

ÍNDICE

	Pág.
• INTRODUCCIÓN	1
○ Referencias	3
• CAPÍTULO 1. ANTEDECENTES	4
○ 1.1 Introducción	4
○ 1.2 Objetivos generales	5
○ 1.3 Estudios previos	6
○ 1.4 Conceptos básicos	7
▪ 1.4.1 El ciclo hidrológico	7
• a) Evaporación	8
• b) Precipitación	8
• c) Retención	8
• d) Escorrentía superficial	8
• e) Infiltración	8
• f) Percolación	8
• g) Evapotranspiración	9
• h) Escorrentía subterránea	9
▪ 1.4.2 Elementos de un aprovechamiento hidroeléctrico	10
• a) Cuenca fluvial	10
• b) Vaso de almacenamiento o embalse	10
• c) Cortina	10
• d) Obra de toma	10
• e) Obra de excedencias	10
• f) Obra de control	11
• g) Obra de desvío	11
• h) Casa de máquinas	11
• i) Energía	11
• j) Potencia	11
• k) Eficiencia	11
▪ 1.4.3 Conceptos básicos de estadística y probabilidad	11
• a) Variable aleatoria	11
• b) Población	12
• c) Muestra	12
• d) Media	12
• e) Desviación estándar	12
• f) Coeficiente de asimetría	12
• g) Coeficiente de autocorrelación	13
• h) Coeficiente de correlación cruzada	13

▪ 1.4.3.1 Funciones de distribución de probabilidad	13
• a) Función de distribución normal	13
• b) Función de distribución lognormal	14
• c) Función de distribución Pearson III o Gamma de 3 parámetros	14
• d) Función de distribución Gumbel	15
• e) Función de distribución Doble Gumbel o Gumbel de dos poblaciones	15
○ 1.5 Conclusiones	17
○ 1.6 Referencias	17
• CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA	19
○ 2.1 Introducción	19
○ 2.2 Descripción del sitio de estudio	19
▪ 2.2.1 Datos generales de la presa La Yesca	20
▪ 2.2.2 Datos generales de la presa El Cajón	22
▪ 2.2.3 Datos generales de la presa Aguamilpa	24
○ 2.3 Definición de política de operación	26
○ 2.4 Programación dinámica estocástica	27
○ 2.5 Función objetivo	30
○ 2.6 Datos de entrada al modelo de optimización	31
○ 2.7 Simulación del funcionamiento de vaso conjunto de tres presas en cascada	36
• a) Para la presa 1	36
• b) Para la presa 2	36
• c) Para la presa 3	37
▪ 2.7.1 Volumen DELVOL para tomar en cuenta la autocorrelación existente entre los volúmenes de ingreso de una etapa a otra de la simulación	38
○ 2.8 Programa de simulación del funcionamiento conjunto de los vasos del sistema con políticas de operación óptima con el registro histórico	39
▪ 2.8.1 Archivo de datos	40
▪ 2.8.2 Archivos de resultados	43
○ 2.9 Método Svanidze modificado para generación de registros sintéticos	43
▪ 2.9.1 Ejemplo ilustrativo para la generación de series sintéticas de dos series históricas utilizando el método de Svanidze modificado	45
○ 2.10 Referencias	61
• CAPÍTULO 3. APLICACIÓN Y RESULTADOS	63
○ 3.1 Introducción	63
○ 3.2 Datos de entrada al modelo de simulación del funcionamiento conjunto	63
○ 3.3 Resultados de la simulación de políticas de operación con el registro histórico	66
○ 3.4 Selección de la mejor política de operación	70
○ 3.5 Resultados de la generación de registros sintéticos	72
○ 3.6 Simulación de políticas de operación con los registros sintéticos	79

▪ 3.6.1 Introducción	79
▪ 3.6.2 Resultados de la simulación	80
○ 3.7 Conclusiones	81
• CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES	82
• REFERENCIAS	85
• ANEXO 1. ESTACIONES HIDROMÉTRICAS	88
• ANEXO 2. SIMULACIÓN DEL REGISTRO HISTÓRICO CON LA POLÍTICA	102
21	
• ANEXO 3. SIMULACIÓN DE REGISTROS SINTÉTICOS CON LA POLÍTICA	148
21. SERIE SINTÉTICA 1. DETALLE AÑOS 1 A 10 Y RESUMEN	
• ANEXO 4. REGLAS PARA LA OPERACIÓN	170
○ A4.1 Curva guía con $\Delta V=150$ millones de m^3 . Limitada al NAMO	171
○ A4.2 Empleo de las políticas quincenales óptimas simuladas	174
○ A4.3 Manejo del DELVOL	176
• ANEXO 5. ARCHIVO DE DATOS Y LISTADO DE PROGRAMA PARA	178
SIMULACIÓN	

