','Location','NorthWest')
axis([0 60 -20 50])

```

A.12. Script

discreto_equiv_perd_paq_CG_y_AWGN_1min_SNR.m

```
%discreto_equiv_perd_paq_CG_y_AWGN_1min_SNR

%Inicialización de variables
clear all; close all; clc

open_system('discreto_equiv_perd_paq_CG_y_AWGN_1min_SNR.mdl')
for m=1:100,
    m
    for u=1:12,
        u
            set_param('discreto_equiv_perd_paq_CG_y_AWGN_1min_SNR/Subsystem1/Uniform
Random Number','Seed','15*(m-1)')
            set_param('discreto_equiv_perd_paq_CG_y_AWGN_1min_SNR/Subsystem2/Uniform
Random Number','Seed','15*(m-1)+10')
            set_param('discreto_equiv_perd_paq_CG_y_AWGN_1min_SNR/Subsystem3/Uniform
Random Number','Seed','15*(m-1)+20')
            set_param('discreto_equiv_perd_paq_CG_y_AWGN_1min_SNR/Subsystem4/Uniform
Random Number','Seed','15*(m-1)+30')
            set_param('discreto_equiv_perd_paq_CG_y_AWGN_1min_SNR/Subsystem5/Uniform
Random Number','Seed','15*(m-1)+40')

set_param('discreto_equiv_perd_paq_CG_y_AWGN_1min_SNR/Subsystem1/Switch','Thresh
old','0.01+(0.99-0.01)/(12-1)*(u-1)')

set_param('discreto_equiv_perd_paq_CG_y_AWGN_1min_SNR/Subsystem2/Switch','Thresh
old','0.01+(0.99-0.01)/(12-1)*(u-1)')

set_param('discreto_equiv_perd_paq_CG_y_AWGN_1min_SNR/Subsystem3/Switch','Thresh
old','0.01+(0.99-0.01)/(12-1)*(u-1)')

set_param('discreto_equiv_perd_paq_CG_y_AWGN_1min_SNR/Subsystem4/Switch','Thresh
old','0.01+(0.99-0.01)/(12-1)*(u-1)')

set_param('discreto_equiv_perd_paq_CG_y_AWGN_1min_SNR/Subsystem5/Switch','Thresh
old','0.01+(0.99-0.01)/(12-1)*(u-1)')
            set_param('discreto_equiv_perd_paq_CG_y_AWGN_1min_SNR/Random
Number1','Seed','15*(m-1)')
            set_param('discreto_equiv_perd_paq_CG_y_AWGN_1min_SNR/Random
Number2','Seed','15*(m-1)+10')
            set_param('discreto_equiv_perd_paq_CG_y_AWGN_1min_SNR/Random
Number3','Seed','15*(m-1)+20')
            set_param('discreto_equiv_perd_paq_CG_y_AWGN_1min_SNR/Random
Number4','Seed','15*(m-1)+30')
            set_param('discreto_equiv_perd_paq_CG_y_AWGN_1min_SNR/Random
Number5','Seed','15*(m-1)+40')
            sim('discreto_equiv_perd_paq_CG_y_AWGN_1min_SNR.mdl')
            S1=var(simout1);
            N1=var(simout2);
            S2=var(simout3);
            N2=var(simout4);
            S3=var(simout5);
            N3=var(simout6);
        end
    end
end
```

```

S4=var(simout7);
N4=var(simout8);
S5=var(simout9);
N5=var(simout10);
SNR1(m,u)=S1/N1;
SNR2(m,u)=S2/N2;
SNR3(m,u)=S3/N3;
SNR4(m,u)=S4/N4;
SNR5(m,u)=S5/N5;
end
end
save_system('discreto_equiv_perd_paq_CG_y_AWGN_lmin_SNR.mdl')
close_system('discreto_equiv_perd_paq_CG_y_AWGN_lmin_SNR.mdl')
SNRprod1=sum(SNR1,1)/m;
SNRprod2=sum(SNR2,1)/m;
SNRprod3=sum(SNR3,1)/m;
SNRprod4=sum(SNR4,1)/m;
SNRprod5=sum(SNR5,1)/m;
SNRprod1_dB=10*log10(SNRprod1);
SNRprod2_dB=10*log10(SNRprod2);
SNRprod3_dB=10*log10(SNRprod3);
SNRprod4_dB=10*log10(SNRprod4);
SNRprod5_dB=10*log10(SNRprod5);
u2_aux1=0.01:(0.99-0.01)/(12-1):0.01+(0.99-0.01)/(12-1)*(u-1);
u2_aux2=0.01:(0.99-0.01)/(12-1):0.01+(0.99-0.01)/(12-1)*(u-1);
u2_aux3=0.01:(0.99-0.01)/(12-1):0.01+(0.99-0.01)/(12-1)*(u-1);
u2_aux4=0.01:(0.99-0.01)/(12-1):0.01+(0.99-0.01)/(12-1)*(u-1);
u2_aux5=0.01:(0.99-0.01)/(12-1):0.01+(0.99-0.01)/(12-1)*(u-1);
figure(1); plot(u2_aux1,SNRprod1_dB,'r.-'); grid on
title('Respuesta en [dB] pérdida de paquetes CG Monte Carlo discreto piscina 1')
xlabel('Parámetro de umbral del switch de decisión piscina 1')
ylabel('Razón Señal-Ruido [dB] piscina 1')
legend('Respuesta','Location','NorthWest')
figure(2); plot(u2_aux2,SNRprod2_dB,'r.-'); grid on
title('Respuesta en [dB] pérdida de paquetes CG Monte Carlo discreto piscina 2')
xlabel('Parámetro de umbral del switch de decisión piscina 2')
ylabel('Razón Señal-Ruido [dB] piscina 2')
legend('Respuesta','Location','NorthWest')
figure(3); plot(u2_aux3,SNRprod3_dB,'r.-'); grid on
title('Respuesta en [dB] pérdida de paquetes CG Monte Carlo discreto piscina 3')
xlabel('Parámetro de umbral del switch de decisión piscina 3')
ylabel('Razón Señal-Ruido [dB] piscina 3')
legend('Respuesta','Location','NorthWest')
figure(4); plot(u2_aux4,SNRprod4_dB,'r.-'); grid on
title('Respuesta en [dB] pérdida de paquetes CG Monte Carlo discreto piscina 4')
xlabel('Parámetro de umbral del switch de decisión piscina 4')
ylabel('Razón Señal-Ruido [dB] piscina 4')
legend('Respuesta','Location','NorthWest')
figure(5); plot(u2_aux5,SNRprod5_dB,'r.-'); grid on
title('Respuesta en [dB] pérdida de paquetes CG Monte Carlo discreto piscina 5')
xlabel('Parámetro de umbral del switch de decisión piscina 5')
ylabel('Razón Señal-Ruido [dB] piscina 5')
legend('Respuesta','Location','NorthWest')

```

A.13. Script

discreto_equiv_perd_paq_GC_y_AWGN_1min_SNR.m

```
%discreto_equiv_perd_paq_GC_y_AWGN_1min_SNR

%Inicialización de variables
clear all; close all; clc

open_system('discreto_equiv_perd_paq_GC_y_AWGN_1min_SNR.mdl')
for m=1:100,
    m
    for u=1:12,
        u
            set_param('discreto_equiv_perd_paq_GC_y_AWGN_1min_SNR/Subsystem1/Uniform
Random Number','Seed','15*(m-1)')
            set_param('discreto_equiv_perd_paq_GC_y_AWGN_1min_SNR/Subsystem2/Uniform
Random Number','Seed','15*(m-1)+10')
            set_param('discreto_equiv_perd_paq_GC_y_AWGN_1min_SNR/Subsystem3/Uniform
Random Number','Seed','15*(m-1)+20')
            set_param('discreto_equiv_perd_paq_GC_y_AWGN_1min_SNR/Subsystem4/Uniform
Random Number','Seed','15*(m-1)+30')
            set_param('discreto_equiv_perd_paq_GC_y_AWGN_1min_SNR/Subsystem5/Uniform
Random Number','Seed','15*(m-1)+40')

set_param('discreto_equiv_perd_paq_GC_y_AWGN_1min_SNR/Subsystem1/Switch','Thresh
old','0.01+(0.99-0.01)/(12-1)*(u-1)')

set_param('discreto_equiv_perd_paq_GC_y_AWGN_1min_SNR/Subsystem2/Switch','Thresh
old','0.01+(0.99-0.01)/(12-1)*(u-1)')

set_param('discreto_equiv_perd_paq_GC_y_AWGN_1min_SNR/Subsystem3/Switch','Thresh
old','0.01+(0.99-0.01)/(12-1)*(u-1)')

set_param('discreto_equiv_perd_paq_GC_y_AWGN_1min_SNR/Subsystem4/Switch','Thresh
old','0.01+(0.99-0.01)/(12-1)*(u-1)')

set_param('discreto_equiv_perd_paq_GC_y_AWGN_1min_SNR/Subsystem5/Switch','Thresh
old','0.01+(0.99-0.01)/(12-1)*(u-1)')
            set_param('discreto_equiv_perd_paq_GC_y_AWGN_1min_SNR/Random
Number1','Seed','15*(m-1)')
            set_param('discreto_equiv_perd_paq_GC_y_AWGN_1min_SNR/Random
Number2','Seed','15*(m-1)+10')
            set_param('discreto_equiv_perd_paq_GC_y_AWGN_1min_SNR/Random
Number3','Seed','15*(m-1)+20')
            set_param('discreto_equiv_perd_paq_GC_y_AWGN_1min_SNR/Random
Number4','Seed','15*(m-1)+30')
            set_param('discreto_equiv_perd_paq_GC_y_AWGN_1min_SNR/Random
Number5','Seed','15*(m-1)+40')
            sim('discreto_equiv_perd_paq_GC_y_AWGN_1min_SNR.mdl')
            S1=var(simout1);
            N1=var(simout2);
            S2=var(simout3);
            N2=var(simout4);
            S3=var(simout5);
            N3=var(simout6);
        end
    end
end
```