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
• Tabla 2.1 Características generales. Presa La Yesca	21
• Tabla 2.2 Características generales. Presa El Cajón	23
• Tabla 2.3 Características generales. Presa Aguamilpa	25
• Tabla 2.4 Datos para proponer curvas guía. Presa El Cajón y Aguamilpa	34
• Tabla 2.5 Curvas guía propuesta $\Delta V=200$ millones de m^3 . La Yesca, El Cajón y Aguamilpa, río Santiago, Nay.	34
• Tabla 2.6 Curvas guía propuesta $\Delta V=150$ millones de m^3 . La Yesca, El Cajón y Aguamilpa, río Santiago, Nay.	35
• Tabla 2.7 Registro histórico de escurrimientos para presa La Yesca	45
• Tabla 2.8 Registro histórico de escurrimientos para presa Aguamilpa	46
• Tabla 2.9 Año hidrológico para presa La Yesca	47
• Tabla 2.10 Año hidrológico para presa Aguamilpa	47
• Tabla 2.11 Volumen total suma	48
• Tabla 2.12 Volumen total suma (números aleatorios con distribución doble Gumbel)	50
• Tabla 2.13 Porcentaje aleatorio contra el porcentaje total	52
• Tabla 2.14 Volumen total aleatorio	53
• Tabla 2.15 Fracción aleatoria presa La Yesca	54
• Tabla 2.16 Fracción aleatoria presa Aguamilpa	55
• Tabla 2.17 Registro sintético de 101 años para presa La Yesca	57
• Tabla 2.18 Registro sintético de 101 años para presa Aguamilpa	58
• Tabla 2.19 Estadísticos de serie sintética y serie histórica para La Yesca y Aguamilpa	59
• Tabla 3.1 Curva guía de La Yesca, El Cajón y Aguamilpa. $\Delta V=200$ millones de m^3	64
• Tabla 3.2 Curva guía de La Yesca, El Cajón y Aguamilpa. $\Delta V=150$ millones de m^3	64
• Tabla 3.3 Curva elevaciones capacidades – áreas. Presas La Yesca, El Cajón y Aguamilpa	65
• Tabla 3.4 Continuación	66
• Tabla 3.5 Resumen de la simulación conjunta del registro histórico. Sistema hidroeléctrico del río Santiago. Periodo: 1981-2008. Con DELVOL	67
• Tabla 3.6 Resumen de frecuencia de ocurrencias de derrames, déficit y años en donde se superó la curva guía. Sistema de presas del río Santiago, Nayarit. Periodo: 1981-2008. Con DELVOL	67

- **Tabla 3.7** Resumen de la simulación conjunta del registro histórico. Sistema hidroeléctrico del río Santiago. Periodo: 1981-2008. Sin DELVOL 68
- **Tabla 3.8** Resumen de frecuencia de ocurrencias de derrames, déficit y años en donde se superó la curva guía. Sistema de presas del río Santiago, Nayarit. Periodo: 1981-2008. Sin DELVOL 68
- **Tabla 3.9** Estadísticos sintéticos promedio de las 10 series sintéticas y estadísticos históricos. Presa La Yesca 72
- **Tabla 3.10** Estadísticos sintéticos promedio de las 10 series sintéticas y estadísticos históricos. Presa Aguamilpa 72
- **Tabla 3.11** Resumen de la simulación del funcionamiento de vaso conjunto usando la política de operación 21 y 10 series sintéticas de 100 años cada una. Río Santiago, Nayarit 80
- **Tabla 3.12** Frecuencia de ocurrencias de derrames, déficit y años en donde se superó la curva guía. Política 21. Sistema de 3 presas del río Santiago, Nayarit 80
- **Tabla A1.1** La Yesca + El Caimán. Volumen de escurrimiento mensual millones de m³ (BANDAS) 89
- **Tabla A1.2** Huaynamota y Huaynamota II. Volumen de escurrimiento mensual millones de m³ (BANDAS). 1989-1999 90
- **Tabla A1.3** Volumen de escurrimiento mensual por cuenca propia, millones de m³. El Cajón + Santa Rosa (CFE). Periodo común con hidrométricas 1981 a 1988 y 1991 a 1999 91
- **Tabla A1.4** Volumen de escurrimiento mensual por cuenca propia, millones de m³. Aguamilpa (CFE) 92
- **Tabla A1.5** Comparación El Caimán + La Yesca vs La Yesca (El Cajón más Santa Rosa) 92
- **Tabla A1.6** Comparación Huaynamota y Huanamota II vs cuenca propia de Aguamilpa 93
- **Tabla A1.7** Datos mensuales propuestos. Presa La Yesca. Volúmenes por cuenca propia, millones de m³ 97
- **Tabla A1.8** Datos mensuales propuestos. Presa Aguamilpa. Volúmenes por cuenca propia, millones de m³ 98
- **Tabla A1.9** Datos quincenales propuestos. Presa La Yesca. Volúmenes por cuenca propia, millones de m³ 99
- **Tabla A1.10** Datos quincenales propuestos. Presa Aguamilpa. Volúmenes por cuenca propia, millones de m³ 100
- **Tabla A1.11** Evaporación neta en mm. Presas del río Santiago. Del funcionamiento diario 101
- **Tabla A1.12** Evaporación neta en mm. Presas del río Santiago. CFE río Mississippi 101
- **Tabla A4.1** Parámetros para la ecuación 2.10 del capítulo 2 176