```

S4=var(simout7);
N4=var(simout8);
S5=var(simout9);
N5=var(simout10);
SNR1(m,u)=S1/N1;
SNR2(m,u)=S2/N2;
SNR3(m,u)=S3/N3;
SNR4(m,u)=S4/N4;
SNR5(m,u)=S5/N5;
end
end
save_system('discreto_equiv_perd_paq_GC_y_AWGN_lmin_SNR.mdl')
close_system('discreto_equiv_perd_paq_GC_y_AWGN_lmin_SNR.mdl')
SNRprod1=sum(SNR1,1)/m;
SNRprod2=sum(SNR2,1)/m;
SNRprod3=sum(SNR3,1)/m;
SNRprod4=sum(SNR4,1)/m;
SNRprod5=sum(SNR5,1)/m;
SNRprod1_dB=10*log10(SNRprod1);
SNRprod2_dB=10*log10(SNRprod2);
SNRprod3_dB=10*log10(SNRprod3);
SNRprod4_dB=10*log10(SNRprod4);
SNRprod5_dB=10*log10(SNRprod5);
u2_aux1=0.01:(0.99-0.01)/(12-1):0.01+(0.99-0.01)/(12-1)*(u-1);
u2_aux2=0.01:(0.99-0.01)/(12-1):0.01+(0.99-0.01)/(12-1)*(u-1);
u2_aux3=0.01:(0.99-0.01)/(12-1):0.01+(0.99-0.01)/(12-1)*(u-1);
u2_aux4=0.01:(0.99-0.01)/(12-1):0.01+(0.99-0.01)/(12-1)*(u-1);
u2_aux5=0.01:(0.99-0.01)/(12-1):0.01+(0.99-0.01)/(12-1)*(u-1);
figure(1); plot(u2_aux1,SNRprod1_dB,'r.-'); grid on
title('Respuesta en [dB] pérdida de paquetes GC Monte Carlo discreto piscina 1')
xlabel('Parámetro de umbral del switch de decisión piscina 1')
ylabel('Razón Señal-Ruido [dB] piscina 1')
legend('Respuesta','Location','NorthWest')
figure(2); plot(u2_aux2,SNRprod2_dB,'r.-'); grid on
title('Respuesta en [dB] pérdida de paquetes GC Monte Carlo discreto piscina 2')
xlabel('Parámetro de umbral del switch de decisión piscina 2')
ylabel('Razón Señal-Ruido [dB] piscina 2')
legend('Respuesta','Location','NorthWest')
figure(3); plot(u2_aux3,SNRprod3_dB,'r.-'); grid on
title('Respuesta en [dB] pérdida de paquetes GC Monte Carlo discreto piscina 3')
xlabel('Parámetro de umbral del switch de decisión piscina 3')
ylabel('Razón Señal-Ruido [dB] piscina 3')
legend('Respuesta','Location','NorthWest')
figure(4); plot(u2_aux4,SNRprod4_dB,'r.-'); grid on
title('Respuesta en [dB] pérdida de paquetes GC Monte Carlo discreto piscina 4')
xlabel('Parámetro de umbral del switch de decisión piscina 4')
ylabel('Razón Señal-Ruido [dB] piscina 4')
legend('Respuesta','Location','NorthWest')
figure(5); plot(u2_aux5,SNRprod5_dB,'r.-'); grid on
title('Respuesta en [dB] pérdida de paquetes GC Monte Carlo discreto piscina 5')
xlabel('Parámetro de umbral del switch de decisión piscina 5')
ylabel('Razón Señal-Ruido [dB] piscina 5')
legend('Respuesta','Location','NorthWest')

```

A.14. Script

discreto_equiv_perd_paq_CG_GC_AWGN_1min_SNR.m

```

%discreto_equiv_perd_paq_CG_GC_AWGN_1min_SNR

%Inicialización de variables
clear all; close all; clc

open_system('discreto_equiv_perd_paq_CG_GC_AWGN_1min_SNR.mdl')
for m=1:100,
    m
    for u=1:12,
        u

set_param('discreto_equiv_perd_paq_CG_GC_AWGN_1min_SNR/Subsystem1/Uniform Random
Number','Seed','15*(m-1)')

set_param('discreto_equiv_perd_paq_CG_GC_AWGN_1min_SNR/Subsystem2/Uniform Random
Number','Seed','15*(m-1)+10')

set_param('discreto_equiv_perd_paq_CG_GC_AWGN_1min_SNR/Subsystem3/Uniform Random
Number','Seed','15*(m-1)+20')

set_param('discreto_equiv_perd_paq_CG_GC_AWGN_1min_SNR/Subsystem4/Uniform Random
Number','Seed','15*(m-1)+30')

set_param('discreto_equiv_perd_paq_CG_GC_AWGN_1min_SNR/Subsystem5/Uniform Random
Number','Seed','15*(m-1)+40')

set_param('discreto_equiv_perd_paq_CG_GC_AWGN_1min_SNR/Subsystem6/Uniform Random
Number','Seed','15*(m-1)')

set_param('discreto_equiv_perd_paq_CG_GC_AWGN_1min_SNR/Subsystem7/Uniform Random
Number','Seed','15*(m-1)+10')

set_param('discreto_equiv_perd_paq_CG_GC_AWGN_1min_SNR/Subsystem8/Uniform Random
Number','Seed','15*(m-1)+20')

set_param('discreto_equiv_perd_paq_CG_GC_AWGN_1min_SNR/Subsystem9/Uniform Random
Number','Seed','15*(m-1)+30')

set_param('discreto_equiv_perd_paq_CG_GC_AWGN_1min_SNR/Subsystem10/Uniform
Random Number','Seed','15*(m-1)+40')

set_param('discreto_equiv_perd_paq_CG_GC_AWGN_1min_SNR/Subsystem1/Switch','Thres
hold','0.01+(0.99-0.01)/(12-1)*(u-1)')

set_param('discreto_equiv_perd_paq_CG_GC_AWGN_1min_SNR/Subsystem2/Switch','Thres
hold','0.01+(0.99-0.01)/(12-1)*(u-1)')

set_param('discreto_equiv_perd_paq_CG_GC_AWGN_1min_SNR/Subsystem3/Switch','Thres
hold','0.01+(0.99-0.01)/(12-1)*(u-1)')

set_param('discreto_equiv_perd_paq_CG_GC_AWGN_1min_SNR/Subsystem4/Switch','Thres
hold','0.01+(0.99-0.01)/(12-1)*(u-1)')

```



```

set_param('discreto_equiv_perd_paq_CG_GC_AWGN_lmin_SNR/Subsystem5/Switch','Thres
hold','0.01+(0.99-0.01)/(12-1)*(u-1)')

set_param('discreto_equiv_perd_paq_CG_GC_AWGN_lmin_SNR/Subsystem6/Switch','Thres
hold','0.01+(0.99-0.01)/(12-1)*(u-1)')

set_param('discreto_equiv_perd_paq_CG_GC_AWGN_lmin_SNR/Subsystem7/Switch','Thres
hold','0.01+(0.99-0.01)/(12-1)*(u-1)')

set_param('discreto_equiv_perd_paq_CG_GC_AWGN_lmin_SNR/Subsystem8/Switch','Thres
hold','0.01+(0.99-0.01)/(12-1)*(u-1)')

set_param('discreto_equiv_perd_paq_CG_GC_AWGN_lmin_SNR/Subsystem9/Switch','Thres
hold','0.01+(0.99-0.01)/(12-1)*(u-1)')

set_param('discreto_equiv_perd_paq_CG_GC_AWGN_lmin_SNR/Subsystem10/Switch','Thre
shold','0.01+(0.99-0.01)/(12-1)*(u-1)')
    set_param('discreto_equiv_perd_paq_CG_GC_AWGN_lmin_SNR/Random
Number1','Seed','15*(m-1)')
    set_param('discreto_equiv_perd_paq_CG_GC_AWGN_lmin_SNR/Random
Number2','Seed','15*(m-1)+10')
    set_param('discreto_equiv_perd_paq_CG_GC_AWGN_lmin_SNR/Random
Number3','Seed','15*(m-1)+20')
    set_param('discreto_equiv_perd_paq_CG_GC_AWGN_lmin_SNR/Random
Number4','Seed','15*(m-1)+30')
    set_param('discreto_equiv_perd_paq_CG_GC_AWGN_lmin_SNR/Random
Number5','Seed','15*(m-1)+40')
    set_param('discreto_equiv_perd_paq_CG_GC_AWGN_lmin_SNR/Random
Number6','Seed','15*(m-1)')
    set_param('discreto_equiv_perd_paq_CG_GC_AWGN_lmin_SNR/Random
Number7','Seed','15*(m-1)+10')
    set_param('discreto_equiv_perd_paq_CG_GC_AWGN_lmin_SNR/Random
Number8','Seed','15*(m-1)+20')
    set_param('discreto_equiv_perd_paq_CG_GC_AWGN_lmin_SNR/Random
Number9','Seed','15*(m-1)+30')
    set_param('discreto_equiv_perd_paq_CG_GC_AWGN_lmin_SNR/Random
Number10','Seed','15*(m-1)+40')
    sim('discreto_equiv_perd_paq_CG_GC_AWGN_lmin_SNR.mdl')
    S1=var(simout1);
    N1=var(simout2);
    S2=var(simout3);
    N2=var(simout4);
    S3=var(simout5);
    N3=var(simout6);
    S4=var(simout7);
    N4=var(simout8);
    S5=var(simout9);
    N5=var(simout10);
    S6=var(simout11);
    N6=var(simout12);
    S7=var(simout13);
    N7=var(simout14);
    S8=var(simout15);
    N8=var(simout16);
    S9=var(simout17);
    N9=var(simout18);
    S10=var(simout19);

```