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
• Figura 1.1 Elementos del ciclo hidrológico	7
• Figura 1.2 Elementos de un aprovechamiento hidroeléctrico	10
• Figura 1.3 Función de densidad de la distribución normal	14
• Figura 1.4 Función lognormal	14
• Figura 1.5 Función de distribución Gumbel	15
• Figura 1.6 Función de distribución doble Gumbel	17
• Figura 2.1 Sistema de presas del río Santiago, Jalisco y Nayarit	20
• Figura 2.2 Perfil de las presas hidroeléctricas del río Santiago, Jalisco y Nayarit	20
• Figura 2.3 Estado de la construcción del P.H. La Yesca en Diciembre de 2009	22
• Figura 2.4 C.H. El Cajón	24
• Figura 2.5 C.H. Aguamilpa	25
• Figura 2.6 Modelo determinístico y estocástico	27
• Figura 2.7 Discretización del volumen útil del vaso	28
• Figura 2.8 Primera parte del algoritmo de optimización. Políticas de operación de dos y tres presas en cascada	29
• Figura 2.9 Segunda parte del algoritmo de optimización. Políticas de operación de tres presas en cascada	30
• Figura 2.10 Frecuencias relativas que definen la probabilidad del ingreso. Presa La Yesca	32
• Figura 2.11 Frecuencias relativas que definen la probabilidad del ingreso. Presa Aguamilpa	32
• Figura 2.12 Diagrama de ejecución del programa	40
• Figura 2.13 Volumen total anual suma histórico y curva de ajuste Doble Gumbel. Presas La Yesca y Aguamilpa	49
• Figura 2.14 Estadísticos históricos y sintéticos. Serie 1	59
• Figura 2.15 Estadísticos de sintéticos e históricos. Serie 1	60
• Figura 2.16 Estadísticos de sintéticos e históricos. Serie 1	60
• Figura 2.17 Comparación volumen total sintético, histórico y ajuste	61
• Figura 3.1 Fragmento de archivo ARPOLVS. Política de operación 1	65
• Figura 3.2 Comparación entre el valor histórico y el promedio mensual de las medias de 10 series sintéticas. Presa La Yesca	73
• Figura 3.3 Comparación entre el valor histórico y el promedio mensual de las desviaciones estándar de 10 series sintéticas. Presa La Yesca	73

- **Figura 3.4** Comparación entre el valor histórico y el promedio mensual de los coeficientes de asimetría de 10 series sintéticas. Presa La Yesca 74
- **Figura 3.5** Comparación entre el valor histórico y el promedio mensual de los coeficientes de variación de 10 series sintéticas. Presa La Yesca 74
- **Figura 3.6** Comparación entre el valor histórico y el promedio mensual de los coeficientes de autocorrelación de 10 series sintéticas. Presa La Yesca 75
- **Figura 3.7** Comparación entre el valor histórico y el promedio mensual de los coeficientes de correlación cruzada de 10 series sintéticas 75
- **Figura 3.8** Comparación entre el valor histórico y el promedio mensual de las medias de 10 series sintéticas. Presa Aguamilpa 76
- **Figura 3.9** Comparación entre el valor histórico y el promedio mensual de las desviaciones estándar de 10 series sintéticas. Presa Aguamilpa 76
- **Figura 3.10** Comparación entre el valor histórico y el promedio mensual de los coeficientes de asimetría de 10 series sintéticas. Presa Aguamilpa 77
- **Figura 3.11** Comparación entre el valor histórico y el promedio mensual de los coeficientes de variación de 10 series sintéticas. Presa Aguamilpa 77
- **Figura 3.12** Comparación entre el valor histórico y el promedio mensual de los coeficientes de autocorrelación de 10 series sintéticas. Presa Aguamilpa 78
- **Figura 3.13** Comparación de 1000 valores del volumen total suma sintético con respecto a los datos históricos y curva de ajuste 79

- **Figura A1.1** Correlaciones entre datos de hidrométricas y de cuenca propia. Presa Aguamilpa 94
- **Figura A1.2** Correlaciones entre datos de hidrométricas y de cuenca propia. Presa La Yesca 95

- **Figura A4.1** Curva guía propuesta. Política 12. Presa La Yesca 171
- **Figura A4.2** Curva guía propuesta. Política 12. Presa El Cajón 172
- **Figura A4.3** Curva guía propuesta. Política 12. Presa Aguamilpa 173
- **Figura A4.4** Ejemplo del formato de las políticas de operación. Sistema hidroeléctrico del río Santiago. Política 20. Para un $\Delta V=200$ millones de m^3 174
- **Figura A4.5** Ejemplo del formato de las políticas de operación. Sistema hidroeléctrico del río Santiago. Política 20. Para un $\Delta V=150$ millones de m^3 175