```

N10=var(simout20);
SNR1(m,u)=S1/N1;
SNR2(m,u)=S2/N2;
SNR3(m,u)=S3/N3;
SNR4(m,u)=S4/N4;
SNR5(m,u)=S5/N5;
SNR6(m,u)=S6/N6;
SNR7(m,u)=S7/N7;
SNR8(m,u)=S8/N8;
SNR9(m,u)=S9/N9;
SNR10(m,u)=S10/N10;
end
end
save_system('discreto_equiv_perd_paq_CG_GC_AWGN_lmin_SNR.mdl')
close_system('discreto_equiv_perd_paq_CG_GC_AWGN_lmin_SNR.mdl')
SNRprod1=sum(SNR1,1)/m;
SNRprod2=sum(SNR2,1)/m;
SNRprod3=sum(SNR3,1)/m;
SNRprod4=sum(SNR4,1)/m;
SNRprod5=sum(SNR5,1)/m;
SNRprod6=sum(SNR6,1)/m;
SNRprod7=sum(SNR7,1)/m;
SNRprod8=sum(SNR8,1)/m;
SNRprod9=sum(SNR9,1)/m;
SNRprod10=sum(SNR10,1)/m;
SNRprod1_dB=10*log10(SNRprod1);
SNRprod2_dB=10*log10(SNRprod2);
SNRprod3_dB=10*log10(SNRprod3);
SNRprod4_dB=10*log10(SNRprod4);
SNRprod5_dB=10*log10(SNRprod5);
SNRprod6_dB=10*log10(SNRprod6);
SNRprod7_dB=10*log10(SNRprod7);
SNRprod8_dB=10*log10(SNRprod8);
SNRprod9_dB=10*log10(SNRprod9);
SNRprod10_dB=10*log10(SNRprod10);
u2_aux1=0.01:(0.99-0.01)/(12-1):0.01+(0.99-0.01)/(12-1)*(u-1);
u2_aux2=0.01:(0.99-0.01)/(12-1):0.01+(0.99-0.01)/(12-1)*(u-1);
u2_aux3=0.01:(0.99-0.01)/(12-1):0.01+(0.99-0.01)/(12-1)*(u-1);
u2_aux4=0.01:(0.99-0.01)/(12-1):0.01+(0.99-0.01)/(12-1)*(u-1);
u2_aux5=0.01:(0.99-0.01)/(12-1):0.01+(0.99-0.01)/(12-1)*(u-1);
u2_aux6=0.01:(0.99-0.01)/(12-1):0.01+(0.99-0.01)/(12-1)*(u-1);
u2_aux7=0.01:(0.99-0.01)/(12-1):0.01+(0.99-0.01)/(12-1)*(u-1);
u2_aux8=0.01:(0.99-0.01)/(12-1):0.01+(0.99-0.01)/(12-1)*(u-1);
u2_aux9=0.01:(0.99-0.01)/(12-1):0.01+(0.99-0.01)/(12-1)*(u-1);
u2_aux10=0.01:(0.99-0.01)/(12-1):0.01+(0.99-0.01)/(12-1)*(u-1);
figure(1); plot(u2_aux1,SNRprod1_dB,'r.-'); hold on;
plot(u2_aux6,SNRprod6_dB,'b.-'); grid on
title('Respuesta en [dB] pérdida de paquetes CG y GC Monte Carlo discreto
piscina 1')
xlabel('Parámetro de umbral del switch de decisión piscina 1')
ylabel('Razón Señal-Ruido [dB] piscina 1')
legend('Respuesta CG','Respuesta GC','Location','NorthWest')
figure(2); plot(u2_aux2,SNRprod2_dB,'r.-'); hold on;
plot(u2_aux7,SNRprod7_dB,'b.-'); grid on
title('Respuesta en [dB] pérdida de paquetes CG y GC Monte Carlo discreto
piscina 2')
xlabel('Parámetro de umbral del switch de decisión piscina 2')
ylabel('Razón Señal-Ruido [dB] piscina 2')

```



```
legend('Respuesta CG', 'Respuesta GC', 'Location', 'NorthWest')
figure(3); plot(u2_aux3, SNRprod3_dB, 'r.-'); hold on;
plot(u2_aux8, SNRprod8_dB, 'b.-'); grid on
title('Respuesta en [dB] pérdida de paquetes CG y GC Monte Carlo discreto
piscina 3')
xlabel('Parámetro de umbral del switch de decisión piscina 3')
ylabel('Razón Señal-Ruido [dB] piscina 3')
legend('Respuesta CG', 'Respuesta GC', 'Location', 'NorthWest')
figure(4); plot(u2_aux4, SNRprod4_dB, 'r.-'); hold on;
plot(u2_aux9, SNRprod9_dB, 'b.-'); grid on
title('Respuesta en [dB] pérdida de paquetes CG y GC Monte Carlo discreto
piscina 4')
xlabel('Parámetro de umbral del switch de decisión piscina 4')
ylabel('Razón Señal-Ruido [dB] piscina 4')
legend('Respuesta CG', 'Respuesta GC', 'Location', 'NorthWest')
figure(5); plot(u2_aux5, SNRprod5_dB, 'r.-'); hold on;
plot(u2_aux10, SNRprod10_dB, 'b.-'); grid on
title('Respuesta en [dB] pérdida de paquetes CG y GC Monte Carlo discreto
piscina 5')
xlabel('Parámetro de umbral del switch de decisión piscina 5')
ylabel('Razón Señal-Ruido [dB] piscina 5')
legend('Respuesta CG', 'Respuesta GC', 'Location', 'NorthWest')
```



A.15. Script `discreto_equiv_Kvar_AWGN_CG_1min_SNR.m`

```

%discreto_equiv_Kvar_AWGN_CG_1min_SNR

%Inicialización de variables
clear all; close all; clc

open_system('discreto_equiv_Kvar_AWGN_CG_1min_SNR.mdl')
for m=1:100,
    m
    for alpha=1:12,
        alpha
        set_param('discreto_equiv_Kvar_AWGN_CG_1min_SNR/Subsystem1/Uniform
Random Number','Minimum','-alpha*0.5/12')
        set_param('discreto_equiv_Kvar_AWGN_CG_1min_SNR/Subsystem1/Uniform
Random Number','Maximum','alpha*0.5/12')
        set_param('discreto_equiv_Kvar_AWGN_CG_1min_SNR/Subsystem2/Uniform
Random Number','Minimum','-alpha*0.5/12')
        set_param('discreto_equiv_Kvar_AWGN_CG_1min_SNR/Subsystem2/Uniform
Random Number','Maximum','alpha*0.5/12')
        set_param('discreto_equiv_Kvar_AWGN_CG_1min_SNR/Subsystem3/Uniform
Random Number','Minimum','-alpha*0.5/12')
        set_param('discreto_equiv_Kvar_AWGN_CG_1min_SNR/Subsystem3/Uniform
Random Number','Maximum','alpha*0.5/12')
        set_param('discreto_equiv_Kvar_AWGN_CG_1min_SNR/Subsystem4/Uniform
Random Number','Minimum','-alpha*0.5/12')
        set_param('discreto_equiv_Kvar_AWGN_CG_1min_SNR/Subsystem4/Uniform
Random Number','Maximum','alpha*0.5/12')
        set_param('discreto_equiv_Kvar_AWGN_CG_1min_SNR/Subsystem5/Uniform
Random Number','Minimum','-alpha*0.5/12')
        set_param('discreto_equiv_Kvar_AWGN_CG_1min_SNR/Subsystem5/Uniform
Random Number','Maximum','alpha*0.5/12')
        set_param('discreto_equiv_Kvar_AWGN_CG_1min_SNR/Subsystem1/Uniform
Random Number','Seed','10*(m-1)')
        set_param('discreto_equiv_Kvar_AWGN_CG_1min_SNR/Subsystem2/Uniform
Random Number','Seed','10*(m-1)+10')
        set_param('discreto_equiv_Kvar_AWGN_CG_1min_SNR/Subsystem3/Uniform
Random Number','Seed','10*(m-1)+20')
        set_param('discreto_equiv_Kvar_AWGN_CG_1min_SNR/Subsystem4/Uniform
Random Number','Seed','10*(m-1)+30')
        set_param('discreto_equiv_Kvar_AWGN_CG_1min_SNR/Subsystem5/Uniform
Random Number','Seed','10*(m-1)+40')
        set_param('discreto_equiv_Kvar_AWGN_CG_1min_SNR/Random
Number1','Seed','15*(m-1)')
        set_param('discreto_equiv_Kvar_AWGN_CG_1min_SNR/Random
Number2','Seed','15*(m-1)+10')
        set_param('discreto_equiv_Kvar_AWGN_CG_1min_SNR/Random
Number3','Seed','15*(m-1)+20')
        set_param('discreto_equiv_Kvar_AWGN_CG_1min_SNR/Random
Number4','Seed','15*(m-1)+30')
        set_param('discreto_equiv_Kvar_AWGN_CG_1min_SNR/Random
Number5','Seed','15*(m-1)+40')
        sim('discreto_equiv_Kvar_AWGN_CG_1min_SNR.mdl')
        S1=var(simout1);
        N1=var(simout2);
        S2=var(simout3);
    end
end

```

```

N2=var(simout4);
S3=var(simout5);
N3=var(simout6);
S4=var(simout7);
N4=var(simout8);
S5=var(simout9);
N5=var(simout10);
SNR1(m,alpha)=S1/N1;
SNR2(m,alpha)=S2/N2;
SNR3(m,alpha)=S3/N3;
SNR4(m,alpha)=S4/N4;
SNR5(m,alpha)=S5/N5;
end
end
save_system('discreto_equiv_Kvar_AWGN_CG_lmin_SNR.mdl')
close_system('discreto_equiv_Kvar_AWGN_CG_lmin_SNR.mdl')
SNRprod1=sum(SNR1,1)/m;
SNRprod2=sum(SNR2,1)/m;
SNRprod3=sum(SNR3,1)/m;
SNRprod4=sum(SNR4,1)/m;
SNRprod5=sum(SNR5,1)/m;
SNRprod1_dB=10*log10(SNRprod1);
SNRprod2_dB=10*log10(SNRprod2);
SNRprod3_dB=10*log10(SNRprod3);
SNRprod4_dB=10*log10(SNRprod4);
SNRprod5_dB=10*log10(SNRprod5);
alpha_aux1=0.5/12:0.5/12:alpha*0.5/12;
alpha_aux2=0.5/12:0.5/12:alpha*0.5/12;
alpha_aux3=0.5/12:0.5/12:alpha*0.5/12;
alpha_aux4=0.5/12:0.5/12:alpha*0.5/12;
alpha_aux5=0.5/12:0.5/12:alpha*0.5/12;
figure(1); plot(alpha_aux1,SNRprod1_dB,'r.-'); grid on
title('Respuesta en [dB] ganancia variable CG Monte Carlo discreto piscina 1')
xlabel('Parámetro que caracteriza el rango de la distribución uniforme piscina 1')
ylabel('Razón Señal-Ruido [dB] piscina 1')
legend('Respuesta','Location','NorthWest')
axis([0 0.5 -20 -15])
figure(2); plot(alpha_aux2,SNRprod2_dB,'r.-'); grid on
title('Respuesta en [dB] ganancia variable CG Monte Carlo discreto piscina 2')
xlabel('Parámetro que caracteriza el rango de la distribución uniforme piscina 2')
ylabel('Razón Señal-Ruido [dB] piscina 2')
legend('Respuesta','Location','NorthWest')
axis([0 0.5 -20 -15])
figure(3); plot(alpha_aux3,SNRprod3_dB,'r.-'); grid on
title('Respuesta en [dB] ganancia variable CG Monte Carlo discreto piscina 3')
xlabel('Parámetro que caracteriza el rango de la distribución uniforme piscina 3')
ylabel('Razón Señal-Ruido [dB] piscina 3')
legend('Respuesta','Location','NorthWest')
axis([0 0.5 -20 -15])
figure(4); plot(alpha_aux4,SNRprod4_dB,'r.-'); grid on
title('Respuesta en [dB] ganancia variable CG Monte Carlo discreto piscina 4')
xlabel('Parámetro que caracteriza el rango de la distribución uniforme piscina 4')
ylabel('Razón Señal-Ruido [dB] piscina 4')
legend('Respuesta','Location','NorthWest')

```

```
axis([0 0.5 -20 -15])
figure(5); plot(alpha_aux5,SNRprod5_dB,'r.-'); grid on
title('Respuesta en [dB] ganancia variable CG Monte Carlo discreto piscina 5')
xlabel('Parámetro que caracteriza el rango de la distribución uniforme piscina 5')
ylabel('Razón Señal-Ruido [dB] piscina 5')
legend('Respuesta','Location','NorthWest')
axis([0 0.5 -20 -15])
```



A.16. Script `discreto_equiv_Kvar_AWGN_GC_1min_SNR.m`

```

%discreto_equiv_Kvar_AWGN_GC_1min_SNR

%Inicialización de variables
clear all; close all; clc

open_system('discreto_equiv_Kvar_AWGN_GC_1min_SNR.mdl')
for m=1:100,
    m
    for alpha=1:12,
        alpha
            set_param('discreto_equiv_Kvar_AWGN_GC_1min_SNR/Subsystem1/Uniform
Random Number','Minimum','-alpha*0.5/12')
            set_param('discreto_equiv_Kvar_AWGN_GC_1min_SNR/Subsystem1/Uniform
Random Number','Maximum','alpha*0.5/12')
            set_param('discreto_equiv_Kvar_AWGN_GC_1min_SNR/Subsystem2/Uniform
Random Number','Minimum','-alpha*0.5/12')
            set_param('discreto_equiv_Kvar_AWGN_GC_1min_SNR/Subsystem2/Uniform
Random Number','Maximum','alpha*0.5/12')
            set_param('discreto_equiv_Kvar_AWGN_GC_1min_SNR/Subsystem3/Uniform
Random Number','Minimum','-alpha*0.5/12')
            set_param('discreto_equiv_Kvar_AWGN_GC_1min_SNR/Subsystem3/Uniform
Random Number','Maximum','alpha*0.5/12')
            set_param('discreto_equiv_Kvar_AWGN_GC_1min_SNR/Subsystem4/Uniform
Random Number','Minimum','-alpha*0.5/12')
            set_param('discreto_equiv_Kvar_AWGN_GC_1min_SNR/Subsystem4/Uniform
Random Number','Maximum','alpha*0.5/12')
            set_param('discreto_equiv_Kvar_AWGN_GC_1min_SNR/Subsystem5/Uniform
Random Number','Minimum','-alpha*0.5/12')
            set_param('discreto_equiv_Kvar_AWGN_GC_1min_SNR/Subsystem5/Uniform
Random Number','Maximum','alpha*0.5/12')
            set_param('discreto_equiv_Kvar_AWGN_GC_1min_SNR/Subsystem1/Uniform
Random Number','Seed','10*(m-1)')
            set_param('discreto_equiv_Kvar_AWGN_GC_1min_SNR/Subsystem2/Uniform
Random Number','Seed','10*(m-1)+10')
            set_param('discreto_equiv_Kvar_AWGN_GC_1min_SNR/Subsystem3/Uniform
Random Number','Seed','10*(m-1)+20')
            set_param('discreto_equiv_Kvar_AWGN_GC_1min_SNR/Subsystem4/Uniform
Random Number','Seed','10*(m-1)+30')
            set_param('discreto_equiv_Kvar_AWGN_GC_1min_SNR/Subsystem5/Uniform
Random Number','Seed','10*(m-1)+40')
            set_param('discreto_equiv_Kvar_AWGN_GC_1min_SNR/Random
Number1','Seed','15*(m-1)')
            set_param('discreto_equiv_Kvar_AWGN_GC_1min_SNR/Random
Number2','Seed','15*(m-1)+10')
            set_param('discreto_equiv_Kvar_AWGN_GC_1min_SNR/Random
Number3','Seed','15*(m-1)+20')
            set_param('discreto_equiv_Kvar_AWGN_GC_1min_SNR/Random
Number4','Seed','15*(m-1)+30')
            set_param('discreto_equiv_Kvar_AWGN_GC_1min_SNR/Random
Number5','Seed','15*(m-1)+40')
            sim('discreto_equiv_Kvar_AWGN_GC_1min_SNR.mdl')
            S1=var(simout1);
            N1=var(simout2);
            S2=var(simout3);
    end
end

```

```

N2=var(simout4);
S3=var(simout5);
N3=var(simout6);
S4=var(simout7);
N4=var(simout8);
S5=var(simout9);
N5=var(simout10);
SNR1(m,alpha)=S1/N1;
SNR2(m,alpha)=S2/N2;
SNR3(m,alpha)=S3/N3;
SNR4(m,alpha)=S4/N4;
SNR5(m,alpha)=S5/N5;
end
end
save_system('discreto_equiv_Kvar_AWGN_GC_lmin_SNR.mdl')
close_system('discreto_equiv_Kvar_AWGN_GC_lmin_SNR.mdl')
SNRprod1=sum(SNR1,1)/m;
SNRprod2=sum(SNR2,1)/m;
SNRprod3=sum(SNR3,1)/m;
SNRprod4=sum(SNR4,1)/m;
SNRprod5=sum(SNR5,1)/m;
SNRprod1_dB=10*log10(SNRprod1);
SNRprod2_dB=10*log10(SNRprod2);
SNRprod3_dB=10*log10(SNRprod3);
SNRprod4_dB=10*log10(SNRprod4);
SNRprod5_dB=10*log10(SNRprod5);
alpha_aux1=0.5/12:0.5/12:alpha*0.5/12;
alpha_aux2=0.5/12:0.5/12:alpha*0.5/12;
alpha_aux3=0.5/12:0.5/12:alpha*0.5/12;
alpha_aux4=0.5/12:0.5/12:alpha*0.5/12;
alpha_aux5=0.5/12:0.5/12:alpha*0.5/12;
figure(1); plot(alpha_aux1,SNRprod1_dB,'r.-'); grid on
title('Respuesta en [dB] ganancia variable GC Monte Carlo discreto piscina 1')
xlabel('Parámetro que caracteriza el rango de la distribución uniforme piscina 1')
ylabel('Razón Señal-Ruido [dB] piscina 1')
legend('Respuesta','Location','NorthWest')
axis([0 0.5 -20 -15])
figure(2); plot(alpha_aux2,SNRprod2_dB,'r.-'); grid on
title('Respuesta en [dB] ganancia variable GC Monte Carlo discreto piscina 2')
xlabel('Parámetro que caracteriza el rango de la distribución uniforme piscina 2')
ylabel('Razón Señal-Ruido [dB] piscina 2')
legend('Respuesta','Location','NorthWest')
axis([0 0.5 -20 -15])
figure(3); plot(alpha_aux3,SNRprod3_dB,'r.-'); grid on
title('Respuesta en [dB] ganancia variable GC Monte Carlo discreto piscina 3')
xlabel('Parámetro que caracteriza el rango de la distribución uniforme piscina 3')
ylabel('Razón Señal-Ruido [dB] piscina 3')
legend('Respuesta','Location','NorthWest')
axis([0 0.5 -20 -15])
figure(4); plot(alpha_aux4,SNRprod4_dB,'r.-'); grid on
title('Respuesta en [dB] ganancia variable GC Monte Carlo discreto piscina 4')
xlabel('Parámetro que caracteriza el rango de la distribución uniforme piscina 4')
ylabel('Razón Señal-Ruido [dB] piscina 4')
legend('Respuesta','Location','NorthWest')

```



```
axis([0 0.5 -20 -15])  
figure(5); plot(alpha_aux5,SNRprod5_dB,'r.-'); grid on  
title('Respuesta en [dB] ganancia variable GC Monte Carlo discreto piscina 5')  
xlabel('Parámetro que caracteriza el rango de la distribución uniforme piscina  
5')  
ylabel('Razón Señal-Ruido [dB] piscina 5')  
legend('Respuesta','Location','NorthWest')  
axis([0 0.5 -20 -15])
```

